

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации  
Российской академии наук (СПИИРАН)



На правах рукописи

**Потрясаев Семен Алексеевич**

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

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

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
Заслуженный деятель науки РФ,  
Лауреат премии правительства РФ  
в области науки и техники,  
доктор технических наук профессор  
**Соколов Борис Владимирович**

Санкт-Петербург – 2020

## Оглавление

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Системный анализ и формализация проблемы синтеза технологий и программ управления киберфизическими системами для повышения эффективности промышленного интернета .....</b>	<b>20</b>
1.1. Общая характеристика и анализ современных тенденций в области создания и использования КФС для организации процессов глобально распределенной обработки, анализа и использования данных, поступающих от сложных объектов .....	20
1.2. Анализ современного состояния исследований проблем управления структурной динамикой КФС .....	43
1.3. Концептуальная модель процессов управления структурной динамикой КФС как процессов управления активными подвижными объектами (АПО).....	48
1.4. Теоретико-множественное описание проблемы управления структурной динамикой киберфизических систем .....	51
1.5. Методологические основы постановки и решения проблемы управления структурной динамикой КФС на различных этапах её жизненного цикла.....	59
1.6. Общая формальная постановка проблемы управления структурной динамикой КФС как обобщенной динамической системой .....	64
1.7. Выводы.....	68
<b>2. Комплекс моделей для решения задач синтеза технологий и программ управления КФС .....</b>	<b>71</b>
2.1. Комплекс логико-динамических моделей управления структурной динамикой КФС....	71
2.2. Обобщённая детерминированная логико-динамическая модель управления структурной динамикой КФС .....	103
2.3. Анализ возможных вариантов учёта факторов неопределённости в моделях управления структурной динамикой КФС .....	109
2.4. Выводы.....	110
<b>3. Методы и алгоритмы решения задач выбора оптимальных технологий и программ управления структурной динамикой КФС .....</b>	<b>112</b>
3.1. Методы и алгоритмы решения задач выбора оптимальных технологий и программ управления структурной динамикой КФС в детерминированных условиях.....	112
3.2. Комбинированный метод и алгоритм решения задачи выбора оптимальных технологий и программ управления структурной динамикой КФС в детерминированных условиях .....	121
3.3. Содержание и особенности реализации основных этапов решения задач синтеза технологий и комплексного планирования функционирования системы управления КФС.....	125
3.4. Выводы.....	156

<b>4. Разработка архитектуры, инструментальных средств и программного обеспечения синтеза технологий и комплексных планов функционирования КФС .....</b>	<b>159</b>
4.1. Многокритериальное оценивание, анализ и выбор базовой архитектуры информационной платформы .....	159
4.2. Состав и структура разработанного аналитико-имитационного программного комплекса синтеза технологии управления киберфизической системой.....	166
4.3. Разработка новых и модификация существующих инструментальных средств автоматизации решения задач синтеза технологий и программ управления КФС .....	186
4.4. Выводы.....	197
<b>5. Математическое и программное обеспечение решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования сложных объектов .....</b>	<b>199</b>
5.1. Решение задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования судостроительного предприятия .....	199
5.2. Математическое и программное обеспечение решения задач синтеза планов функционирования автоматизированных систем управления космическими аппаратами (АСУ КА) .....	235
5.3. Математическое и программное обеспечение решения задач управления информационными процессами в системе прогнозирования речных наводнений .....	266
5.4. Выводы.....	274
<b>Заключение .....</b>	<b>277</b>
<b>Список сокращений.....</b>	<b>281</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>285</b>
<b>Приложения .....</b>	<b>304</b>

## Введение

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время информация и знания всё в большей мере становятся стратегическим ресурсом общества, его движущей производительной силой. На смену индустриальному этапу развития общества пришла новая эволюционная фаза, фаза информатизации и соответствующая общественно-экономическая формация – *информационное общество*, при котором наиболее эффективное и динамичное его развитие возможно на основе максимально полного использования имеющихся информационных ресурсов и средств их обработки, составляющих основу соответствующих информационных пространств. *Главным ресурсом* ускоренного развития современного информационного общества становятся знания, главным механизмом развития – цифровая экономика, основанная на знаниях. *Главными технологиями* цифровой экономики становятся новые информационные и коммуникационные технологии (ИКТ), которые уже фактически являются технологиями общего назначения также как технологии производства тепла и электроэнергии. В новых условиях значительно возрастает значимость информационных процессов, обеспечивающих материальное производство. В диссертационной работе под информационным процессом, согласно ГОСТ Р 53114-2008, понимается процесс создания, сбора, обработки, накопления, хранения, поиска, распространения и использования информации.

*Главной компонентой* цифрового производства и в целом цифровой экономики становятся разнообразные классы *киберфизических систем (КФС)*. В перспективных КФС наряду с функциями позиционирования, контроля и диагностики также будут 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. Производственные КФС включают в себя интеллектуальные производственные мощности и складские системы, которые способны взаимодействовать в электронном виде и за счёт этого могут быть интегрированы на основе информационно-коммуникационных технологий на протяжении всего производственного процесса от размещения заказа до производства, маркетинга, исходящей логистики. Указанные возможности открывают широчайшие перспективы по автоматизации и интеллектуализации не только самого цифрового производства продукции, но и её обслуживания и эксплуатации во время послепродажного функционирования. Ключевым элементом предлагаемого электронного обслуживания (e-maintenance) будет являться базирующееся на веб-технологиях дистанционное администрирование, мониторинг, тестирование, диагностика, прогнозирование состояния эксплуатируемых изделий, реконфигурация их структур, в случае возникновения аварийных и нештатных ситуаций и отсутствии необходимых резервов.

Особый класс КФС представлен формируемым в настоящее время понятием промышленного интернета, включающим интеллектуальные сетевые объекты, облачные (cloud), граничные (edge) или туманные (fog) вычислительные платформы, обеспечивающие сбор, анализ, обмен данными реальном времени в промышленной среде для повышения производительности труда, уменьшения себестоимости производимой продукции и сокращения расходов ресурсов. Проведенный анализ основных тенденций, связанных с созданием и развитием *промышленного интернета*, показал, что его основное предназначение связано с реализацией перспективных технологий, способствующих широкомасштабному развитию клиент-ориентированных, мелкосерийных и гибких производств, главным отличием которых от крупных поточных линий является непостоянство (нестационарность) производственных процессов, вместе с ними и характеристик соответствующих информационных потоков, а также вычислительных процессов. Так, например, становится возможным перенос ряда функций обработки данных ближе к месту их возникновения (к границе с физическим миром), что позволяет снизить сетевые задержки и нагрузки на каналы связи, а также снизить вычислительную нагрузку на ресурсы облачных вычислений. Но при этом возникают проблемы, вызванные низкой производительностью таких «умных» устройств и их энергопотреблением при автономной работе. Таким образом, для эффективного управления описанным выше типом производства необходимо создать новую архитектуру, модели, методы, алгоритмы и программные комплексы управления соответствующей КФС.

Понятие «киберфизическая система» активно стало использоваться в рамках проекта немецкого правительства Industry 4.0 по компьютеризации промышленности («Четвёртая промышленная революция»). В то же время, американская компания General Electric публично выступила с широкой инициативой, ориентированной на Интернет вещей. Стратегия General Electric «Промышленный Интернет» находит применение в самых разных областях, в том числе, в промышленном производстве. Анализ основополагающих документов по представленным понятиям [1, 2] позволяет сделать вывод, что с точки зрения задач, решаемых в данной диссертационной работе, понятие КФС в широком смысле (как системы взаимодействующих чувствительных и исполнительных устройств, средств передачи, обработки и хранения данных) и понятие промышленного интернета можно считать тождественными.

Для организации такой распределенной обработки данных в промышленном интернете необходимо осуществлять динамическое ситуационное распределение вычислительных задач между встроенными системами, средствами связи и облачными вычислительными ресурсами. Такой подход получил название «*туманные вычисления*» (fog computing). При этом анализ

современной отечественной и зарубежной литературы показал, что, к сожалению, как задачи синтеза технологий, так и задачи синтеза планов управления информационными процессами в промышленном интернете в явном виде не упоминаются (за редким исключением), и, тем более, современными технологическими и техническими методами не решаются. Данный пробел в проектировании и эксплуатации промышленного интернета традиционно объясняется сложностью указанной проблемы, большой размерностью соответствующих задач, большими затратами времени при попытках их строго решения, что приводит на практике к использованию различных эвристических методов и алгоритмов.

Указанные обстоятельства объясняют особую актуальность, а также научную и практическую значимость формальной постановки и решения проблемы синтеза технологий и программ управления информационными процессами промышленного интернета для получения эталонных (наилучших) решений, относительно которых уже можно будет вводить обоснованно те или иные эвристики, исходя из практических соображений.

Таким образом, в современных условиях существует настоятельная необходимость в теоретическом обосновании и практической реализации математического и программного обеспечения синтеза технологий и комплексных планов (программ) управления информационными процессами в промышленном интернете, позволяющих объединить существующие технологии и системы организации облачных вычислений с технологиями и системами граничных и туманных вычислений и на этой основе повысить эффективность промышленного производства за счёт улучшения производительности труда.

Проведенный анализ показывает, что данная проблема с формальной точки зрения относится к проблеме многокритериального динамического структурно-функционального синтеза сложных организационно-технических объектов, которым и является промышленный интернет.

Основное противоречие, возникающее при решении рассматриваемого класса задач, заключается в том, что для нахождения оптимальных планов управления информационными процессами в промышленном интернете необходимо иметь сведения о тех функциях (операциях), которые должны быть реализованы в рамках указанных процессов [3]. Но распределение функций и операций по подсистемам и узлам промышленного интернета зависит от структуры и их параметров. При этом важно учитывать, что характеристики узлов и подсистем, а также каналов связи, могут изменяться как из-за внутренних причин, так и по действием внешней среды.

Решаемая в диссертации **научная проблема** состоит 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.

Данная прикладная теория включает в себя концепции, принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы решения задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете, а также научные основы разработки и реализации на практике соответствующего программного и информационного обеспечения решения перечисленных задач.

**Степень разработанности темы.** К настоящему времени рассматриваемый в диссертации класс задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете изучен недостаточно глубоко. Научные и научно-практические результаты отдельных направлений отражены в следующих публикациях. Решение задач синтеза технической структуры сложных технических объектов (первое направление) представлены в работах Цвиркуна А.Д. [59, 87, 88], Моисеева Н.Н. [76], Месаровича М., Мако Д. и Такахары Я. [60, 61]. Решение задач синтеза функциональной структуры (программ управления) сложных технических объектов при известной технической структуре (второе направление) изложено в трудах Атанса М. и Фалба П. [66], Заде Л. [69], Акоффа Р.Л. [64], Брайсона А. и Хо-Ю-Ши [67], Беллмана Р. [71, 72], Понтрягина Л. и Болтянского В. [75], а также Моисеева Н.Н. [76]. Первые значимые результаты в направлении синтеза программ создания и развития сложных технических систем без этапа поддержки унаследованных систем (третье направление) были получены в работах: Добановского С.А. и Озерянного Н.А. [58], Рингланда Дж. [84], Кларка Е.М. и Николаона К.Н. [86], Ранделя Б. [86]. Четвёртое направление исследований задач структурно-функционального синтеза связано с решением задачи параллельного (одновременного) синтеза технической и функциональной структур сложных технических объектов описано в публикациях Калинина В.Н., Резникова Б.А., Варакина Е.И. [146], Зимины И.Н. и Иванилова Ю.П. [147], Клира Дж. [52], Скурихина В.И. [158, 159], Юсупова Р.М., Соколова Б.В., Охтилева М.Ю., Цивирко Е.Г. [6, 57].

Проведенный анализ показывает, что четвертое направление исследований в наибольшей степени соответствует решаемой в диссертации проблеме. Более того, как следует из её содержания, важное место в ней наряду с задачами синтеза технологий отводится и

задачам синтеза программ управления информационными процессами (или, по-другому, задачам комплексного планирования) в промышленном интернете вещей. Важность и актуальность указанных задач планирования объясняется тем, что оптимальное планирование функционирования основных элементов и подсистем промышленного интернета позволяет повысить его интегральную пропускную способность, снизить инерционность контура управления, а также уменьшить вероятность возникновения пиковых нагрузок в его вычислительных узлах и каналах связи. Вместе с тем повышается обоснованность решений о распределении ресурсов промышленного интернета за счёт существенного увеличения числа вариантов планов при проведении их многокритериального оценивания.

К настоящему времени накоплен значительный опыт в решении частных задач автоматизации процессов планирования информационных процессов, обеспечивающих функционирование отдельных элементов и подсистем современных территориально-распределенных производственных комплексов, производящих различного рода изделия и услуги [40, 41]. К таким задачам планирования можно отнести задачи долгосрочного и оперативного планирования работы информационно-вычислительных ресурсов [42], задачи планирования работы телекоммуникационных сетей [43], задачи планирования работы различных классов производственного оборудования [44], задачи планирования измерительных операций [45], на основе которых решается общая задача мониторинга состояния физических объектов и процессов. 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, на повышение уровня их целевых и информационно-технологических возможностей, а также устойчивости и робастности управления [11].

Анализ показывает, что наибольший эффект при автоматизации решения задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете может быть достигнут только при комплексном планировании работы всех его элементов и подсистем, когда одновременно осуществляется как синтез технологий их функционирования, так и синтез планов выполнения целевых, обеспечивающих и вспомогательных операций, а также распределения соответствующих складываемых и нескладываемых ресурсов, обеспечивающих в целом повышение производительности труда, выполняемого с использованием аппаратно-программных средств промышленного интернета.



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

В связи со сказанным для решения рассматриваемой в диссертации научной проблемы и достижения поставленной цели исследования необходимо было решить 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.

С учетом вышеизложенного **основным объектом** исследования в диссертационной работе являются информационные процессы в КФС и в целом в промышленном интернете, а также системы и технологии управления ими.

В свою очередь 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.

Все перечисленные задачи в полном объеме были решены в ходе диссертационных исследований. **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 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 расширен новыми сущностями, соответствующими предложенным в диссертации вариантам формального логико-динамического описания процессов функционирования КФС. Это позволило, находясь в рамках существующих международных стандартов, произвести отдельное 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 отдельного 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, при которых целесообразно использовать на практике разработанное модельно-алгоритмическое и программное обеспечение решения задач синтеза технологий и оптимальных планов управления информационными процессами в КФС и в целом 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 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 КФС и в целом 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 20%- 40% по сравнению с показателями, полученными при использовании традиционных эвристических методов обеспечения устойчивости и робастности планов функционирования КФС.

**Методология и 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.

**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 отдельного решения задач синтеза технологий и планов управления информационными процессами в промышленном интернете.
3. Комбинированные методы и алгоритмы совместного и отдельного 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: Международная научно-практическая конференция «Логистика: современные тенденции развития» (Санкт-Петербург, 2012), 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), Шестая международная конференция «Управление развитие крупномасштабных систем MLSD'2012» (Москва, 2012), Европейская конференция по имитационному моделированию ЕСMS, (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 ИЗМ (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).

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.

**Результаты исследований реализованы в семи организациях:**

1. Акционерное общество «Центр технологии судостроения и судоремонта»: внедрены методы и алгоритмы оценивания выполнимости, робастности и динамической устойчивости производственных программ судостроительного предприятия.
2. Филиал акционерного общества «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» – Научно-исследовательский институт космических систем имени А.А. Максимова: разработано общесистемное программное обеспечение (прототип сервисной шины) и специальное программно-математическое обеспечение для 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.
3. Санкт-Петербургское государственное унитарное предприятие «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.



4. Федеральное государственное унитарное предприятие «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.
5. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН): грант РФФИ № 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».
6. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет»: результаты настоящей диссертационной работы (методологические и методические основы гарантированного проактивного управления критическими инфраструктурами в кризисных ситуациях, в том числе, метод и алгоритм управления структурной динамикой сложных организационно-технических объектов) были реализованы 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».
7. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»: 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)».

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

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, проведён анализ исследуемой научной проблемы, определена степень её разработанности, описана методология и методы диссертационного исследования, определены цель и задачи диссертационного исследования, а также обоснован подход к её решению, раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов, приведены сведения об их степени достоверности и апробации, перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведён анализ основных тенденций, связанных с созданием и развитием киберфизических систем и промышленного интернета. Обоснована необходимость создания новой архитектуры, моделей, методов, алгоритмов и программных комплексов управления киберфизическими системами на основе динамического ситуационного распределения вычислительных задач между встроенными системами, средствами связи и облачными вычислительными ресурсами. Приведено обобщенное формальное описание проблемы управления структурной динамикой киберфизических систем, и конкретного класса задач синтеза технологий и программ управления информационными процессами промышленного интернета. Введены понятия комплексного моделирования и управления киберфизическими системами. Сформулированы требования, предъявляемые к облику создаваемого математического и программного обеспечения решения задач синтеза технологий и программ управления информационными процессами промышленного интернета.

**Во второй главе** дано описание разработанного полимодельного комплекса, состоящего из конкретных аналитико-имитационных логико-динамических моделей, описывающих различные аспекты управляемой структурной динамики КФС и в целом промышленного интернета, который удалось представить в виде многоуровневого альтернативного динамического системного графа с перестраиваемой структурой. Предложен способ учёта базовых логических функций и соответствующих ограничений с возможностью сохранения синтезируемых программных управлений КФС в классе кусочно-непрерывных функций. Показано, что с использованием одних и тех же математических структур можно формально описать как задачи комплексного моделирования процессов управления функционированием КФС, так и задачи планирования (перепланирования) их действий. Продемонстрирован способ учёта факторов неопределенности с использованием аналитико-имитационного моделирования возможных сценариев реализаций программ проактивного управления КФС и на основе построения и анализа аппроксимированных областей достижимости в пространстве критериальных функций и интервально заданных возмущающих воздействий.

**В третьей главе** изложен способ преобразования исходной дискретной задачи управления КФС в задачу неклассического вариационного исчисления, которую с помощью метода локальных сечений В.Г. Болтянского (разновидность реализации принципа максимума Л.С. Понтрягина для задач оптимального управления со смешанными ограничениями) удаётся свести к нелинейной краевой задаче. С учётом этого далее представлены разработанные комбинированные методы и алгоритмы выбора оптимальных программных управлений элементами и подсистемами КФС, а также оценки их временной и ёмкостной сложности. На основании анализа проведенных исследований показана необходимость учёта факторов неопределённости посредством структурной и параметрической адаптации моделей к прогнозируемым состояниям объекта управления и среды в рамках соответствующей имитационной системы. Предложена многоэтапная процедура решения задач управления информационными процессами в КФС и в целом в промышленном интернете.

**В четвертой главе** описана процедура обоснованного выбора архитектуры разработанного программного комплекса на основе комбинированного метода многокритериального принятия решений. Приведены основные характеристики разработанных модулей программного комплекса: модуль одновременного синтеза технологии управления КФС, аналитический модуль учёта факторов неопределённости, имитационный модуль синтеза технических характеристик узлов КФС. Обоснована необходимость расширения стандарта описания модели информационного процесса для соответствия его концептам логико-динамических моделей. Определено место встраивания разработанного программного комплекса в общую структуру промышленного интернета для успешной реализации им требуемых функций.

**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 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.

**В заключении** сформулированы теоретические и практические положения, достигнутые автором диссертационного исследования.

**В Приложениях** приведены пояснения к некоторым особенностям реализации программного комплекса синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете.

# **1. Системный анализ и формализация проблемы синтеза технологий и программ управления киберфизическими системами для повышения эффективности промышленного интернета**

## **1.1. Общая характеристика и анализ современных тенденций в области создания и использования КФС для организации процессов глобально распределенной обработки, анализа и использования данных, поступающих от сложных объектов**

### **1.1.1. Анализ состояния и тенденций развития в области автоматизации процессов глобально распределенной обработки, анализа и использования данных и информации, поступающих от сложных объектов в промышленном интернете**

Направления эволюционного развития АСУ промышленным предприятием всегда определялись тенденциями развития соответствующих информационных и телекоммуникационных технологий и систем, создающих материальную основу для реализации существующих и перспективных технологий автоматизированного управления. Принято выделять четыре основных этапа их эволюционного развития [3].

В середине 60-х – конце 70 годов XX века в СССР на первом этапе создания АСУ промышленными предприятиями на базе ЭВМ II поколения (М-20, М-220М, М-222, Минск 22, Минск 32, СМ-4) в организациях, занимающихся производством продукции (товаров и услуг) в различных предметных областях, проводилась автоматизация лишь отдельных функций информационного обеспечения и управления производственной деятельностью. К таким функциям, в первую очередь, относились функции сбора, обработки, хранения, отображения и анализа отдельных видов производственно-экономической информации. Предпринимались первые попытки интеграции различных информационных технологий в рамках соответствующих АСУ технологическими процессами (ТП), АСУ производственными процессами (ПП) [6].

С 80-х до начала 90-х годов на втором этапе автоматизации управления промышленными предприятиями сначала в СССР, а затем уже в РФ проводились работы по унификации процессов использования информационных технологий на основе широкого внедрения типовых модулей автоматизации. Аналогичные работы по автоматизации производственных процессов проводились за рубежом [4]. Также в этот период времени начинают проектироваться и реализовываться, во-первых, технологии баз данных,

позволяющие уйти от обособленных массивов данных к централизованным банкам и базам данных, и, во-вторых, появляются первые образцы систем автоматизации проектирования, автоматизированных систем обмена данными, которые легли в основу современных телекоммуникационных сетей. Указанные сети позволили приступить к объединению территориально-распределенных информационно-вычислительных ресурсов АСУ предприятием (АСУП) [6].

На третьем этапе (90-е годы XX века – 10-е годы XXI века) в России происходит эволюционное комплексирование и интеграция информационных ресурсов и технологий, предлагаемых как отечественными, так и зарубежными фирмами. Информационные технологии, поддерживающие функционирование распределенных баз и банков данных, а также протоколы таких локальных и глобальных телекоммуникационных сетей, как, интранет и интернет, создают материальную основу для нового уровня интеграции различных классов АСУ промышленными предприятиями [6].

#### 1.1.2. Киберфизические системы как базовые элементы архитектур существующих и перспективных средств автоматизации управления сложными объектами

Современный этап развития АСУ промышленными предприятиями характеризуется массовым внедрением в производство киберфизических систем, представляющих собой дальнейшее развитие встроенных систем, и условно именуется Четвёртой промышленной революцией. В Германии она была названа проектом Индустрии 4.0 [5]. Его реализация на практике позволяет уже в настоящее время обеспечить новый уровень эффективности производства и дополнительный доход за счет использования цифровых технологий, формирования непосредственного сетевого взаимодействия поставщиков и партнеров, а также применения принципиально новых производственных и финансовых бизнес-моделей.

Необходимо отметить, что потоки данных в АСУП на первом этапе их создания были минимальными, и поэтому проблема управления ими отдельно не рассматривалась. Дальнейшее развитие систем управления предприятием совпало с прорывом в области повышения производительности функционирования аппаратного обеспечения АСУП. По этой причине проблема увеличения объёмов данных и вычислительной сложности в задачах управления производством решалась в большинстве случаев экстенсивно, путем наращивания мощностей аппаратных (вычислительных и телекоммуникационных) средств.

В современных условиях из-за насыщения мирового рынка всеми видами продукции, а также всеобщей доступности высоких производственных и информационных технологий, на

первый план конкурентной борьбы выдвигается фактор времени. Выигрывает только тот, кто сможет успешно синхронизировать в реальном масштабе времени бизнес-процессы и производство [6]. Но большое количество учитываемых параметров и применение сложных вычислительных алгоритмов не только предъявляют новые высокие требования к вычислительным ресурсам, но и ставят задачу организации (планирования) вычислений в информационной системе.

Рассмотренные выше существующие системы управления предприятиями в составе АСУП, АСУ ПП и АСУ ТП (за рубежом им соответствуют – ERP, MES и SCADA) обеспечивают обработку больших объёмов данных на основе выполнения множества ресурсоёмких вычислений на своих ограниченных аппаратно-программных ресурсах. При этом их работа в режиме реального времени, в том числе и жёсткого, может в этом случае обеспечиваться только за счёт эффективной организации вычислительного процесса. Следует отметить, что на потоковом производстве, как правило, заранее известны объёмы данных и моменты времени их поступления на вход ИС, обеспечивающей работу промышленного предприятия, известно время их обработки, заранее сформированы ситуационные планы действий в случае возникновения расчётных нештатных ситуаций. При такой постановке задач планирования вычислений информационной системы (ИС) можно на этапах создания или модернизации производства так сконфигурировать ИС и соответствующие вычислительные процессы, а также синтезировать эффективное расписание работы ресурсов ИС, чтобы, во-первых, обеспечить ритмичность и устойчивость производственных процессов, и, во-вторых, сбалансированность использования вычислительных устройств и телекоммуникационных сетей.

### 1.1.3. Промышленный интернет вещей

Ситуация стала стремительно меняться с появлением современных недорогих вычислительных устройств и сенсоров. Микроэлектронные устройства серийного производства способны взаимодействовать с физическим миром, выполнять вычисления и обмениваться информацией по стандартным интернет-протоколам. Их распространение изменило привычный облик ИС за счет тесной интеграции вычислительных и физических процессов, сформировав информационно-технологическую концепцию киберфизических систем. При этом одним из наиболее цитируемых определений КФС является следующее определение. КФС – это централизованная или распределённая система, состоящая из взаимодействующих физических и вычислительных устройств, предоставляющих комбинацию

чувствительных, исполнительных, вычислительных и сетевых функций, и влияющая на объекты реального мира через физические процессы [8].

КФС включают «граничные» устройства, то есть находящиеся на границе физического и кибернетического мира. В физическом мире протекают все физические процессы реального объекта. В кибернетическом мире происходит абстрагирование от реального объекта, и все соответствующие сложные физические процессы представляются в виде математических, логико-алгебраических, логико-лингвистических моделей и их комбинаций с различным уровнем детализации. Также все значимые параметры физического объекта становятся абстрактными параметрами указанных моделей. В дальнейшем в диссертационной работе КФС будем рассматривать в широком смысле, как систему взаимодействующих чувствительных и исполнительных устройств, средств передачи, обработки и хранения данных.

Основой для развития промышленных информационно-управляющих систем служит концепция промышленного интернета (Industrial Internet of Things, IIoT). При отсутствии устоявшейся терминологии, можно сформировать из современных публикаций по данной теме следующее определение промышленного интернета: это система, включающая интеллектуальные сетевые объекты, граничные киберфизические устройства (edge), облачные (cloud) или туманные (fog) вычислительные платформы, обеспечивающие сбор, анализ, обмен данными реальном времени в промышленной среде для повышения производительности труда, уменьшения себестоимости производимой продукции и сокращения расходов ресурсов [9]. В разрабатываемом в настоящее время предварительном национальном стандарте Российской Федерации «Информационные технологии. Промышленный интернет вещей. Термины и определения» приводится другое определение: интернет вещей, машин, компьютеров и людей, обеспечивающий интеллектуальные производственные операции с использованием расширенной аналитики данных для качественно новых результатов бизнеса. На данном этапе понимания указанных терминов с позиции рассматриваемой в диссертации проблемы можно условиться о тождественности киберфизической системы и промышленного интернета вещей.

Кроме технических и технологических изменений новая концепция промышленного интернета способствовала развитию клиент-ориентированного, мелкосерийного и гибкого производства. Главным отличием указанных производств от крупных поточных линий является непостоянство (нестационарность) производственного процесса, а вместе с ним и характеристик соответствующих информационных потоков, вычислительных процессов. Для того, чтобы сохранить возможность эффективно управлять таким производством, необходимо создать новую архитектуру, модели, методы и алгоритмы управления распределёнными КФС, объединёнными в промышленный интернет.

В настоящее время в отличие от локальных центров обработки данных, традиционно используемых на промышленных предприятиях с АСУП (ERP), АСУ ПП (MES) и АСУ ТП (SCADA), основные вычислительные ресурсы предприятий формируются уже в рамках промышленного интернета (предприятий нового типа) как на базе облачных (cloud) технологий, так и других парадигм построения систем обработки данных (например, граничные и туманные вычисления, о которых речь пойдет ниже) (см. рис. 1).

КФС систему принято представлять в виде пяти уровней (распространённая модель «5С») [10]: уровень умных подключений; уровень преобразования данных в информацию; кибернетический уровень; когнитивный уровень; конфигурационный уровень.

На уровне подключений, как это было прежде в SCADA, выполняется сбор «сырых» данных от сенсоров. Но на следующих уровнях КФС появляется возможность не просто передавать этот поток данных в MES, а выполнять над ним определённые действия: агрегировать для получения обобщённого состояния физического устройства, использовать для принятия решения о незамедлительном действии без передачи на верхний уровень, моделировать и прогнозировать дальнейшее поведение физического объекта, а также планировать и реализовывать управляющие воздействия на физический процесс. То есть, при использовании КФС появляется новый массив (пул) вычислительных ресурсов, способный в определённых условиях выполнять некоторые функции управления верхнего уровня (уровня облачных вычислений).

Таким образом, перенос ряда функций обработки данных на границу КФС с физическим миром позволяет снизить сетевые задержки и нагрузки на каналы связи, а также снизить вычислительную нагрузку на ресурсы облачных вычислений. Перенос вычислений ближе к источнику получения данных позволяет проводить «на месте» до 90% всей требуемой их обработки [11]. При этом сохраняется возможность часть данных отправлять в облако для глубокого изучения. Однако существует опасность перегрузки устройства вычислениями и данными, а также нежелательное высокое потребление энергии автономными беспроводными устройствами.

В отличие от интернета вещей, в промышленном интернете порядок проведения вычислений и параметры вычислительных операций диктуются самой технологией (упорядоченностью) производственного процесса. Появляется множество альтернативных способов организации вычислительного процесса, сопровождающего и обеспечивающего необходимой информацией производство. Каждый способ и соответствующий ему план вычислений может быть оценён с использованием таких критериальных функций, как скорость (интенсивность) выполнения операций и работ, объем потребляемой энергии, показатель



сбалансированности загрузки телекоммуникационных каналов, показатели устойчивости и робастности плана и др.

В условиях гибкого, мелкосерийного и клиент-ориентированного производства наряду с регулярным планированием самого производственного процесса необходимо проактивно управлять сопутствующими вычислениями, то есть осуществлять обоснованный выбор способа их проведения и планировать вычислительный процесс с учетом возможных вариантов изменения будущей обстановки как для КФС, так и для самих производственных процессов [12].

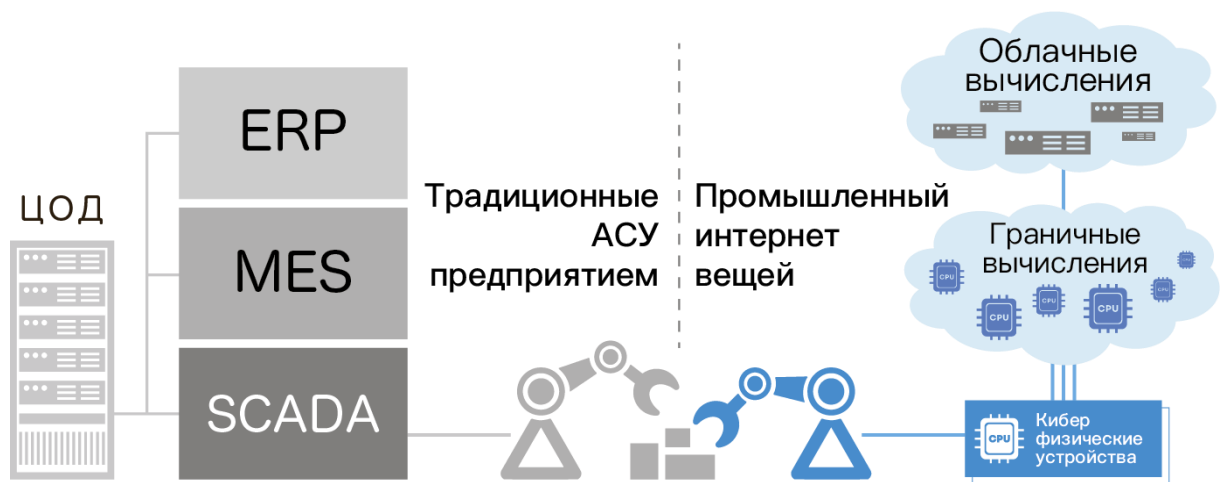


Рисунок 1. Архитектура АСУ предприятием разных поколений

#### 1.1.4. Место и роль задач синтеза технологий и программ управления КФС в общей архитектуре промышленного интернета

Для понимания современного состояния исследований в области создания архитектур промышленного интернета целесообразно рассмотреть документ, разработанный Консорциумом промышленного интернета в 2019 году – «Эталонная архитектура промышленного интернета».

Данный документ предоставляет рекомендации для архитекторов систем, бизнес-лидеров, разработчиков и пользователей на всех уровнях для согласования их усилий по созданию систем промышленного интернета и объединению производственных и информационных технологий для достижения существенных экономических преимуществ. Практическую значимость документа подчёркивает состав авторов из таких организаций, как

Toshiba, IBM, General Electric, SAP, Fujitsu, Oracle и ряда других, а также тот факт, что с 2015 года вышло уже 9 редакций документа.

Эталонная архитектура описывается с четырёх точек зрения (уровней): извлечения прибыли (бизнеса), использования, функционирования и реализации.

*На уровне извлечения прибыли* важной функцией с точки зрения проблем управления производственными процессами является формирование критериев качества функционирования, а также формулировка соответствующих показателей качества, которые в дальнейшем должны учитываться при организации работы всего предприятия на основе промышленного интернета. *На уровне использования* формируются представления о том, как люди будут принимать участие в технологических и управленческих процессах промышленного предприятия.

Следующие два уровня представляют наибольший интерес с точки зрения методов, рассматриваемых в настоящей диссертационной работе. Уровень функционирования промышленного интернета сконцентрирован на функциональных компонентах, их взаимосвязи, а также их связи со внешними системами. Фактическое исполнение этих компонентов описывается на уровне реализации.

*На функциональном уровне* проблемы построения промышленного интернета делятся на пять областей:

- системы управления технологическими процессами;
- системы управления информационными процессами;
- системы обработки данных и информации;
- прикладные системы;
- системы управления предприятием.

К настоящему времени в мировой практике достигнуты значительные результаты в четырёх из этих направлений. Автоматизированные системы управления технологическими процессами выполняют короткий цикл управления, заключающийся в получении данных о физическом мире с помощью сенсоров, применении правил и операций их обработки и формировании управления для воздействия на физический мир. Такие системы всегда располагаются максимально близко к физическим производственным процессам, вследствие чего могут быть значительно территориально распределены и не согласованы на уровне целей функционирования всего предприятия (уровень бизнеса).

Системы обработки данных и информации являются связующим звеном между всеми уровнями промышленного интернета. Наиболее кратко можно охарактеризовать цель этой

системы как совокупность операций обработки данных, направленных на согласование и обеспечения их высокого качества для всех элементов промышленного интернета.

Прикладные системы функционируют на высоком уровне, доводя до остальных уровней результаты работы систем управления предприятием.

Последняя, но не менее важная область функционального уровня промышленного интернета – системы управления информационными процессами. В их задачи входит обеспечение работоспособности, мониторинг, управление и оптимизация функционирования распределённых автоматизированных систем управления технологическими процессами. То есть, если традиционные системы управления производством фокусируются на конкретных технологических процессах одного предприятия, то системы управления информационными процессами в промышленном интернете функционируют уровнем выше, организуя совместную работу различных участников производства от заказчиков до множества совместных предприятий. Ниже представлено краткое описание функций систем управления информационными процессами.

Функция подготовки и развертывания сервисов выполняет настройку, регистрацию и отслеживание работоспособности сервисов, а также их вывода из эксплуатации. Эти функции должны обеспечивать масштабирование, а также удаленное и безопасное взаимодействие сервисов в оперативном режиме в условиях жестких динамических ограничений и возмущающих воздействий, характерных для промышленного контекста.

Функция координации работы локальных (унаследованных) автоматизированных систем управления производством состоит в работе с набором программно-аппаратных адаптеров, позволяющих доводить управляющие воздействия верхнего уровня до систем управления производством, и, наоборот, получать от них обратную связь.

Функция мониторинга и диагностики позволяет обнаруживать и прогнозировать возникновение проблем в системах промышленного интернета, диагностировать реальную причину проблемы и предупреждать об отклонениях в их работе.

Функция прогнозирования состояния ресурсов позволяет, опираясь на модели их функционирования и накопленные данные, выявлять потенциальные проблемы до их возникновения и предоставлять рекомендации по их устранению. Данная функция является важной частью управления ресурсами промышленного интернета.

Функция оптимизации предназначена для повышения надежности и производительности предприятия, уменьшения суммарного потребления энергии за счёт рационального использования ресурсов. Эти функции должны быть максимально

автоматизированы для сокращения доли ошибок, связанных с человеческим фактором при работе с большими объёмами данных и информации.

Таким образом, описанные в п. 1.1.3 задачи управления вычислительными процессами занимает своё место в эталонной архитектуре среди оптимизационных функций системы управления информационными процессами на функциональном уровне промышленного интернета (см. рисунок 2).

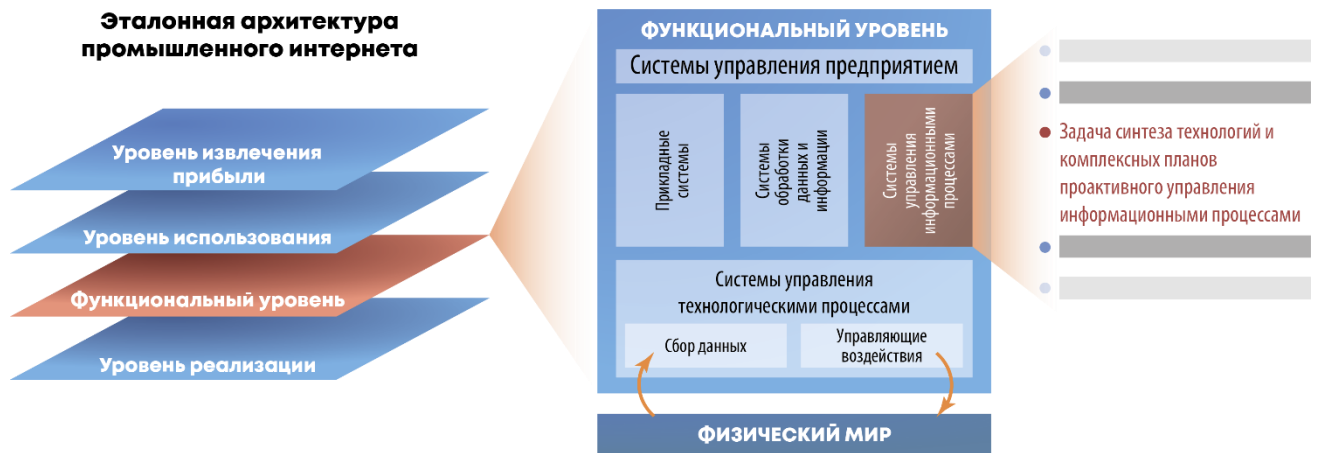


Рисунок 2. Место задач управления информационными процессами в эталонной архитектуре промышленного интернета вещей

Последний (нижний) уровень эталонной архитектуры промышленного интернета представлен *уровнем реализации*, описывающим технические и технологические решения, которые могут быть применены для выполнения функций всех других уровней системы. Далее представлен обзор современных программно-аппаратных решений и технических архитектур на их основе.

В схеме классического интернета вещей (Internet of Things) задействуются три основополагающие технологии: технологии встроенных систем для преобразования параметров физического мира в кибернетический и наоборот, технологии функционирования устройств связи для подключения встроенных систем к сети Интернет, облачные технологии для хранения и обработки информации, а также управления устройствами. Облачные технологии позволяют дополнить КФС расширяемыми хранилищами данных, недорогими вычислительными мощностями, а также предоставляют высокую гибкость инфраструктуры при создании и развитии сложных индустриальных информационных систем. Подобная схема успешно использовалась со времён первого упоминания о ней в 1999 году [13] до настоящего времени.

Проникновение интернета вещей в новые отрасли привело к возникновению ряда новых требований к этой технологии в целом, её архитектуре и практической реализации, а также соответствующих проблем при поиске конкретных путей их выполнения. Большинство возникших проблем можно условно объединить в пять групп [11]:

*Недостаточная пропускная способность каналов связи и, в целом, систем обмена данными:* в последние годы наблюдается экспоненциальный рост объёмов полезных данных, генерируемых встроенными системами.

*Сетевые задержки:* облачные технологии не рассчитаны на работу с системами реального времени.

*Нестабильность связи:* значительная территориальная распределённость облачных технологий и большое количество промежуточных узлов между встроенным устройством и управляющим сервером неизбежно ведёт к возникновению прерываний в канале связи (см. семиуровневые модели и протоколы передачи данных).

*Ресурсные ограничения:* зачастую встроенные системы (киберфизические устройства) функционируют на ограниченных вычислительных ресурсах с автономным источником питания и не способны выполнять сложные вычисления, передавая весь объём «сырых» данных в облачное хранилище.

*Безопасность:* удалённые малые устройства не имеют достаточных механизмов защиты данных и информации, открывая доступ злоумышленникам через них в систему управления.

Для преодоления указанных проблем были предложены новые концепции построения интернета вещей, связанные с территориальным распределением вычислительных мощностей. Основная идея заключалась в приближении управляющих подсистем к местам возникновения данных или к конечному пользователю. Появлялись центры обработки данных рядом с крупными промышленными пользователями интернета вещей или «умными зданиями». Для мобильных пользователей выбирались облачные узлы, наиболее близко расположенные к физическому местонахождению абонента и так далее. Подобные решения объединяют общим названием «граничные вычисления» [14].

Одной из самых наблюдаемых тенденций последних лет в области промышленного интернета и Индустрии 4.0 является растущее значение применения в них современных методов вычислений. В частности, перспективным направлением является распределение вычислительной нагрузки между всеми уровнями интернета вещей: встроенными системами, средствами связи и облачными вычислительными ресурсами. Такой подход получил название «туманные вычисления» (fog computing). Впервые концепция туманных вычислений была

описана компанией Cisco [15]. В отличие от облачных технологий, решающих все задачи на удалённых серверах, и граничных вычислений, делегирующих часть вычислений локальным центрам обработки данных, туманные вычисления представляют собой распределённую иерархическую масштабируемую систему [16].

Для примера можно привести следующее распределение задач в промышленном интернете: простые задачи классификации данных решаются прямо во встроенных системах. Более сложные задачи принятия решений делегируются граничным шлюзам локальной вычислительной сети. Трудоёмкие аналитические задачи с использованием больших объёмов данных решаются в локальном центре обработки данных, а всё взаимодействие со сторонними системами производится в облачных узлах.

Для промышленности туманные вычисления стали основной моделью практического применения интернета вещей. Подтверждением тому является значимое событие 2019 года – объединение Консорциумов промышленного интернета «IIС» и туманных вычислений «OpenFog». По заявлению представителей IIС такое объединение продолжит стимулировать развитие промышленного интернета, включая разработку и продвижение отраслевых руководств и лучших практик для туманных и граничных вычислений. Консорциум OpenFog был учреждён в ноябре 2015 г. компаниями ARM, Cisco, Dell, Intel, Microsoft и Принстонским университетом. Одним из значимых документов, опубликованных Консорциумом, является описание эталонной архитектуры OpenFog – универсальной технологической модели для проектов с применением Интернета вещей (IoT), мобильной связи 5G и приложений искусственного интеллекта (ИИ).

В описании эталонной архитектуры OpenFog [16] приводятся преимущества, которые предоставляют туманные вычисления по сравнению с облачными вычислениями:

- безопасность: удалённые встроенные системы находятся под многоуровневым контролем «соседних» промежуточных устройств, а не единственного сервера в облаке;
- «самосознание»: часть решений может быть принята автономно на различных уровнях иерархии модели туманных вычислений, а не только централизованно;
- гибкость: встроенные системы теперь могут обслуживаться различными организациями самостоятельно, требуется лишь поддерживать открытый программный интерфейс взаимодействия;

- отклик: туманные вычисления создавались для обеспечения работы КФС в режиме реального времени за счёт сокращения сетевых задержек между точкой возникновения данных и местом принятия решений;
- эффективность: улучшение соотношения производительности к стоимости достигается благодаря распределению вычислительной нагрузки по уровням КФС и резкому снижению нагрузки на каналы связи.

### *Элементы архитектуры туманных вычислений*

Вычислительные мощности в туманных вычислениях могут размещаться на трёх уровнях: внутреннем, среднем и внешнем [17]. Уровни именуется относительно так называемого ядра информационной системы, расположенного в облаке.

Внутренний уровень (ближайший к облачным технологиям) образуется территориально распределёнными облачными узлами, имеющими близкое физическое расположение к потребителю услуги. Зачастую эти узлы принадлежат оператору облачного сервиса.

Средний уровень составляют вычислительные мощности организации-потребителя, размещённые в локальной сети. Примером таких устройств могут быть специализированные интернет-шлюзы с поддержкой технологии виртуализации, предоставляющие вычислительные мощности для некоторых сервисов обработки данных. Не исключается возможность использования и других вычислительных устройств внутри сети, поддерживающих технологию виртуализации. Также стоит отметить получающие в последнее время широкое распространение устройства, поддерживающие туманные вычисления, размещаемые в сотовой сети связи.

Внешний уровень заполняют контроллеры сенсоров и исполнительных устройств КФС, встроенные и носимые системы, локальные шлюзы. Из-за существенных ограничений производительности контроллеров они не могут выполнять сложные операции обработки информации. Но они предоставляют возможность обновления своего программного обеспечения по сети, что обеспечивает их так называемым «самосознанием», то есть способностью частично обрабатывать данные от физического мира и принимать некоторые решения автономно (например, сравнение полученных данных с пороговыми значениями и оперативное формирование реактивного управляющего воздействия на физический мир посредством исполнительных устройств – «актуаторов»). Встроенные и носимые системы (типичный пример – смартфон) управляются более производительными процессорами, имеют разнообразные устройства связи и сенсоры. Они являются наиболее эффективными узлами

туманных вычислений по соотношению производительности к стоимости. Локальные шлюзы в интернете вещей зачастую являются не классическими IP-шлюзами, а посредниками между IP-сетью и другими технологиями передачи данных с низким энергопотреблением, например, Bluetooth LE или ZigBee. Такие узлы уже выполняют преобразования данных и могут быть дополнены сервисами их дополнительной обработки.

#### *Программно-аппаратное обеспечение туманных вычислений*

Стремительный рост рынка киберфизических систем ведёт к появлению большого количества устройств, поддерживающих туманные вычисления. Платформы для виртуализации встраиваются производителями в различные коммутаторы и шлюзы, создаются специальные операционные системы для сетевых узлов. Также в данном направлении развиваются и открытые платформы, хотя в настоящий момент их разработка находится на начальной стадии. Фреймворк OpenStack++ ориентирован на создание виртуальных контейнеров на обычных компьютерах с архитектурой «x86» и не нацелены на применение в шлюзах. Эту платформу можно отнести больше к внутреннему уровню туманных вычислений. На среднем уровне возможно применение открытой платформы Apache Edgent, ориентированной на перераспределение потока обработки данных между облачными и граничными узлами КФС. На внешнем уровне туманных вычислений нишу открытых систем занимает сервер интернета вещей «WSO2-IoT Server», связывающий встроенные системы на основе протоколов MQTT и XMPP.

#### *Управление информационными процессами в туманных вычислениях*

Управление информационными процессами проходит три основных фазы жизненного цикла: проектирование, реализация, конфигурирование (плановое изменение) и реконфигурация (изменение в случае возникновения неисправностей).

На этапе проектирования предполагается, что разработчики должны наилучшим образом распределить вычислительные мощности по трём уровням туманных вычислений. Далее необходимо разработать модель вычислительного процесса, задать технологию функционирования всей киберфизической системы.

На этапе реализации разработчикам приходится решать ряд проблем, связанных с высокой гетерогенностью КФС. В основном они вызваны закрытостью платформ различных производителей оборудования при неизбежной необходимости их взаимодействия.

В ходе эксплуатации в силу внешних и внутренних причин возникает объективная необходимость проведения реконфигурации КФС. Её целью является оптимизация всего



вычислительного процесса за счёт планирования функционирования КФС. Возможность реконфигурации обеспечивается технологией виртуализации, позволяющей динамически запускать и останавливать сервисы (вычислительные операции) на всех узлах КФС, а также, что более важно, переносить сервисы с одного узла на другой [18].

Существующие сетевые технологии хост-ориентированы, то есть, нацелены на поиск определённого аппаратного узла сети и доставку ему сообщений, не рассматривая, какие сервисы предоставляет этот узел. В свою очередь, эффективная работа туманных вычислений требует регулярного переноса сервисов с одного хоста на другой. В лучшем случае запрос должен отправляться не хосту, а именно сервису без априорного знания его местонахождения.

### *Техническое обеспечение реконфигурации*

Проблема перехода к сервис-ориентированным сетям на технологическом уровне может решаться с помощью программно-определяемых сетей – Software Defined Networks (SDN). Их основная идея заключается в отделении уровня управления от уровня данных и наличии программного контроллера [19]. Программный контроллер централизованно управляет вычислительной сетью, расширяя возможности её ресурсов и снижая сложность обслуживания и конфигурирования. На уровне управления де-факто используется протокол OpenFlow [20]. Отслеживание изменений в сети происходит с помощью протокола OpenFlow Discovery Protocol (OFDP) [21].

Например, централизованная схема управления сетью позволяет оперативно реагировать на подключение и отключение устройств в сети. Предполагается, что подключенное устройство может быть не только пользовательским терминалом, но и новым узлом с набором сервисов или сетевым коммутационным устройством. При подключении нового устройства сеть незамедлительно реагирует и может перестроиться таким образом, чтобы предоставить как можно более высокий уровень сервиса пользователю.

Изначально SDN использовался для удобного управления коммутационным оборудованием в локальной вычислительной сети, но с развитием идеи граничных вычислений на SDN были возложены функции их оркестровки. Основные отличия архитектуры туманных вычислений от архитектуры обычной локальной сети заключаются в создании пулов сервисов с идентичной функциональностью и наличии жёстких требований по сетевым и вычислительным задержкам. В ответ на это SDN контроллер на основе собранной статистики о загрузке узлов сети и потоках данных может изменить правила маршрутизации и перераспределить потоки данных для балансировки нагрузки всей сети.

Однако существует ряд проблем, которые технология SDN в настоящее время не может решить в полной мере для обеспечения процессов управления, конфигурации и реконфигурации в туманных вычислениях. Одна из них – обнаружение граничных узлов. Несмотря на повсеместное применение и развитие протокола обнаружения узлов OFDP, он имеет недостатки с безопасностью и эффективностью, описанные в работах [22]. Предложенные модификации протокола, такие как sOFDP, устраняют некоторые недостатки, но к настоящему моменту надёжное, безопасное и эффективное обнаружение узлов на внешнем уровне туманных вычислений остаётся нерешённой задачей.

Вторая проблема управления граничными вычислениями – развёртывание сервисов и приложений на устройства внешнего уровня. Эти сервисы должны быть развёрнуты на одном или множестве узлов сети с учётом аппаратных требований самого сервиса и вычислительных возможностей узла. То есть, требуется в близком к реальному времени анализировать производительность имеющихся и обнаруженных узлов, сопоставлять эти данные с требованиями сервисов и выполнять их развёртывание.

Третья проблема тесно связана с предыдущей. В туманных вычислениях для осуществления реконфигурации требуется в режиме близко к реальному времени выполнять миграцию сервисов с одного узла на другой. Сама технология миграции хорошо отлажена в облачных вычислениях для переноса сервисов между однородными высокопроизводительными узлами, соединёнными стабильными скоростными каналами связи. Но в туманных вычислениях ресурсы устройств существенно ограничены, а каналы связи нестабильны не только в смысле пропускной способности, но и топологии самой вычислительной сети.

Последняя из выделенных проблем объединяет все предыдущие – балансировка нагрузки. Для эффективного решения данной проблемы требуется, проводить мониторинг и прогнозирование нагрузки узлов, оперативно или проактивно переносить сервисы с одного узла на другой, выполнять оперативное обнаружение новых узлов и разворачивать на них сервисы и приложения.

Решение пяти указанных проблем лежит в области создания системы управления туманными вычислениями, затрагивающей этапы их проектирования, планирования функционирования и диспетчеризации в реальном времени.

Завершая описание уровня реализации эталонной архитектуры промышленного интернета вещей, следует отметить, что к настоящему моменту разработано большое число технологий и технических средств, каждое из которых с одной стороны, решает определённый класс проблем, а, с другой стороны, поднимает новые вопросы, ставит новые задачи перед

разработчиками, архитекторами и исследователями перспективных методов вычислений в распределённых информационных системах. В четвёртой главе диссертации предпринята попытка обоснованно подойти к выбору базовой архитектуры информационной платформы построения промышленного интернета и предложена конкретная реализация информационной системы и оптимизационных функций системы управления информационными процессами на функциональном уровне промышленного интернета (в терминах эталонной архитектуры) на основе доступных в настоящее время технических решений и подходов.

### *Моделирование туманных вычислений*

Очевидно, что растущая сложность решения задачи управления туманными вычислениями в промышленном интернете требует выхода за пределы только технических подходов и применения современных методов математического моделирования. Несмотря на присутствие в эталонной архитектуре промышленного интернета явного указания на необходимость проведения комплексного моделирования функционирования промышленного интернета и туманных вычислений, в современной литературе этому вопросу уделяется незначительное внимание по сравнению с количеством публикаций, посвящённых техническим решениям.

Наиболее часто встречаются следующие подходы к моделированию туманных вычислений (упорядочено по мере уменьшения количества упоминаний):

- моделирование туманных вычислений с использованием сетей Петри.
- моделирование туманных вычислений с использованием аналитического подхода (например, математического аппарата линейного программирования).
- моделирование туманных вычислений с использованием марковских цепей.
- моделирование туманных вычислений с использованием байесовского подхода.
- моделирование туманных вычислений с использованием нечётко-возможностного подхода.

Рассмотрим далее некоторые примеры применения указанных подходов.

Ранние работы, посвящённые моделированию функционирования информационных систем, использовали в качестве математической основы описания соответствующих информационных процессов сети Петри. Этот математический аппарат применим при расчёте показателей надёжности и производительности информационной системы. Современное применение сетей Петри проиллюстрировано в работах [23, 24], для обоснования

предпочтительности некоторой предлагаемой архитектуры сети сенсоров над классически применяемой архитектурой, а также для оценивания управляемости системы связанных носимых устройств, ориентированных на контроль состояния здоровья человека.

В работе [25] показано применение цепей Маркова для моделирования энергопотребления киберфизической системы, предназначенной для обнаружения столкновений с ограждениями автомагистралей. Эта система состоит из сети беспроводных датчиков и шлюзов, собирающих с них данные для отправки в облако. Каждое состояние цепи Маркова представляет собой состояние системы с соответствующим уровнем потребления энергии. Можно оценить энергопотребление системы, рассчитав вероятность нахождения системы в данном состоянии.

Авторы статьи [26] предлагают байесовскую модель для прогнозирования событий, которые могут произойти в киберфизической системе. Для этого модель рассчитывает вероятность будущих цепочек событий на основе данных о произошедших событиях. В качестве примера приводится прогнозирование задержки вылета рейса из-за проблем с бортовым оборудованием самолёта, и байесовская модель рассчитывает условные вероятности возникновения таких событий.

Пример комбинированного применения онтологии и нечёткой логики для анализа неисправностей в сетях приведён в [27]. В этой работе авторы объединяют онтологию с нечеткой логикой, утверждая, что онтология подходит для описания ошибок и отказов системы, в то время как нечеткая логика является хорошим подходом для их диагностики. Таким образом, этот подход позволяет описать разнородные отказы с точки зрения приложений, устройств и вычислительной сети.

Аналитические модели описывают в явном виде поведение исследуемых информационных систем. Они позволяют рассчитать нагрузку на вычислительные ресурсы, исходя из текущей загрузки системы, типа передаваемой информации и т.д., а также вычислить влияние варьирования параметров аппаратно-программного обеспечения на показатели эффективности работы всей системы.

Например, в [28] авторы предлагают математическую аналитическую модель для изучения и анализа производительности системы, построенной на основе туманных вычислений. Математическая модель позволяет вычислить количество узлов сети, необходимых для соблюдения соглашения об уровне качества для любой нагрузки. Предлагаются показатели производительности, которые включают время отклика системы, долю потерь данных, пропускную способность системы и загрузку центрального процессора узла.

Авторы работы [29] рассматривают модель, в которой для каждого шлюза туманных вычислений задаётся общее количество полученных данных и время, затраченное шлюзом на их обработку. Предложены математические выражения для определения доступного буфера данных устройства и эффективности его использования. При исчерпании доступного объёма памяти (буфера) на шлюзах, данные передаются на более высокие уровни, при этом увеличивая задержку обработки данных. Авторы предлагают оптимизировать эффективность шлюзов за счёт снижения времени отклика для всех шлюзов в системе.

Оригинальный обобщённый показатель эффективности работы системы введены в статье [30] на основе частных энергетических и экономических показателей. Так, на уровне граничных вычислений минимизируется потребление энергии, а на уровне облачных вычислений – стоимость процессорного времени. Такая многокритериальная постановка задачи позволяет обоснованно улучшить распределение вычислительных задач по уровням туманных вычислений.

Ряд работ посвящён теме планирования функционирования системы на основе туманных вычислений. В статье [31] для поиска расписания задаётся множество сервисов, множество аппаратных ресурсов, множество моментов времени, в которые определённые сервисы должны функционировать, а также приоритеты сервисов. Требуется определить моменты времени запуска сервисов на ограниченных вычислительных ресурсах. При такой постановке неизбежно возникновение проблемы большой размерности решаемой задачи, а также остаётся открытым вопрос назначения приоритетов и выбора обязательных моментов времени работы сервисов – предполагается, что эти величины задаются администратором системы.

Подавляющее большинство предлагаемых в современных публикациях методов повышения эффективности функционирования киберфизических систем на основе туманных вычислений являются эвристическими. Только в незначительной части статей рассматриваются вопросы применения методов оптимизации для определения наилучших вариантов функционирования КФС. Исследования в области туманных вычислений всё ещё находятся на начальном этапе. К настоящему моменту времени решены некоторые частные оптимизационные задачи, связанные с отдельными аспектами функционирования КФС, но независимо друг от друга. Большое внимание уделяется критериям и показателям качества функционирования киберфизической системы. Из-за высокой распределённости используемых ресурсов в туманных вычислениях показатели качества, связанные с производительностью системы, зависят не только от производительности ресурсов и времени исполнения операций, но и пропускной способности сети. Кроме быстрого действия на передний план выходит критерий

и показатели энергоэффективности. Причём на каждом уровне архитектуры туманных вычислений электроэнергия должна учитываться по-разному – даже малое сокращение энергопотребления от батареи на уровне конечного устройства имеет гораздо большее значение, чем аналогичная «экономия» в центре обработки данных. Третий из наиболее важных показателей эффективности туманных вычислений – стоимость использования инфраструктуры. В состав показателей стоимости могут входить стоимость электроэнергии, трафика каналов передачи данных, задействованных вычислительных мощностей в облачных узлах и т.д.

Для расчета значений приведённых показателей эффективности туманных вычислений используются различные методики. При этом высокое качество функционирования киберфизической системы должно оцениваться также и по показателям надёжности, конфиденциальности и безопасности. Расчёт соответствующих показателей качества является нетривиальной задачей. Некоторые наработки в этом направлении встречаются в работах [32, 33, 34].

Обобщая встречающиеся в современных публикациях исследования по оптимизации информационных процессов в киберфизических системах и туманных вычислениях, можно провести следующую их классификацию.

Оптимизационные задачи различают по вовлечённости уровней туманных вычислений в реализацию информационных процессов. Так, задачи, ориентированные на повышение энергоэффективности киберфизических систем, решаются на уровне конечных устройств и граничных вычислений [35, 36]. На уровнях граничных и облачных вычислений решаются задачи, связанные с минимизацией сетевых задержек при передаче данных [37], а также задачи снижения стоимости использования инфраструктуры при управлении информационными процессами. Однако примеры решения задач, включающих все три уровня туманных вычислений, практически не встречаются в современных публикациях по причине их большой размерности и сложности реализации оптимизационных процедур при использовании статических моделей функционирования киберфизических систем [38].

В качестве другого признака классификации рассматриваемых оптимизационных задач может быть выбран признак, соответствующий тому или иному этапу жизненного цикла киберфизической системы. На этапе проектирования зачастую отсутствует информация о полном составе и размещении конечных устройств. Вследствие этого целесообразно решать задачи оптимизации показателя стоимости использования инфраструктуры и минимизации значений показателей сетевых задержек на уровнях граничных и облачных вычислений. Для уровня конечных устройств на данном этапе могут быть решены задачи обоснования

требований, предъявляемых к уровню значений показателей их производительности и пропускной способности каналов связи.

В процессе развёртывания системы на реальных аппаратных ресурсах появляется множество дополнительных значений параметров модели киберфизической системы. В данном случае появляется возможность провести более детальное моделирование и оптимизацию функционирования киберфизической системы с учётом новых сведений.

Этап эксплуатации киберфизической системы в большинстве случаев сопровождается её постоянным изменением. Результаты решения оптимизационных задач, полученные на других этапах жизненного цикла, уже не соответствуют реально складывающейся обстановке. Для обеспечения эффективной работы киберфизической системы на этапе функционирования требуется регулярно проводить её целенаправленное конфигурирование и реконфигурацию на основе решения задач управления соответствующими информационными процессами. Вместе с тем, стоит отметить, что на этапе функционирования сам процесс решения задачи оптимизации выполнения информационных процессов требует времени и вычислительных ресурсов и должен быть запланирован наряду с остальными операциями.

Аналогично можно сгруппировать упоминаемые в публикациях подходы к решению указанных задач, базирующиеся на аналитических и численных методах оптимизации, эвристических алгоритмах поиска субоптимальных решений, методах распределённого поиска оптимальных решений, а также комбинированные методы.

Учитывая сложность и гетерогенность туманных вычислений следует отметить важность совместного применения как комплексного моделирования функционирования киберфизических систем с данной архитектурой, так и комбинированных методов решения оптимизационных задач. В данном контексте особое внимание должно уделяться многокритериальной оптимизации. Существующие способы решения многокритериальных задач на основе линейной свёртки частных показателей могут в реальных системах приводить к неэффективным или даже абсурдным результатам с точки зрения их практической реализации. Важно не только использовать более сложные математические способы решения многокритериальных задач, но и применять интерактивные подходы с привлечением экспертов в предметной области.

Большое разнообразие применяемых моделей для решения задач управления операциями и информационными потоками в туманных вычислениях порождается, в том числе, тем, что каждый исследователь старается использовать хорошо знакомые ему модели. Хотя очевидно, что целесообразно было бы осуществлять выбор наиболее предпочтительных с

точки зрения решения конкретных прикладных задач из числа уже существующих моделей, либо обосновано синтезировать новые модели. Поэтому на раннем этапе моделирования туманных вычислений важно привлекать новейшие результаты, полученные в области теории и практики квалиметрии моделей (моделеметрии) [39].

Для этого, в данной диссертационной работе предлагается двухуровневый подход, в ходе реализации которого проводится наряду с оптимизацией процессов функционирования КФС (1-ый уровень) одновременно проводится оптимизация состава и структуры моделей (2-й уровень), используемых на 1-м уровне управления операциями и информационными потоками в туманных вычислениях.

Как видно из приведённых выше результатов анализа текущего состояния исследований проблем моделирования функционирования промышленного интернета, эти проблемы не рассматриваются комплексно на уровне предприятия, задачи синтеза технологий и планов управления информационными процессами в промышленном интернете не упоминаются (за редким исключением), и, тем более, современными технологическими и техническими методами не решаются. Данный пробел в проектировании и эксплуатации промышленного интернета традиционно объясняется сложностью указанной проблемы, большой размерностью соответствующих задач, и, следовательно, их решением с использованием эффективных эвристических алгоритмов. Правда при этом, зачастую, не раскрывается понятие эффективности, так как невозможно рассчитать, насколько результаты применяемых эвристических алгоритмов близки к результатам оптимальных в силу отсутствия решения оптимизационной задачи.

Для удовлетворения возникшей практической задачи оптимизации процессов функционирования промышленного интернета на базе туманных вычислений в диссертационной работе предлагается методы комплексного моделирования и синтеза технологий и планов функционирования промышленного интернета на основе концепции управляемой структурной динамики и логико-динамических моделей.

Говоря в целом об управлении вычислительными и информационными процессами в промышленном интернете, необходимо выделить следующие основные задачи:

1. Расчёт достижимости (выполнимости) поставленных целей по обработке данных и информации о физическом процессе на имеющихся вычислительных мощностях и в заданных временных ограничениях.



2. Синтез технологии организации и выполнения вычислений, а также управление информационными процессами из множества доступных альтернативных путей их реализации.
3. Построение плана вычислительного процесса и плана управления информационными процессами.
4. Контроль реализации плана и мониторинг вычислительного процесса и информационных процессов.
5. Управление реализацией спланированного вычислительного процесса и информационных процессов.

С формальной точки зрения первые три пункта сводятся к задачам теории расписаний. Но существующие классические подходы к решению задач планирования вычислительных процессов напрямую не могут быть применены к процессам промышленного интернета вещей, так как для них должен быть определён конкретный способ проведения вычислений. При этом выбор способа вычислений для конкретных условий обстановки должен быть основан на характеристиках операций, потоков и ресурсов, которые, опять же, зависят от выбираемого способа проведения вычислений.

Для решения отдельных задач управления вычислительными и информационными процессами в промышленном интернете из приведённого выше перечня к настоящему времени разработано достаточно представительное множество моделей, методов и алгоритмов оперативного планирования и диспетчеризации вычислительных процессов [40-45]. Большинство используемых подходов ориентированы на решение задач планирования в отдельных вычислительных элементах и подсистемах ИС предприятия без их согласования и учета взаимного влияния, без учета факторов неопределенности и факторов, связанных с многокритериальной постановкой и решением соответствующих задач оптимального планирования вычислительных процессов, а также без согласованного учета на производственном и вычислительном уровнях предприятия главной цели функционирования промышленного интернета – высококачественного информационного обеспечения синхронизированного во времени и в пространстве выпуска продукции. Более того, задача синтеза способа (технологии) проведения вычислений и задача планирования распределенного в пространстве и во времени вычислительного процесса традиционно рассматриваются отдельно друг от друга [44]. Это существенно сокращает количество анализируемых способов вычислений, приводит к нерациональному расходу вычислительных ресурсов, препятствует получению наилучших решений и приводит к пиковым нагрузкам в промышленном интернете.

Преодоление указанных недостатков становится возможным, согласно работе [46], при более широком взгляде на проблему планирования работы КФС, а именно как на проблему организации в сложной технической системе «целенаправленного и непрерывного процесса согласованного функционирования и взаимодействия различных элементов и подсистем сложной технической системы, определения их состояния в каждый конкретный момент времени, прогнозирования их развития на некоторый период времени в будущем, а также формирование (синтез) и программирование набора их действий и планов, направленных на достижение желаемых результатов». Также в [46] указан ряд основных положений планирования информационных процессов, на основе которых можно сформулировать задачи комплексного планирования информационных процессов в промышленном интернете:

1. Формулирование стоящих перед КФС целей и задач, сроки их достижения.
2. Определение средств достижения целей и ресурсов для реализации планов.
3. Разработка методов распределения ресурсов между задачами КФС.
4. Синтез структуры КФС и способов её функционирования.

Подавляющее большинство исследованных к настоящему моменту времени задач теории расписаний, к числу которых в большинстве случаев относятся все перечисленные выше задачи планирования вычислений в КФС, являются NP-трудными [40]. Классические полиномиальные эвристические алгоритмы планирования расписаний при их использовании на практике применительно к задачам оптимизации вычислительных процессов на производстве также не применимы из-за чрезвычайно большой размерности и ряда особенностей таких задач. Различные метаэвристические подходы, такие, например, как генетические и муравьиные алгоритмы [48, 49], метод имитации отжига [50], базирующиеся на теории расписаний и комбинаторике, позволяют получить допустимый план вычислений, но не предоставляют информации об оценках степени отклонения значений показателей качества конкретного плана от оптимальных [40]. Набирающий популярность метод построения расписаний с помощью программирования в ограничениях также сталкивается с трудно преодолимой вычислительной сложностью и наследует другие недостатки эвристических алгоритмов [51].

## 1.2. Анализ современного состояния исследований проблем управления структурной динамикой КФС

Рассматриваемая в диссертации киберфизическая система (КФС), как типичный представитель класса современных сложных технических объектов, подвержена существенным изменениям её структуры и параметров с течением времени под действием внутренних и внешних причин [53, 54]. Такое явление в работе [56] получило название «структурная динамика». Для того, чтобы обеспечить сохранение первоначального уровня работоспособности КФС, либо провести её деградацию с наименьшими потерями функциональности, требуется управлять указанными структурами, то есть, выполнять реконфигурацию структур. На рисунке 3, взятом из работы [57], представлены возможные варианты структурной динамики системы управления (СУ) КФС.

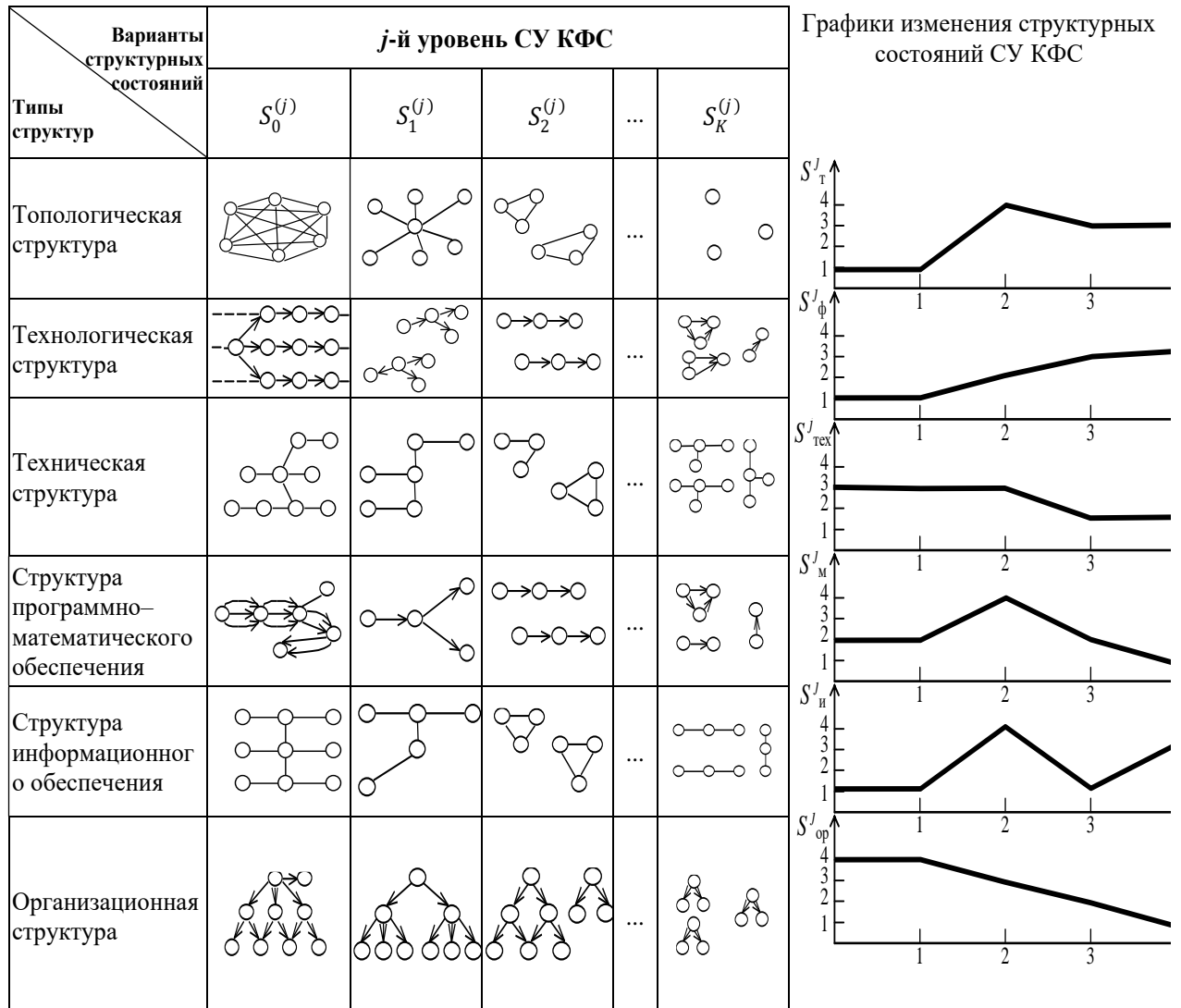


Рисунок 3. Возможные варианты структурной динамики СУ КФС.

Обобщённая задача выбора структуры сложного технического объекта сводится к постановке и решению оптимизационной задачи, приведённой в [3]:

$$\bar{S}\{[\bar{f} \subset \bar{F}(\bar{\pi})]\bar{R}[\bar{m} \subset \bar{M}]\} \rightarrow \text{extr}, \quad (1.1)$$

$$\bar{\pi} \subset \bar{P}, \quad (1.2)$$

$$\bar{f} \subset \bar{F}(\bar{\pi}), \quad (1.3)$$

$$\bar{m} \subset \bar{M}, \quad (1.4)$$

где  $\bar{P}$  – множество возможных алгоритмов управления  $\bar{\pi} \subset \bar{P}$ ;  $\bar{F}$  – множество взаимосвязанных выполняемых системой функций;  $\bar{M}$  – множество элементов КФС;  $\bar{R}$  – операция отображения элементов множества  $\bar{F}$  на элементы множества  $\bar{M}$ . Данное оптимальное отображение должно обеспечивать экстремум некоторой целевой функции  $\bar{S}$  при соблюдении заданных ограничений.

Обобщение сформулированной проблемы (1.1) – (1.4) возможно на основе введения в её состав временного параметра и её рассмотрения как проблемы многокритериального динамического структурно-функционального синтеза и проактивного управления функционирования и развитием КФС в условиях воздействия на него возмущающей внешней среды. Формальное описание данной проблемы будет проведено далее в параграфе 1.6.

Общее число переменных и ограничений данной задачи вида (1.1)-(1.4) приводят к возникновению одной из основных трудностей при её решении – большой размерности. Поэтому необходимо использовать различные варианты декомпозиции, агрегирования, координации и т.д. В работах [59, 87, 88] приведены примеры успешного решения проблем данного класса на основе построения многоуровневого комплекса взаимосвязанных оптимизационных аналитических и имитационных моделей синтеза структур КФС.

Одной из характерных черт рассматриваемой области исследований (как, впрочем, и любой другой новой области исследований) является терминологическая многозначность. Существует целый ряд терминов, отражающих различные смысловые аспекты альтернативного и многорежимного управления. В связи с этим, следуя работам [53, 54], определим понятия КФС «альтернативного» и «многорежимного» управления.

КФС «альтернативного» управления – это класс систем управления с конечным множеством возможных структур. В данном случае управляющая подсистема распознаёт ситуацию и осуществляет выбор заранее сформированной соответствующей программы

управления. Другими словами, для указанных КФС производится реконфигурация исходной структуры по априорно задаваемой программе, использующей распознавание текущей ситуации для выбора конкретных управляющих воздействий. Предусмотрены также варианты адаптации указанных программ на основе накопления соответствующей информации. В работах [82, 86, 101, 103] приводятся конкретные модели, методы, алгоритмы и методики, позволяющие реализовывать рассматриваемую концепцию управления.

В КФС «многорежимного» управления выполняется декомпозиция глобальной цели, стоящей перед системой, на множество локальных целей и разделение многообразия управления системой на ряд режимов, которые выбираются в управляющей подсистеме.

К настоящему моменту времени существуют множество вариантов реализации КФС многорежимного управления [53, 103]:

- координируемые системы, предполагающие изменение структуры системы;
- многоструктурные системы, состоящие из моноструктур и различных подсистем, включаемых в работу в зависимости от состояния системы в темпе изменения переходных процессов;
- двухзонные следящие системы, имеющие переменную структуру, отвечающую двум зонам в пространстве состояний, в каждой из которых оптимизируется своя критериальная функция;
- системы управления с изменяющейся конфигурацией, имеющие, аналогично двухзонным следящим системам, две области функционирования: допустимую, определяемую технологическими ограничениями на управляемые координаты объекта, и аварийную, дополняющую первую;
- логико-динамические системы, содержащие логический и динамический уровни, в которых управление в виде гибридной функции непрерывных и булевых переменных осуществляется на основе логико-динамического принципа (к этому классу систем также относятся системы с логическими управляющими устройствами, системы с логико-функциональными условиями);
- многофункциональные системы автоматического управления, у которых в процессе функционирования с изменением режима работы меняется как количественный, так и качественный состав взаимодействующих между собой сепаратных систем;
- широкий класс систем с переменной структурой, именуемых часто системами с динамической (изменяющейся во времени) структурой, системами с управляемой структурой.

Так же, как и для КФС альтернативного управления, для КФС многорежимного управления к настоящему времени получен ряд интересных научных и практических результатов, связанных с формированием и реализацией соответствующих программ управления структурной динамикой соответствующих КФС [53, 103].

В задачах, связанных с работой КФС в критически важных предметных областях (космос, авиация, здравоохранение и т.д.), требуется создание систем отказоустойчивого и самовосстанавливаемого управления. В отличие от КФС многорежимного управления, в данных КФС требуется обеспечивать быстрое самовосстановление, а также высокую точность распознавания ситуаций в условиях неполных и противоречивых данных [83-86]. Для указанных систем широко используют получивший применение в вычислительных сетях принцип устойчивости к отказам (принцип толерантности) на всех этапах жизненного цикла КФС.

Создание и внедрение КФС отказоустойчивого и самовосстанавливаемого управления предполагает реализацию следующих этапов [83-86]:

- анализ живучести подсистем КФС;
- исследование и проектирование толерантных систем;
- моделирование, стендовые и натурные испытания рассматриваемого класса КФС.

На рисунке 4, взятом из [54], представлена структурная схема ИСАУ с аэродинамической реконфигурацией ЛА и сохранением активной роли лётчика. На рисунке обозначено: 1 – блок команд лётчика экипажа ЛА; 2 – блок номинального управления режимом полёта; 3 – объединённый блок реконфигурации; 4 – активный регулятор и блок смешивания управления; 5 – блок приводов управления; 6 – блок аэродинамической модели ЛА; 7 – блок математической модели траекторий движения ЛА; 8 – блок обнаружения и изоляции отказов; 9 – блок оценивания эффективности работы органов управления ЛА; 10 – блок контроля за движением ЛА в полёте.

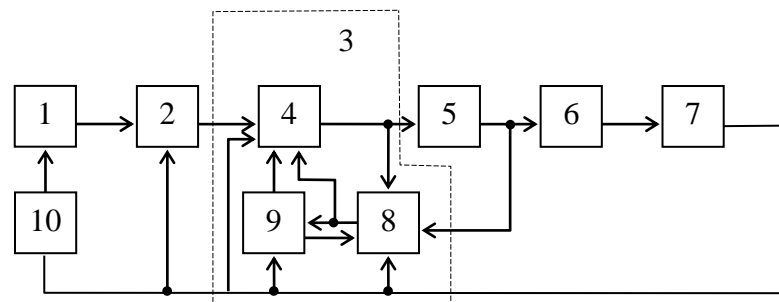


Рисунок 4. Структурная схема ИСАУ с аэродинамической реконфигурацией ЛА

При функционировании данной ИСАУ в условиях отказов приводов и повреждения органов управления ЛА блок 8 обнаруживает и изолирует повреждения, в блоке 9 производится оценивание функциональных возможностей оставшихся исправными органов управления для создания необходимых по штатному режиму полёта сил и моментов. В блоке 4 осуществляется пересчёт управлений на приводы органов управления, что обеспечивает самовосстановление и реконфигурацию управления.

В условиях изменения целей и задач, стоящих перед КФС, и воздействием возмущающих факторов внешней среды использование традиционных подходов к решению задач управления структурной динамикой КФС, возможно, будет малоэффективно. Это заставляет исследовать новые способы конструктивного учёта факторов сложности, и перспективным направлением для будущих исследований представляется использование подходов и методов искусственного интеллекта для решения задач УСД КФС [53, 97, 98, 108-114].

Кратко охарактеризуем результаты, полученные в результате обзора состояния исследований задач управления структурной динамикой КФС. Теоретические основы управления развитием КФС, как сложного технического объекта, могут быть сформированы на основе работ [52, 59, 89, 93, 106, 115]. Методологические и методические основы постановки и решения задач планирования развития КФС целесообразно выполнять с использованием трудов [59, 87, 88]. Ряд итерационных процедур синтеза технической и функциональной структуры КФС описан в [53, 54, 90, 56, 98, 100]. Однако динамике изменения внешнего мира и учёту распределённости элементов и подсистем КФС в данных работах уделено недостаточно внимания.

Наиболее полное обобщение упомянутых в данном параграфе ранее полученных научных результатов было выполнено в работе [3] в виде теоретических основ управления структурной динамикой сложных технических объектов. Данная теория носит «междисциплинарный характер и основывается на результатах, полученных в классической теории управления, в исследовании операций, в искусственном интеллекте, в теории систем и системном анализе» [3]. В диссертации будет проведено развитие указанной теории в прикладном направлении, связанном с разработкой методологических, методических и программно-технологических решений задач синтеза технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете.

### **1.3. Концептуальная модель процессов управления структурной динамикой КФС как процессов управления активными подвижными объектами (АПО)**

Постановка и решение проблемы управления структурной динамикой КФС, в рамках которой будет решаться исследуемая в диссертации проблема, предполагает, прежде всего, построение и исследование соответствующей системы концептуальных моделей, описывающих рассматриваемую предметную область.

В целях дальнейшей конкретизации и прикладной направленности рассматриваемой в диссертации проблемы управления структурной динамикой КФС выделим, следуя работам [3, 90, 56, 119], в качестве первичных объектов управления в исследуемых СУ подкласс активных подвижных объектов (АПО), которые представляют собой «искусственно созданные материальные объекты (приборные комплексы), перемещающиеся в пространстве и осуществляющие взаимодействие (информационное, вещественное, энергетическое) с объектами обслуживания (ОБО), другими АПО» [3].

На рисунке 5, взятом из [3], показана обобщённая структура АПО как объекта управления. Из рисунка 5 видно, что АПО состоит из четырёх подсистем, реализующих четыре вида функционирования: процесс движения, процессы взаимодействия с ОБО, другими АПО, процессы функционирования целевой и обеспечивающей аппаратуры, процессы расхода и пополнения ресурсов [3].

Предлагаемая структура АПО, как показано в работах [3, 90, 56, 119], допускает весьма многообразную интерпретацию. Так, например, в качестве АПО может выступать пилотируемое или беспилотное наземное, воздушное, надводное или подводное средство передвижения с установленной на нём аппаратурой, АПО можно интерпретировать и как космическое средство (КСр), как многоагентную систему, и, что важно, как киберфизическую систему.

АПО в этом случае являются конечными исполнительными средствами, с помощью которых указанные цели непосредственно достигаются. Физически ОБО могут представлять из себя естественные или искусственно созданные материальные объекты или естественную материальную среду, созданную природой [119]. Так, в качестве ОБО может выступать часть наземной или водной поверхности, часть воздушного, подводного, подземного пространства, подвижные объекты. В этом случае природа и формы взаимодействия АПО с ОБО могут носить как активный, так и пассивный характер (т.е. сопровождаться либо не сопровождаться изменением состояния ОБО).



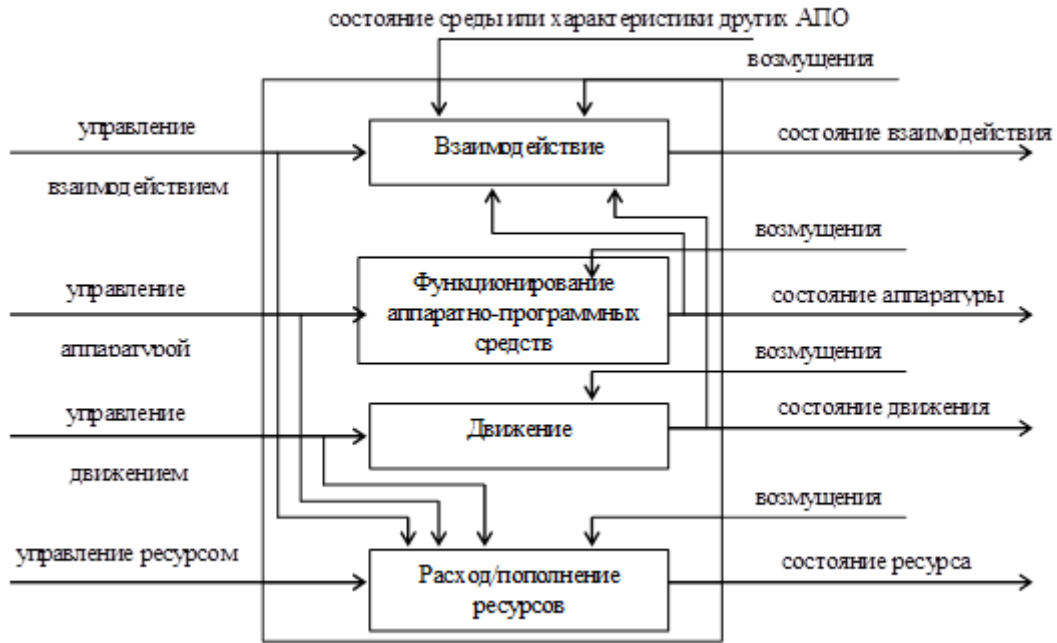


Рисунок 5. Обобщённая концептуальная модель АПО

Как упомянуто в [120], для каждого типа АПО должна быть сформулирована цель его функционирования, связанная с процессами взаимодействия с ОБО, с другими АПО, и определена соответствующая последовательность действий, в ходе которой будет достигнута поставленная цель. Анализ показывает, что в этом случае удобно концептуальное описание указанной деятельности АПО проводить с использованием понятия «операция», под которой будем в дальнейшем понимать действие или систему действий, объединённых общим замыслом и единой целью [91].

Согласно [120], цель функционирования АПО реализуется в ходе выполнения им операций, связанных с информационным, вещественным и энергетическим обменом с ОБО, другими АПО. Таким образом, операция обмена является основным системообразующим фактором, объединяющим (интегрирующим) различные виды деятельности АПО (движение, работу аппаратуры, расход ресурса и т.п.). Содержание и специфика каждой выполняемой операции АПО находит своё отражение в задании соответствующих параметров, характеризующих

- результаты выполнения операций (объём, качество, время выполнения операции и т.п.);
- расход ресурсов при выполнении операции;
- информационные и материальные потоки, возникающие в ходе выполнения операции.

Исходя из целей диссертации, связанной с моделированием и выбором альтернативных технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете, процесс функционирования КФС и его концептуальной модели, за которую мы приняли АПО, будем описывать в терминах, связанных с операциями, макрооперациями и динамикой изменения состояния указанных операций. Далее, во второй главе, будут приведены логико-динамические модели, описывающие процессы программного управления данными операциями, а также будут рассмотрены возможные подходы к учёту факторов неопределённости в указанных моделях. Для проведения детального описания процессов функционирования промышленного интернета введённой концептуальной модели АПО недостаточно. Поэтому в целях её дальнейшей детализации введём ещё ряд базовых концептов и отношений между ними:

а) концепт «Процесс», под которым будем понимать систему действий, объединённых общим замыслом и единой целью [91];

б) концепт «Операция», соответствующий действиям в концепте «Процесс». При этом каждая операция, во-первых, связана с информационным, вещественным и энергетическим обменом с внешней средой, и, во-вторых, с расходом ресурсов и характеризуется объёмом, качеством, временем выполнения операций, расходом ресурсов, информационными, энергетическими и материальными потоками, сопровождающими её выполнение;

в) концепт «Ресурсы», к которым относятся [59, 91, 90] орудия и предметы труда, средства производства, разнообразные технические системы, оборудование, вооружение, материалы, энергия, транспорт, денежные средства и т.п. К ресурсам можно также отнести время, отводимое на операцию, и людей – участников операции;

г) концепт «Задача» – желаемый результат деятельности, достигаемый за намеченный (заданный) интервал времени и характеризующийся набором количественных данных или параметров этого результата. Таким образом, как указывается в работе [52, 90], цель становится задачей, если указан (задан, принят) срок её достижения и конкретизированы количественные характеристики желаемого результата;

д) концепт «Поток», характеризующийся текущим и требуемым объёмом (уровнем), интенсивностью передачи (приема), скоростью изменения уровня потока, качественными параметрами потока.

е) концепт «Структура». Применительно к АСУ АПО, как уже указывалось ранее, будем в первую очередь различать следующие основные виды структур [52, 56, 123]: структуру целей, функций и задач АСУ АПО; организационную структуру; техническую структуру; топологическую структуру; структуру информационного, математического и программного

обеспечения; структуру технологии управления основными элементами и подсистемами АСУ АПО на различных этапах её жизненного цикла.

С использованием перечисленных видов структур задаются различные классы отношений между основными элементами соответствующей АСУ, которые в свою очередь, определяются теми пространственно-временными, техническими, технологическими, энергетическими, материальными, информационными и т.п. ограничениями, которые характерны для каждой конкретной предметной области.

Подробнее речь об указанных структурах и способах их формального описания пойдёт далее в данной главе. Здесь же укажем лишь на то, что главная системообразующая функция в любой автоматизированной системе принадлежит структуре технологии управления её основными элементами и подсистемами, так как с помощью данной структуры (отношения) удается связать все остальные виды структур друг с другом в единое целое, что самое важное, связать всех их с целевым предназначением соответствующей АСУ.

#### **1.4. Теоретико-множественное описание проблемы управления структурной динамикой киберфизических систем**

С учетом вышеизложенного выделим в качестве основных следующие множества элементов (концептов) и структур, входящих в состав системы управления КФС и используемых при управлении их конфигурацией и реконфигурацией в динамически изменяющейся обстановке в нотации, введённой в работе [124] и, с дополнениями, в [3] для других классов сложных технических объектов:

$A = \{A_v, v \in N\}$  – множество задач, решаемых в ходе создания и функционирования СУ КФС;

$B = \{B_i, i \in M\}$  – множество объектов (подсистем, элементов), входящих в состав СУ КФС и обеспечивающих её функционирование;

$\bar{B} = \{\bar{B}_i, i \in \bar{M}\}$  – множество объектов (подсистем, элементов), не входящих в состав СУ КФС, но с которыми рассматриваемые системы осуществляют взаимодействие (информационное, энергетическое, вещественное);

$\tilde{B} = B \cup \bar{B}$  – множество объектов, рассматриваемых при управлении структурной динамикой КФС;

$C = \{C_\lambda^{(i)}, \lambda \in \Lambda_i, i \in M\}$  – множество каналов (технических средств), имеющих на объектах  $B^{(i)}$  и используемых при решении задач, стоящих перед СУ КФС;

$D = \{D^{(c)} \cup \{D_{x'}^{(i)}\} \cup \{D_x^{(i,j)}\}, i, j \in M, x' \in K_i^{(o)}, x \in K_{\langle i, j \rangle}^{(o)}\}$  – множество операций,

выполняемых в СУ КФС;

$D^{(i)} = \{D_{x'}^{(i)}, x' \in K_i^{(o)}\}$  – множество операций, выполняемых непосредственно на объекте  $B^{(i)}$ ;

$D^{(i,j)} = \{D_x^{(i,j)}, x \in K_{\langle i, j \rangle}^{(o)}\}$  – множество операций взаимодействия объектов  $B^{(i)}, B^{(j)}$  друг с другом;

$\Phi = \{\{\Phi S_{\pi}^{(i)}\} \cup \{\Phi N_{\mu}^{(i)}\}, i \in M, \pi \in K_i^{(p,1)}, \mu \in K_i^{(p,2)}\}$  – множество ресурсов, используемых в СУ КФС;

$\Phi S^{(i)} = \{\Phi S_{\pi}^{(i)}, \pi \in K_i^{(p,1)}\}$  – множество нескладируемых ресурсов, используемых на объекте  $B^{(i)}$ ;

$\Phi N^{(i)} = \{\Phi N_{\mu}^{(i)}, \mu \in K_i^{(p,2)}\}$  – множество складируемых ресурсов, используемых на объекте  $B^{(i)}$ ;

$P = \{\{P_{\langle x', \rho \rangle}^{(i)}\} \cup \{P_{\langle x, \rho \rangle}^{(i,j)}\}, i \in M, x' \in K_i^{(o)}, x \in K_{\langle i, j \rangle}^{(o)}, \rho \in K_i^{(n)}\}$  – множество потоков, образующихся при функционировании СУ КФС;

$P^{(i)} = \{\{P_{\langle x', \rho \rangle}^{(i)}\}, i \in M, x' \in K_i^{(o)}, \rho \in K_i^{(n)}\}$  – множество потоков (энергетических, вещественных, информационных), образующихся при функционировании объекта  $B^{(i)}$ ;

$P^{(i,j)} = \{P_{\langle x, \rho \rangle}^{(i,j)}, i, j \in M, \rho \in K_i^{(n)}\}$  – множество потоков (энергетических, вещественных, информационных), образующихся при взаимодействии объектов  $B^{(i)}$  и  $B^{(j)}$ ;

$G = \{G_{\chi}, \chi \in NS\}$  – множество возможных типов структур СУ КФС, в качестве которых, в первую очередь, выделяются топологическая (Топ), технологическая (функциональная (Фун)), техническая (Тех) структуры, структуры программно-математического и информационного обеспечения (ПМО), (ИО).

Для связи перечисленных множеств друг с другом введем в рассмотрение динамический альтернативный мультиграф (ДАМГ) следующего вида:

$$G_{\chi}^{<t,w>} = \langle X_{\chi}^{<t,w>}, F_{\chi}^{<t,w>}, Z_{\chi}^{<t,w>} \rangle, \quad (1.5)$$

где  $\chi$  – индекс, характеризующий тип структуры СУ КФС,  $t$  – индекс (номер), соответствующий текущему значению времени, которое может (в зависимости от постановки исследуемых прикладных задач) принимать как дискретные, так и непрерывные значения,  $w$  – текущий индекс (номер), которому соответствует кортеж текущих значений параметров

моделей, описывающих СУ КФС и подстраиваемых её внутренними и внешними адаптерами. Основываясь на описаниях множеств, приведённых в [3], состав и структура данного кортежа будет описана при переходе от предлагаемого обобщенного теоретико-множественного описания решаемой в диссертации проблемы и её конкретному описанию с использованием разработанного комплекса моделей.

$\chi \in NS = \{\text{Топ, Фун, Тех, ПМО, ПО, ИО}\}$  – множество индексов, соответствующих топологической, функциональной, технической структурам, структурам ПМО, ИО.

$t \in T$  – множество моментов времени;

$X_{\chi}^{<t,w>} = \{x_{<\chi,l>}^{<t,w>}, l \in L_{\chi}\}$  – множество элементов, входящих в состав структуры  $G_{\chi}^{<t,w>}$  (множество вершин ДАМГ) в момент времени  $t$ ;

$F_{\chi}^{<t,w>} = \{f_{<\chi,l,l'>}^{<t,w>}, l, l' \in L_{\chi}\}$  – множество дуг ДАМГ типа  $G_{\chi}^{<t,w>}$ , отражающих взаимосвязи между его элементами в момент времени  $t$ ;

$Z_{\chi}^{<t,w>} = \{z_{<\chi,l,l'>}^{<t,w>}, l, l' \in L_{\chi}\}$  – множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов ДАМГ.

Кроме того, задано множество допустимых (исходя из содержательной постановка каждой конкретной задачи управления структурной динамикой КФС) операций отображения, указанных выше ДАМГ друг на друга:

$$E_{<\chi,\chi''>}^{<t,w>} : F_{\chi}^{<t,w>} \rightarrow F_{\chi''}^{<t,w>} \quad (1.6)$$

На рисунке 6 представлен в графическом виде вариант задания данного отображения для фиксированного момента времени  $t$ . В качестве возможных структур, представленных на данном рисунке, могут быть топологическая, техническая и функциональная структуры СУ КФС.

Зададим также операции композиции указанных отображений в момент времени  $t$ :

$$E_{<\chi,\chi'>}^{<t,w>} = E_{<\chi,\chi_1>}^{<t,w>} \circ E_{<\chi_1,\chi_2>}^{<t,w>} \circ \dots \circ E_{<\chi'',\chi'>}^{<t,w>} \quad (1.7)$$

Множество многоструктурных состояний СУ КФС запишется следующим образом:

$$S_{\delta} \subseteq X'_{\text{Топ}} \times X'_{\text{Фун}} \times X'_{\text{Тех}} \times X'_{\text{Пмо}} \times X'_{\text{Ио}} \times X'_{\text{Ор}}, \delta = 1, \dots, K_{\Delta}. \quad (1.8)$$

При этом предполагается, что каждое многоструктурное макросостояние СУ КФС в момент времени  $t \in T$  задается в результате операции композиции соответствующих ДАМГ, описывающих каждый тип структуры рассматриваемых систем [3].

Введем, аналогично [3], ещё множество допустимых операций отображения многоструктурных состояний СУ КФС друг на друга, а также множество композиций указанных отображений:

$$\Pi_{\langle \delta_i, \delta_j \rangle}^{\langle t, w \rangle}: S_{\delta_i}^{\langle t, w \rangle} \rightarrow S_{\delta_j}^{\langle t, w \rangle} \quad (1.9)$$

$$\Pi_{\langle \delta_1, \delta_f \rangle}^{\langle t_f, w \rangle} = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{\langle t_1, w \rangle} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{\langle t_2, w \rangle} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta_n, \delta_f \rangle}^{\langle t_f, w \rangle}. \quad (1.10)$$

На рисунке 6 также приведен в графическом виде пример выполнения указанного отображения многоструктурных состояний друг на друга для момента времени  $t_1$ .

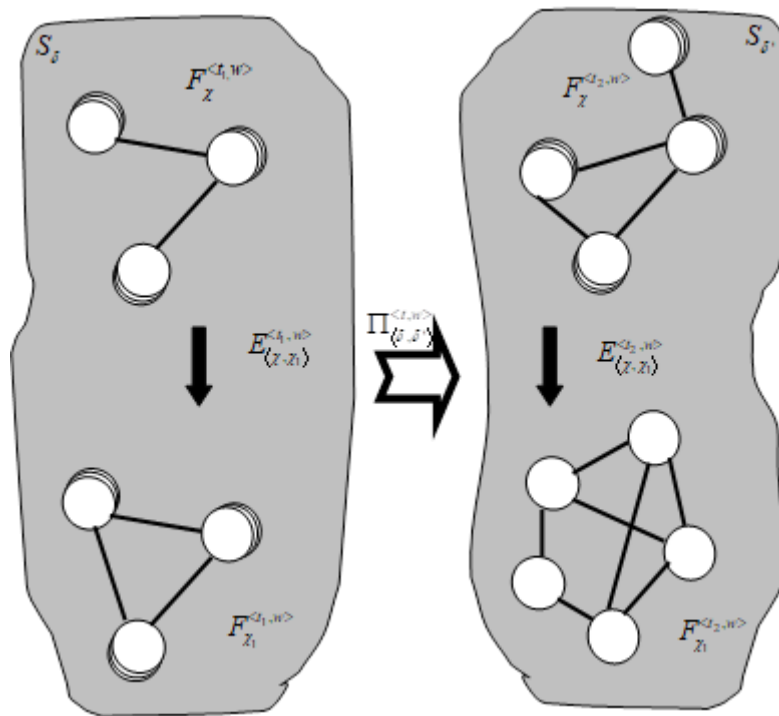


Рисунок 6. Варианты многоструктурных макросостояний СУ КФС, а также фрагмент сценария многоструктурной динамики.

Используя множество вариантов композиций вида (1.10) можно целенаправленно осуществлять генерацию различных сценариев структурной динамики как самих КФС, так и систем управления ими.

Графическая интерпретация рассматриваемых задач управления структурной динамикой СУ КФС в этом случае сводится к поиску такого многоструктурного состояния  $S_{\delta}^* \in \{S_1, S_2, \dots, S_{k_{\Delta}}\}$  и такой последовательности (композиции) выполнения операций отображения вида (1.10) во времени  $\Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{\langle t_1, w \rangle} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{\langle t_2, w \rangle} \circ \Pi_{\langle \delta', \delta \rangle}^{\langle t_f, w \rangle}$ , при которых обеспечивается выбор оптимальной с точки зрения обобщенного показателя эффективности технологии и программы управления структурной динамикой СУ КФС, обеспечивающей их переход из заданного в требуемое многоструктурное состояние [3].

Наряду с графической интерпретацией исследуемой проблемы в [3] предлагается следующее её теоретико-множественное описание: необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, программное обеспечение, позволяющие синтезировать такие технологии и программы управления конфигурацией и реконфигурацией КФС с использованием и без использования средств СУ КФС, а также управления реализацией указанных программ  $\langle U_{*}^t, S_{\delta}^{*t_f} \rangle$ , при которых выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned}
 J_{\theta} \left( X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t, t \in (t_0, t_f] \right) &\rightarrow \underset{\langle U^t, S_{\delta}^{*t_f} \rangle \in \Delta_g}{extr}, \\
 \Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_{\delta}^{*t_f} \rangle \mid R_{\beta} \left( X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t \right) \leq \tilde{R}_g; \right. \\
 \left. U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \delta, \delta \rangle}^t; \chi \in \mathbf{B} \right\} \\
 \Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_{\delta}^{*t_f} \rangle \mid R_{\beta} \left( X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t \right) \leq \tilde{R}_g; \right. & \quad (1.11)
 \end{aligned}$$

где  $\chi$  – индекс, характеризующий различные типы структур промышленного интернета,  $\chi \in \{\text{Топ, Фун, Тех, ПМО, ИО}\}$  – множество индексов, соответствующих топологической, функциональной и технической 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  $G_{\chi}^t$ ;  $\Gamma_{\chi}^t = \{\gamma_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$  – множество дуг мультиграфа типа  $G_{\chi}^t$ , 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 информационной системы предприятия 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  $t$ ;  $U^t$  – управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как структуры информационной системы, так и её

процессы функционирования;  $J_\theta$  – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество функционирования информационной системы,  $q \in Q = \{1, \dots, l\}$  – множество номеров показателей;  $\Delta_g$  – множество динамических альтернатив (множество структур и параметров промышленного интернета, множество программ его функционирования);  $\mathbf{B}$  – 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.

Ранее уже указывалось, что на практике из-за высокой структурной динамики как самих КФС, так и соответствующих систем управления ими, приходится постоянно подстраивать (подбирать, адаптировать) существующие модели, описывающие перечисленные системы, к изменяющейся обстановке. В данном случае речь идёт уже о системе проактивного управления (СПУ). К сожалению, данные процедуры адаптации моделей (в более общем случае – полимодельных комплексов) носят эвристический характер. В связи со сказанным, в предлагаемой диссертации, базируясь на предыдущих исследованиях по данной тематике [44, 56, 119], разработан математический аппарат, позволяющий формально описывать и решать задачи параметрической и структурной адаптации моделей и полимодельных комплексов СПУ КФС, о которых речь далее в диссертации в 3-й главе. Для этого в начале воспользуемся следующим теоретико-множественным описанием исследуемых процессов управления КФС [125].

$$H^{<t,w>} : M^{<t,w>} \times W^{<t,w>} \times N^{<t,w>} \rightarrow M^{<t,w>} \\ W^{<t>} = W_1^{<t>} \times W_2^{<t>} \times W_3^{<t>}$$

где  $M^{<t,w>}$  – множество моделей (полимодельных комплексов), описывающих процессы функционирования СПУ КФС,  $W^{<t>}$  – множество параметров, настраиваемых внешним и внутренним адаптерами имитационной системы (ИмС), с использованием которой осуществляется поиск как оптимальных технологий, так программ управления КФС. Данное множество строится на декартовом произведении трех других множеств:  $W_1^{<t>}$  – множество параметров моделей СПУ КФС, настраиваемых внутренним адаптером ИмС;  $W_2^{<t>}$  – множество параметров моделей СПУ КФС, настраиваемых внешним адаптером ИмС;  $W_3^{<t>}$  – множество параметров, настраиваемых указанными адаптерами при структурной адаптации моделей;  $N^{<t,w>}$  – множество наиболее существенных атрибутов (признаков)



характеризующих состояние реальных СПУ КФС и используемых при оценивании степени адекватности разрабатываемых и используемых моделей;  $H^{<t,w>}$  – оператор (в частном случае – отображение) итеративного конструирования (синтеза, выбора) моделей, описывающих СПУ КФС и их управляемую структурную динамику.

С учетом вышеизложенного, теоретико-множественное описание исследуемой в диссертации проблемы, описанное ранее (см. формулу 1.11), можно модифицировать следующим образом: необходимо разработать и реализовать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы и программное обеспечение (Про) многокритериального синтеза технологий и программ управления КФС, а также соответствующее методическое обеспечение параметрической и структурной адаптации созданных моделей, полимодельных комплексов и Про с использованием которых должен быть решен следующий комплекс научно-технических задач:

**Задачи I класса** (задачи параметрической и структурной адаптации моделей управления КФС.

$$I_{\tilde{\alpha}}^{<t,w>} \left( J_{\tilde{\beta}}^{<t,w>}, J_{\tilde{\beta}}^{<t>}, G_{\chi}^{<t,w>}, H^{<t,w>}, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \underset{W^{<t>} \subseteq \Delta_1^{(g)}}{extr}$$

$$\Delta_1^{(g)} = \{ W^{<t>} | H^{<t,w>} : M^{<t,w>} \times W^{<t>} \times N^{<t>} \rightarrow M^{<t,w>}, W^{<t>} = W_1^{<t>} \times W_2^{<t>} \times W_3^{<t>},$$

$$R_{<1,\gamma_1>}^{<t,w>}(M^{<t,w>}, W^{<t>}, N^{<t>}) \leq \tilde{R}_{<1,\gamma_1>}, \gamma_1 \in \{1, \dots, \Gamma_1\} \} \quad (1.12)$$

где  $I_{\tilde{\alpha}}^{<t,w>}$  – обобщенный показатель качества моделей и полимодельных комплексов (ПМК), описывающих СПУ КФС;  $\tilde{\alpha}$  – индекс, характеризующий вариант свертки частных показателей качества моделей и ПМК (например, показателей адекватности, точности, гибкости, сложности и т.п. моделей),  $\tilde{\alpha} \in A$  – множество вариантов скаляризации (свертки) показателей качества моделей;  $J_{\tilde{\beta}}^{<t,w>}, J_{\tilde{\beta}}^{<t>}$  – соответственно обобщенные показатели качества синтеза технологии и управления КФС, рассчитанные с использованием разработанных в диссертации моделей, ПМК Про, а также значения которых получены путем прямых либо косвенных измерений характеристик (параметров) состояний реальных КФС,  $G_{\chi}^{<t,w>}$  – динамический альтернативный мультиграф вида (1.5),  $H^{<t,w>}$  – оператор итеративного конструирования моделей,  $\Delta_1^{(g)}$  – множество допустимых значений параметров адаптации моделей, полимодельных комплексов (ПМК) и Про;  $R_{<1,\gamma_1>}^{<t,w>}(M^{<t,w>}, W^{<t>}, N^{<t>}) \leq \tilde{R}_{<1,\gamma_1>}$  – множество ограничений, накладываемых на процессы адаптации моделей, ПМК и Про;

$\tilde{R}_{<1,\gamma_1>}$  – заданные константы;  $\gamma_1$  – текущий номер ограничений;  $\{1, \dots, \Gamma_1\}$  – множество номеров ограничений, определяющих множество допустимых альтернатив  $\Delta_1^{(g)}$ .

**Задачи II класса** (задачи синтеза технологий и программ управления КФС)

$$J_{\tilde{\beta}}^{<t,w>} \left( X_{\chi}^{<t,w>}, F_{\chi}^{<t,w>}, Z_{\chi}^{<t,w>}, E_{<\chi,\chi'>}^{<t,w>}, V^{<t,w>}, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \underset{<V^{<t,w>}, S_{\delta}^{<t_f>}> \in \Delta_2^{(g)}}{extr}$$

$$\Delta_2^{(g)} = \left\{ <V^{<t,w>}, S_{\delta}^{<t_f>} \right.$$

$$\left. > \left| R_{<2,\gamma_2>}^{<t,w>} \left( X_{\chi}^{<t,w>}, F_{\chi}^{<t,w>}, Z_{\chi}^{<t,w>}, E_{<\chi,\chi'>}^{<t,w>}, V^{<t,w>}, t \in (t_0, t_f] \right) \leq \tilde{R}_{<2,\gamma_2>}, \right.$$

$$\left. V^{<t,w>} = U^{<t,w>} \times E^{<t>}, \gamma_2 \in \{1, \dots, \Gamma_2\} \right\} \quad (1.13)$$

где  $J_{\tilde{\beta}}^{<t,w>}$  – обобщенный качества синтеза технологии и управления КФС, который рассчитывается с использованием предлагаемых в диссертации моделей, ПМК, а также ПрО;  $V^{<t,w>}$  – множество входных воздействий, образованное на декартовом произведении множества допустимых управляющих воздействий  $U^{<t,w>}$  и множества возмущающих воздействий  $E^{<t>}$ ;  $\tilde{\beta}$  – индекс, характеризующий вариант свертки частных показателей качества синтеза технологий и программ управления КФС, а также ПрО;  $\tilde{\beta} \in B$  – множество вариантов скаляризации (свертки) частных показателей качества управления КФС;  $\Delta_2^{(g)}$  – множество допустимых динамических альтернатив (множество структур и параметров СПУ КФС, множество технологий и программ управления КФС, множество ПрО);  $S_{\delta}^{<t_f>}$  – множество конечных (требуемых) допустимых многоструктурных макросостояний;  $R_{<2,\gamma_2>}^{<t,w>} \left( X_{\chi}^{<t,w>}, F_{\chi}^{<t,w>}, Z_{\chi}^{<t,w>}, E_{<\chi,\chi'>}^{<t,w>}, V^{<t,w>}, t \in (t_0, t_f] \right) \leq \tilde{R}_{<2,\gamma_2>}$  – множество ограничений, накладываемых на процессы синтеза технологий и программ управления КФС,  $\tilde{R}_{<2,\gamma_2>}$  – заданные константы;  $\gamma_2$  – текущий номер ограничений;  $\{1, \dots, \Gamma_2\}$  – множество номеров ограничений определяющих множество допустимых альтернатив  $\Delta_2^{(g)}$ . Кроме перечисленных двух классов основных задач, в диссертации будет решен еще и класс дополнительных (вспомогательных) задач – задачи III класса, в рамках которых будут исследованы задачи оценивания и анализа показателей потенциальных возможностей, внутренней и внешней эффективности СПУ КФС, показателей робастности, живучести и в целом устойчивости планов применения СУ КФС [121, 122].

### **1.5. Методологические основы постановки и решения проблемы управления структурной динамикой КФС на различных этапах её жизненного цикла**

При постановке и решении проблемы управления структурной динамикой КФС исключительно важное значение имеет исходная позиция, определяющая методологические основы формирования соответствующей теории. Всесторонний анализ возможных подходов к созданию такой теории показал, что в качестве её основополагающей методологии следует принять методологию современной теории управления сложными объектами и процессами [53, 76].

Данная методология получила в настоящее время достаточно глубокое развитие и, применительно к сложным организационно–техническим комплексам (в том числе и КФС), включает в себя две основные части: методологию обобщённого системного анализа [53, 60-65, 66, 72, 90, 106], базирующегося на логико–эвристической и отчасти математической основе, и методологию современной теории оптимального управления сложными динамическими системами с перестраиваемой структурой, опирающуюся на хорошо развитый математический аппарат. Перечисленные методологии, в свою очередь, находят своё отражение в соответствующих концепциях и принципах, положенных в основу решения исследуемой в данной диссертации проблемы. Кратко остановимся на содержании данных концепций и принципов, используя научные и практические результаты, полученные в ранее выполненных работах по данной тематике [53].

В качестве первой концепции была выделена концепция комплексного (системного) моделирования КФС, которая предполагает разработку и реализацию новых принципов, подходов к проведению полимодельного описания рассматриваемых КФС, а также разработку и комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных управленческих решений (в том числе и связанных с их реконфигурацией), связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок [131-137].

В качестве второй основополагающей концепции была выбрана концепция проактивного управления структурной динамикой КФС в динамически изменяющихся условиях, вызванных воздействием возмущающей среды. Проактивное управление, в отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления КФС, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение инцидентов, предполагает, как уже указывалось ранее, предотвращение возникновения инцидентов за счет создания в

соответствующей системе мониторинга и управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на методологии и технологиях системного (комплексного) моделирования [12, 123, 126].

Третья концепция базируется на идеях и технологиях интеллектуализации процессов управления КФС. «Интеллектуализация управления» – это новая парадигма управленческого процесса, предусматривающая в качестве условий эффективного управления КФС необходимость применения интеллектуальных инструментов управления (новых интеллектуальных информационных технологий), носящих ярко выраженный инновационный характер и направленных на достижение комплексной интеграции естественного и искусственного интеллектов [53, 54, 65, 69-71, 133, 137].

Проектирование, создание и развитие КФС сопровождается, как правило, различными мероприятиями, имеющими организационный и правовой характер: изменением методов работы, структуры технологии управления и функциональных обязанностей управленческого аппарата, перераспределением полномочий между органами управления, форм контроля и ответственности сотрудников, изменением структуры и содержание документооборота. Непосредственное конструктивное решение всех перечисленных вопросов может осуществить только руководитель той организации, где должна проводиться автоматизация процессов управления КФС. В связи с этим одним из основных принципов создания любой КФС является принцип первого руководителя.

Вторым важнейшим принципом создания и применения КФС является принцип системного подхода к управлению жизненным циклом создаваемой автоматизированной системы [134]. Данный принцип находит, в свою очередь, свою конкретизацию в принципах программно-целевого управления (ПЦУ), внешнего дополнения и необходимого разнообразия [63, 90, 106].

Так, например, в соответствии с принципом ПЦУ при организации автоматизированного управления КФС следует в первую очередь ориентироваться на конечные цели, стоящие перед КФС на этапе применения. Для этого должно строиться, прежде всего, дерево целей и задач, решаемых в процессе создания и применения КФС и разрабатываться комплексная программа работ (операций) или, по-другому, комплексный план развития КФС, согласующий процессы её проектирования и применения по целевому назначению.

Наряду с ПЦУ большое значение при решении задач синтеза и управления развитием КФС приобретают принцип внешнего дополнения и необходимого разнообразия. Суть принципа необходимого разнообразия состоит в том, что разнообразие воздействий,

вырабатываемых любой управляющей подсистемой, должно быть не меньше разнообразия состояний объектов управления (например, АПО [63, 56]).

Содержание принципа внешнего дополнения непосредственно следует из известной теоремы Геделя о неполноте формальных систем [52, 62, 64]. Согласно этой теореме в рамках некоторой формальной системы невозможно вывести все истинные утверждения, относящиеся к объектам, описываемым средствами этой формальной системы [52, 62, 64]. В этом случае для того, чтобы справиться с геделевской трудностью, необходима другая, более широкая система, в пределах которой формируются концептуальные основы поведения для систем более низкого уровня, т.е. необходимо внешнее дополнение [52, 62].

Важнейшими принципами обобщенного системного анализа являются принципы многокритериальности и полимодельности, в соответствии с которыми задачи формулировки целей, оценки их относительной значимости должны формализовываться и решаться как задачи полимодельного многокритериального выбора [90, 128-137].

На рисунках 7 – 9 приведена морфология возможных видов моделей, которые могут быть использованы при формализации рассматриваемой в данной диссертации проблемы.

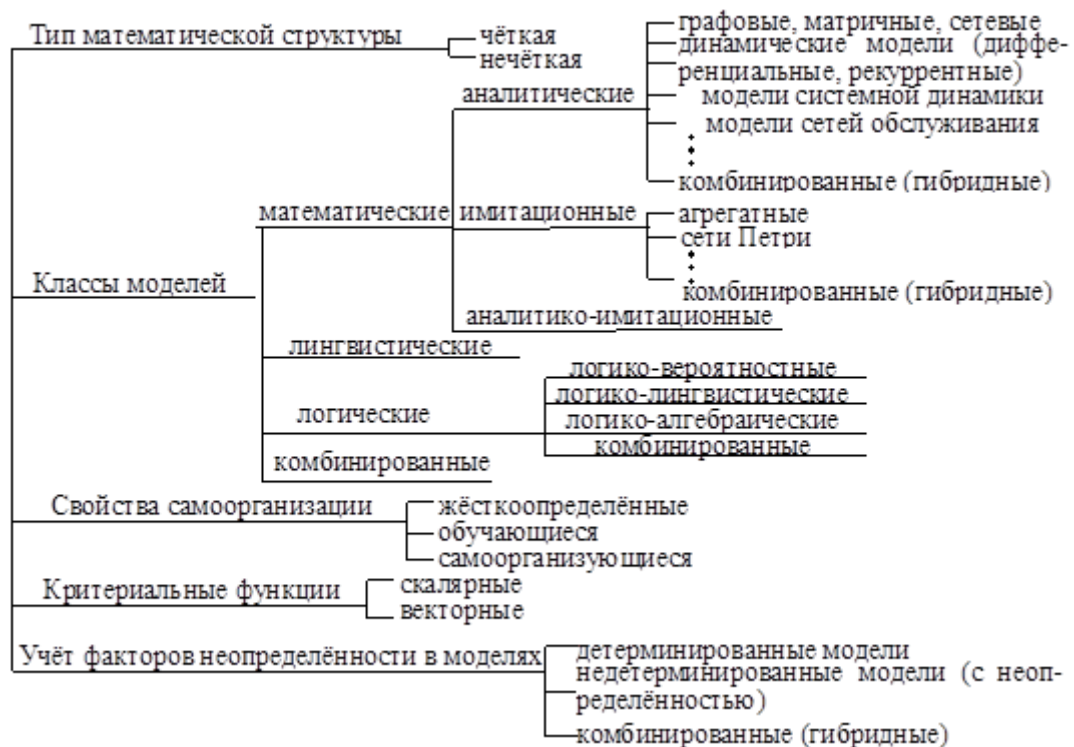


Рисунок 7. Классификация моделей для решения задач управления структурной динамикой КФС

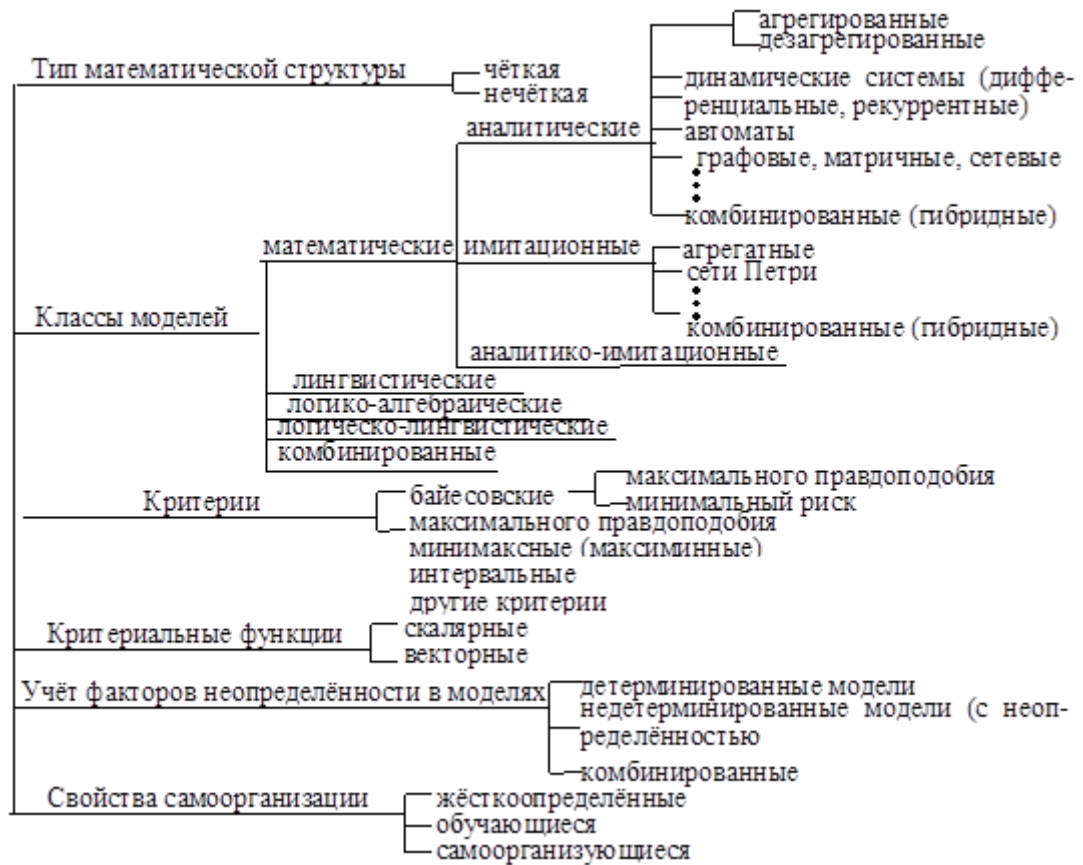


Рисунок 8. Классификация моделей для решения задач оценивания (наблюдения), контроля, идентификации структурного состояния и структурной динамики КФС

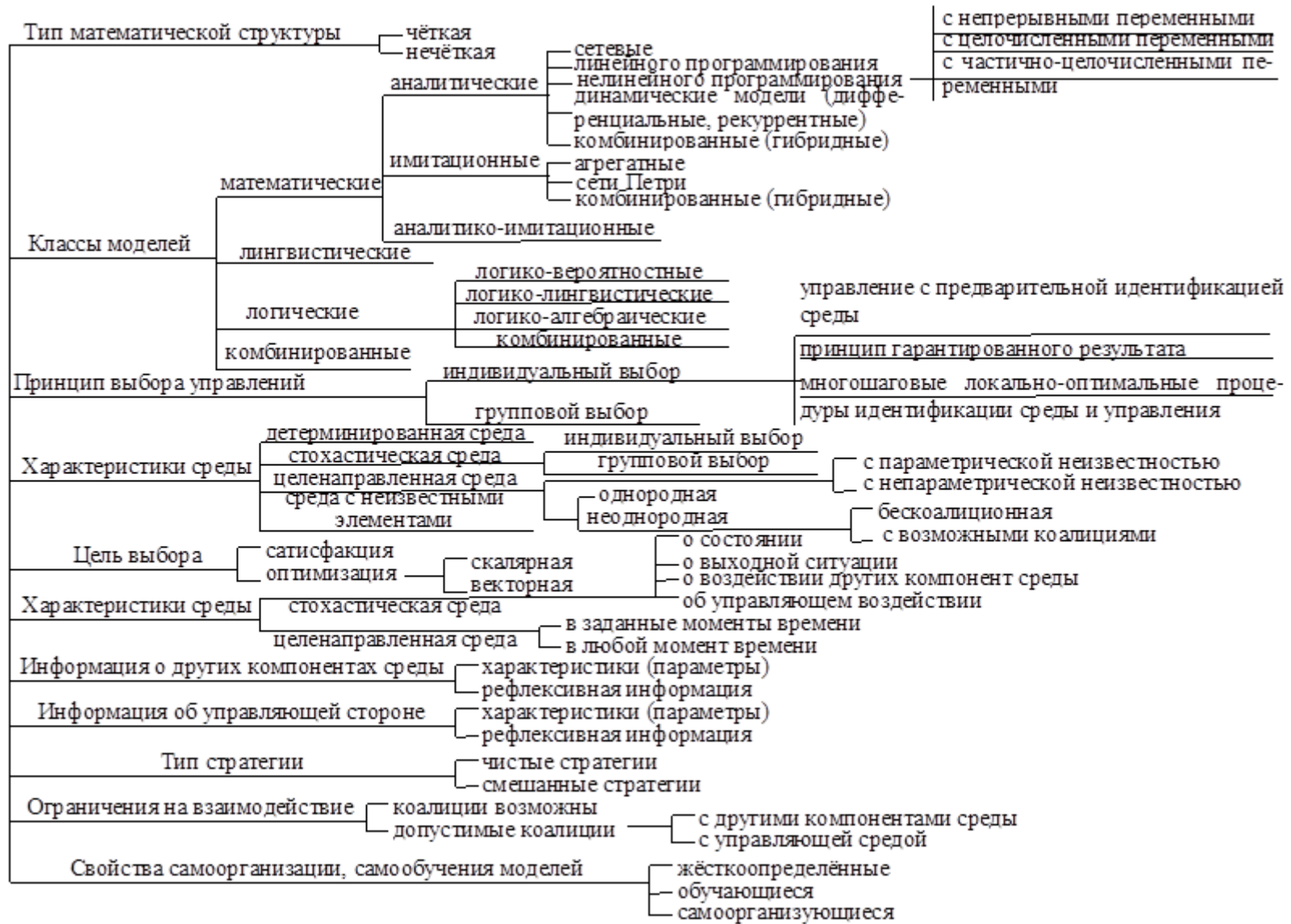


Рисунок 9. Классификация моделей для решения задач анализа структурной динамики КФС

Следующим принципом создания и применения КФС является принцип новых задач [123, 127]. Суть принципа состоит в следующем: нельзя проектировать КФС и проводить соответствующую автоматизацию применительно только для тех задач, которые органы управления КФС решали ранее вручную. Простая передача комплексу средств автоматизации (КСА) функций, выполняемых органами управления при старой технологии управления, не даёт большого экономического эффекта [127]. Необходимо кардинальным образом пересматривать сложившуюся технологию автоматизированного управления с тем, чтобы находить принципиально новые задачи или (и) качественно новые методы решения существующих и перспективных задач, которые до внедрения КСА управления не использовались из-за невозможности обработки больших объёмов информации с требуемой степенью подробности и точности на основе старых методов.

Принцип унификации и стандартизации элементов и подсистем создаваемой КФС отражает одно из важнейших условий разработки АС, связанное с минимизацией затрат на её создание и эксплуатацию.

Принцип разграничения доступа, защиты и сохранности информации имеет большое значение для КФС в современных условиях из-за всё возрастающей опасности различных проявлений информационной борьбы. Соблюдение этого принципа предполагает разработку и внедрение такой автоматизированной системы документооборота, при которой происходит регистрация всех обращений к системе для ввода, выдачи информации или решения задач, проводится перечень мероприятий по защите информации от случайных или преднамеренных искажений. Несоблюдение данного принципа может привести к различного рода злоупотреблениям или даже выводу из строя всей КФС из-за искажения и порчи информации.

Все перечисленные принципы, естественно, не исчерпывают всех вопросов создания и эксплуатации КФС, но позволяют не совершать методологические просчёты и ошибки, которые весьма трудно устранить на этапах применения и развития данных систем [52, 127].

### **1.6. Общая формальная постановка проблемы управления структурной динамикой КФС как обобщенной динамической системой**

Анализ вышеизложенного материала показывает, что к настоящему времени не проработана до конца единая методология и соответствующий формально-математический аппарат, позволяющие проводить совместную формулировку и решение задач структурно-функционального синтеза облика КФС и управления их структурами на различных этапах жизненного цикла указанных систем [52, 53, 59, 60, 61, 88, 138].

Результаты ранее проведённых исследований, выполненных коллективами отечественных и зарубежных учёных [53, 54, 60-76, 90, 106], не позволяют с требуемой полнотой, степенью



детализации, обоснованностью и своевременностью учесть все необходимые аспекты реализации технологии управления структурной динамикой КФС (см. параграф 1.3). В наибольшей степени перечисленные аспекты проявляются на этапе применения КФС по целевому назначению. На данном этапе при формировании программ управления структурной динамикой КФС фактор времени становится наиболее существенным.

Для конструктивного решения проблемы управления структурной динамикой КФС и учёта всех перечисленных ранее факторов необходимо: во-первых, разработать полимодельное многокритериальное описание различных аспектов процесса структурно-функционального синтеза облика КФС и управления её структурами, и, во-вторых, разработать соответствующие методы, алгоритмы и методики решения исследуемых в данной диссертации задач структурной динамики КФС.

Проведём обобщённую формальную постановку проблемы управления структурной динамикой КФС используя её формальное описание в виде обобщенной динамической системы как наиболее общей модели процессов, происходящих в существующих и перспективных сложных технических системах. Обоснование такого выбора было проведено нами ранее в параграфах 1.3, 1.6. Введём в рассмотрение следующие векторы и множества, аналогично работам [56]:

$$\mathbf{x}(t) = \|\mathbf{x}^{(д)T}, \mathbf{x}^{(о)T}, \mathbf{x}^{(к)T}, \mathbf{x}^{(р)T}, \mathbf{x}^{(п)T}, \mathbf{x}^{(е)T}, \mathbf{x}^{(с)T}, \mathbf{x}^{(в)T}\|^T, \quad (1.14)$$

$$\mathbf{y}(t) = \|\mathbf{y}^{(д)T}, \mathbf{y}^{(о)T}, \mathbf{y}^{(к)T}, \mathbf{y}^{(р)T}, \mathbf{y}^{(п)T}, \mathbf{y}^{(е)T}, \mathbf{y}^{(с)T}, \mathbf{y}^{(в)T}\|^T, \quad (1.15)$$

$$\mathbf{u}_{пр}(t) = \|\mathbf{u}_{пр}^{(д)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(о)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(к)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(р)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(п)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(е)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(с)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(в)T}\|^T, \quad (1.16)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t) = \|\mathbf{v}^{(д)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(о)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(к)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(р)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(п)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(е)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(с)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(в)T}(\mathbf{x}(t), t)\|^T, \quad (1.17)$$

$$\boldsymbol{\xi}(t) = \|\boldsymbol{\xi}^{(д)T}(t), \boldsymbol{\xi}^{(о)T}(t), \boldsymbol{\xi}^{(к)T}(t), \boldsymbol{\xi}^{(р)T}(t), \boldsymbol{\xi}^{(п)T}(t), \boldsymbol{\xi}^{(е)T}(t), \boldsymbol{\xi}^{(с)T}(t), \boldsymbol{\xi}^{(в)T}(t)\|^T, \quad (1.18)$$

$$\boldsymbol{\beta} = \|\boldsymbol{\beta}^{(д)T}, \boldsymbol{\beta}^{(о)T}, \boldsymbol{\beta}^{(к)T}, \boldsymbol{\beta}^{(р)T}, \boldsymbol{\beta}^{(п)T}, \boldsymbol{\beta}^{(е)T}, \boldsymbol{\beta}^{(с)T}, \boldsymbol{\beta}^{(в)T}\|^T, \quad (1.19)$$

где  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{y}(t)$  – соответственно обобщённый вектор состояния и выходных характеристик динамической системы, описывающей процессы управления структурной динамикой КФС;  $\mathbf{u}_{пр}(t)$ ,  $\mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t)$  – обобщённые векторы программных управлений КФС (которые есть по сути планы функционирования основных элементов и подсистем, входящих в КФС) и управлений, реализующих планы на этапе применения (в условиях возмущающих воздействий  $\boldsymbol{\xi}(t)$ );  $\boldsymbol{\xi}(t)$  – вектор возмущающих воздействий, имеющих как целенаправленный, так и нецеленаправленный характер;  $\boldsymbol{\beta}$  – вектор структурных параметров (характеристик) КФС, определяющих её облик.

При этом компоненты (тоже являющиеся векторами) всех вышеперечисленных векторов  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $u_{\text{пр}}(t)$ ,  $v(x(t),t)$ ,  $\xi(t)$ ,  $\beta$  соответствуют элементам концептуальной модели КФС, о которой речь шла ранее (см. параграфе 1.3), а индексы используемые в обозначениях данных векторов: «д», «о», «к», «р», «п», «е», «с», «в» – соответствуют моделям подсистем управления движением, операциями взаимодействия, каналами, ресурсами, потоками, параметрами операции, структурами и вспомогательными операциями в КФС, входящими в обобщённую концептуальную модель функционирования указанной системы.

Все указанные векторы, исходя из ранее описанной концептуальной модели функционирования КФС (см. параграфе 1.3), должны удовлетворять заданной системе пространственно-временных, технических и технологических ограничений, или, другими словами, должны принадлежать заданным областям:

$$u_{\text{пр}}(t) \in Q^{(\text{пр})}(x(t),t), v(x(t),t) \in V(x(t),t), \quad (1.20)$$

$$\xi(t) \in \Xi(x(t),t), \beta \in B, \quad (1.21)$$

$$x(t) \in X^{(\text{тр})}(t), \quad (1.22)$$

где  $Q^{(\text{пр})}(x(t))$  – заданная область допустимых программных управлений;  $V(x(t),t)$  – заданная область допустимых управляющих воздействий, реализуемых в РМВ;  $\Xi(x(t),t)$  – область допустимых возмущающих воздействий;  $B$  – область допустимых значений структурных параметров;  $X^{(\text{тр})}(t)$  – область допустимых текущих значений вектора состояния структурной динамики КФС.

Динамика изменения векторов состояния и выходных характеристик КФС может быть задана с помощью следующих переходных и выходных функций, которые, в общем случае, могут задаваться как в аналитическом, так и в алгоритмическом виде (возможен комбинированный вариант):

$$x(t) = \varphi(x(t), u_{\text{пр}}(t), v(x(t),t), \xi(t), \beta, t), \quad (1.23)$$

$$y(t) = \psi(x(t), u_{\text{пр}}(t), v(x(t),t), \xi(t), \beta, t). \quad (1.24)$$

Кроме перечисленных ограничений при формальной постановке проблемы управления структурной динамикой КФС необходимо задать ограничения, накладываемые на вектор  $x(t)$  в начальный –  $T_0$  и конечный –  $T_f$  моменты времени, соответствующие временному интервалу, на котором рассматривается управляемая структурная динамика КФС и объектов, входящих в её состав:

$$\mathbf{x}(T_0) \in X_0(\boldsymbol{\beta}), \mathbf{x}(T_f) \in X_f(\boldsymbol{\beta}). \quad (1.25)$$

Для оценивания эффективности процессов управления структурной динамикой КФС на этапе применения введём в рассмотрение следующий вектор показателей эффективности её функционирования:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\xi}(t), t) = \|\mathbf{J}^{(д)г}, \mathbf{J}^{(о)г}, \mathbf{J}^{(к)г}, \mathbf{J}^{(р)г}, \mathbf{J}^{(п)г}, \mathbf{J}^{(е)г}, \mathbf{J}^{(с)г}, \mathbf{J}^{(в)г}\|_{г}, \quad (1.26)$$

где  $\mathbf{J}^{(д)}$ ,  $\mathbf{J}^{(о)}$ ,  $\mathbf{J}^{(к)}$ ,  $\mathbf{J}^{(р)}$ ,  $\mathbf{J}^{(п)}$ ,  $\mathbf{J}^{(е)}$ ,  $\mathbf{J}^{(с)}$ ,  $\mathbf{J}^{(в)}$  – соответственно векторы показателей эффективности управления движением, операциями взаимодействия, каналами, ресурсами, потоками, параметрами операций, структурами, вспомогательными операциями в КФС [55].

С учётом вышеизложенного проблема управления структурной динамикой КФС на этапе её применения по целевому назначению предполагает формулировку и решение трёх основных классов задач.

**Задачи класса А** (задачи структурного анализа, анализа структурной динамики КФС при наличии и отсутствии входных воздействий).

**Дано:** (1.23), (1.24), (1.20) – (1.22), (1.25),  $t \in (T_0, T_f]$ .

**Необходимо найти:**  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $J_{об}(t)$  для  $t \in (T_0, T_f]$ .

**Задачи класса Б** (задачи оценивания (наблюдения), контроля, идентификации структурного состояния и структурной динамики КФС).

**Дано:** (1.23), (1.24), (1.20) – (1.22), (1.25),  $y(\tilde{t})$ ,  $\tilde{t} \in (t_0^{(н)}, t_f^{(к)}) \subset (T_0, T_f]$ .

**Необходимо найти:**  $\hat{\mathbf{x}}(t')$ ,  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$  оценку вектора структурного состояния и структурных параметров КФС для момента времени  $t'$ ,  $t' \in (T_0, T_f]$ .

**Задачи класса В** (задачи выбора управляющих воздействий и структурных параметров, обеспечивающих многокритериальный структурно-функциональный синтез текущего облика КФС и оптимальное управление её структурами).

**Дано:** (1.23), (1.24), (1.20) – (1.22), (1.25),  $t \in (T_0, T_f]$ , (1.26).

**Необходимо найти:**  $\mathbf{u}_{np}(t)$ ,  $\mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t)$ ,  $\boldsymbol{\beta}$  при которых выполняются (1.25), (1.20) – (1.22), а обобщённый показатель эффективности  $J_{об} = J_{об}(\mathbf{J}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}_{np}(t), \mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t), \boldsymbol{\xi}(t)))$  принимает экстремальное значение.

Ранее в параграфе 1.4 были сформулированы на теоретико-множественном уровне, задачи, которые предполагается решать в рамках сформулированной в диссертации общей проблемы. Анализ показывает, что задачи I-II классов относятся к задачам класса В, а задачи III класса относятся к задачам класса А. В последующих главах будут представлены конкретные пути решения перечисленных задач.

## 1.7. Выводы

1. Проведенный анализ главных тенденций, связанных с созданием и развитием промышленного интернета, показал, что его основное предназначение связано с реализацией перспективных технологий, способствующих широкомасштабному развитию клиент-ориентированных, мелкосерийных и гибких производств, главным отличием которых от крупных поточных линий является непостоянство (нестационарность) производственных процессов, а вместе с ними и характеристик соответствующих информационных потоков, а также вычислительных процессов. Таким образом для эффективного управления такими производствами, необходимо создать новую архитектуру, модели, методы, алгоритмы и программные комплексы управления соответствующими распределёнными КФС, объединёнными в промышленный интернет. При этом исследования показали, что перенос ряда функций обработки данных на КФС позволяет, во-первых, проводить «на месте» до 90% всей требуемой обработки данных, связанных процессами производства в промышленном интернете (что существенно может повлиять на их эффективность), и, во-вторых, снизить сетевые задержки и нагрузки на каналы связи, а также снизить вычислительную нагрузку на ресурсы облачных вычислений.

2. Установлено, что для организации такой распределенной обработки данных в промышленном интернете необходимо осуществлять динамическое ситуационное распределение вычислительных задач между встроенными системами, средствами связи и облачными вычислительными ресурсами. Такой подход получил название «туманные вычисления» (fog computing). При этом анализ современной отечественной и зарубежной литературы показал, что, к сожалению, как задачи синтеза технологий, так и задачи синтеза планов управления информационными процессами в промышленном интернете в явном виде не упоминаются (за редким исключением), и, тем более, современными технологическими и техническими методами не решаются. Данный пробел в проектировании и эксплуатации промышленного интернета традиционно объясняется сложностью указанной проблемы, большой размерностью соответствующих задач, большими затратами времени при попытках их строго решения, что приводит на практике к использованию различных эвристических методов и алгоритмов. Указанные обстоятельства объясняют особую актуальность, а также научную и практическую значимость формальной постановки и решения проблемы синтеза технологий и программ управления информационными процессами промышленного интернета для получения эталонных (наилучших) решений, относительно которых уже можно будет вводить обоснованно те или иные эвристики, исходя из практических соображений.

3. Проведено обобщенное формальное описание общей проблемы управления структурной динамикой КФС, которое 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, которые были получены в результате декомпозиции исходной проблемы и являются основными объектами исследования в рассматриваемой диссертации. При этом были предложены как графическая, так и теоретико-множественная формы описания данных задач, включающие описание задач I класса (задачи параметрической и структурной адаптации программно-математического обеспечения управления КФС) и описание задач II класса (задачи синтеза технологий и программ управления КФС, включающие в себя, в том числе, и задачи управления информационными процессами в промышленном интернете).

4. Разработаны методологические основы постановки и решения задачи управления структурной динамикой КФС, включающие в себя: концепции, принципы, подходы, используемые при создании специального программно-математического обеспечения синтеза технологий и программ управления информационными процессами, обеспечивающими эффективное функционирование промышленного интернета. Среди них в первую очередь были выделены: *концепция комплексного (системного) моделирования КФС*, которая предполагает разработку и реализацию новых принципов, подходов к проведению полимодельного описания рассматриваемых КФС, а также разработку и комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных управленческих решений (в том числе и связанных с их реконфигурацией), связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок; *концепция проактивного управления структурной динамикой КФС* в изменяющихся условиях, вызванных воздействием возмущающей среды. Проактивное управление, в отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления КФС, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение инцидентов, предполагает, как уже указывалось ранее, предотвращение возникновения инцидентов за счёт создания в соответствующей системе мониторинга и управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на методологии и технологиях системного (комплексного) моделирования; а также *концепция интеллектуализации управления*, предусматривающая в качестве условий эффективного управления КФС необходимость применения интеллектуальных инструментов управления (новых интеллектуальных информационных технологий), носящих ярко выраженный инновационный характер и направленных на достижение комплексной интеграции естественного и искусственного интеллектов.

5. В качестве *базовых принципов*, которые использовались при решении сформулированной проблемы были выбраны принципы неокончателных решений, поглощения разнообразия, иерархической компенсации, дополнителности, полимодельности и многокритериальности, самоподобного рекурсивного описания и моделирования объектов исследования, гомеостатического баланса взаимодействия; преодоление принципа разделения; принципы, положенные в основу создания онтологий; принципы Ле-Шателье–Брауна (любое внешнее воздействие порождает ответную реакцию самоорганизации, направленную на ослабление этого эффекта); принципы декомпозиции и агрегирования; принцип рационального многокритериального компромисса при наличии неустранимых пороговых информационных и временных ограничений; принцип интерактивного итерационного формирования решения в условиях неопределенности и противоречивости исходной информации.

6. Анализ основных путей решения общей проблемы управления структурной динамикой КФС, показал, что создание соответствующего математического и программного обеспечения целесообразно осуществлять на основе имитационных систем (ИМС). Проводимая в ИМС «сильная» интеграция аналитических и имитационных моделей, при которой происходит взаимная компенсация недостатков каждого из указанных классов моделей, позволяет получать качественно новые результаты при исследовании сложных динамических систем и процессов, к которым относятся как распределенные КФС, так и процессы их функционирования в рамках промышленного интернета.

7. Сформулированы общие и частные требования, предъявляемые к облику создаваемого математического и программного обеспечения решения задач синтеза технологий и программ управления информационными процессами промышленного интернета. Анализ данных требований показал, что решение сформулированной в диссертации проблемы требует комплексного подхода и должно базироваться на фундаментальных и прикладных результатах разрабатываемых диссертантом основ теории управления структурной динамикой КФС, представляющих широкий класс сложных технических объектов (СТО). Данная прикладная теория носит интегративный характер и гармонично объединяет фундаментальные и прикладные результаты, полученные в таких научных дисциплинах как системный анализ, теория систем, исследование операций, теория оптимального управления, инженерия знаний, теория принятия решений. Предварительный анализ показывает, что такое междисциплинарное рассмотрение исследуемой проблемы обеспечивает корректное доказательство полноты, замкнутости и непротиворечивости прикладных результатов, полученных в ходе выполняемых диссертационных исследований, на основе ранее выполненных доказательств подобных свойств у подобных объектов, но для других предметных областей.

## 2. Комплекс моделей для решения задач синтеза технологий и программ управления КФС

Рассмотрим в начале данной главы комплекс детерминированных логико-динамических моделей управления структурной динамикой КФС. Основы их описания заложены в работах [119, 124, 126], уточнены в работах [3, 55]. Далее уже остановимся на особенностях учёта факторов неопределённости в ранее построенных моделях.

### 2.1. Комплекс логико-динамических моделей управления структурной динамикой КФС

#### 2.1.1. Динамическая модель управления движением КФС

Из содержательной постановки задачи управления структурной динамикой КФС следует, что операции взаимодействия (ОВ) объектов КФС друг с другом, либо с объектами обслуживания (ОБО) могут выполняться лишь при попадании указанных объектов в зоны взаимодействия (ЗВ), которые задаются матричной временной функцией  $E(t) = \|\varepsilon_{ij}(t)\|$ ,  $i, j \in \{\bar{M} \cup \bar{M}\}$ , которую называют контактным потенциалом [56]. Элементы данной матрицы принимают значение 1, если объекты  $B_i$  и  $B_j$  попадают в ЗВ друг друга, 0 – в противном случае. Геометрические размеры и формы ЗВ определяются целым рядом факторов: видом взаимодействия (энергетическое, вещественное, информационное), техническими характеристиками аппаратно-программных средств, обеспечивающих это взаимодействие, пространственным расположением объектов и т.п.

Пусть состояние движения  $B_i$  объекта в любой момент времени определяется совокупностью двух векторов  $\mathbf{r}_i^{(д)}(t)$  и  $\dot{\mathbf{r}}_i^{(д)}(t)$ ,  $i \in \tilde{M} = \{M \cup \bar{M}\}$ , где  $\mathbf{r}_i^{(д)}(t)$  в общем случае трёхмерный радиус-вектор, характеризующий положение  $B_i$  объекта в пространстве,  $\dot{\mathbf{r}}_i^{(д)}(t)$  – вектор, характеризующий скорость движения объекта. Введём в рассмотрение вектор  $\mathbf{x}_i^{(д)} = \left\| \mathbf{r}_i^{(д)T} \dot{\mathbf{r}}_i^{(д)T} \right\|^T$ . Тогда состояние движения объекта  $B_i$  в каждый момент времени  $t \in (T_0, T_f]$  будет определяться  $\mathbf{x}_i^{(д)}$ . В этих условиях модель управления движением объектами КФС (модель  $M_d$ ) будет включать в себя следующие основные элементы.

Модель процесса движения объектов  $M_d$ :

$$\dot{\mathbf{x}}_i^{(д)} = \mathbf{f}_i^{(д)}(\mathbf{x}_i^{(д)}, \mathbf{u}_i^{(д)}, t). \quad (2.1)$$

Ограничения

$$\mathbf{q}^{(д)}(\mathbf{x}^{(д)}, \mathbf{u}^{(д)}, t) \leq \mathbf{O}. \quad (2.2)$$

Краевые условия

$$\mathbf{h}_0^{(д)}(\mathbf{x}^{(д)}(T_0)) \leq \mathbf{O}, \quad \mathbf{h}_1^{(д)}(\mathbf{x}^{(д)}(T_f)) \leq \mathbf{O}. \quad (2.3)$$

Показатели качества программного управления

$$J_1^{(д)} = \varphi^{(д)}(\mathbf{x}^{(д)}(T_f)); \quad (2.4)$$

$$J_2^{(д)} = \int_{T_0}^{T_f} f_0^{(д)}(\mathbf{x}^{(д)}(\tau), \mathbf{u}^{(д)}(\tau), \tau) d\tau, \quad (2.5)$$

где  $\mathbf{x}^{(д)} = \|\mathbf{x}_1^{(д)T}, \mathbf{x}_2^{(д)T}, \dots, \mathbf{x}_{m+\bar{m}}^{(д)T}\|^T$  – вектор, характеризующий состояние движения КФС и ОБО,  $M = 1, \dots, m$ ,  $\bar{M} = 1, \dots, \bar{m}$ ;  $\mathbf{u}^{(д)} = \|\mathbf{u}_{пр}^{(д)T}(t), \mathbf{v}^{(д)T}(\mathbf{x}(t), t)\|^T$ ;  $\mathbf{u}^{(д)} = \|\mathbf{u}_1^{(д)T}, \dots, \mathbf{u}_{m+\bar{m}}^{(д)T}\|^T$ .

Функции, перечисленные в (2.1) – (2.5), предполагаются известными, заданными в аналитическом виде, непрерывно дифференцируемыми во всём пространстве переменных, относительно компонент векторов управляющих воздействий  $\mathbf{u}^{(д)}(t)$  будем предполагать, что они являются измеримыми по Лебегу функциями, определёнными на интервале  $(T_0, T_f]$ .

В этом случае контактный потенциал пары объектов  $\langle B_i, B_j \rangle$  может быть вычислен по формуле [56, 119]:

$$\varepsilon_{ij}(t) = \gamma_+ \left\{ R_j^{(д)} - \left| \mathbf{r}_i^{(д)}(t) - \mathbf{r}_j^{(д)}(t) \right| \right\}, \quad (2.6)$$

где  $ij \in \tilde{M}$ ,  $\gamma_+(\tilde{\alpha}) = 1$ , если  $\tilde{\alpha} \geq 0$ ,  $\gamma_+(\tilde{\alpha}) = 0$ , если  $\tilde{\alpha} < 0$ ;  $R_j^{(д)}(t)$  – заданный радиус зоны взаимодействия объекта  $B_j$ , представляющий из себя в общем случае замкнутый шар.

Из анализа (2.1) – (2.6) следует, что стационарные (неподвижные) элементы и подсистемы КФС, ОБО можно рассматривать как частный случай подвижных объектов, для которых  $\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{r}_i(t_0) = \mathbf{r}_{i0}$ ,  $\forall t \in (T_0, T_f]$ ,  $\mathbf{r}_{i0}$  – вектор, определяющий местоположение объекта. Уравнения (2.1) – (2.6) записаны в общем виде, так как их конкретизация возможна только при задании определённой системы сил, действующих на объекты при движении, выборе системы отсчёта и т.п., что в конечном итоге определяется спецификой перемещения каждого объекта КФС, ОБО. Конкретный вид модель  $M_d$  получит в дальнейшем при создании прототипа программного комплекса, моделирующего структурную динамику КФС.



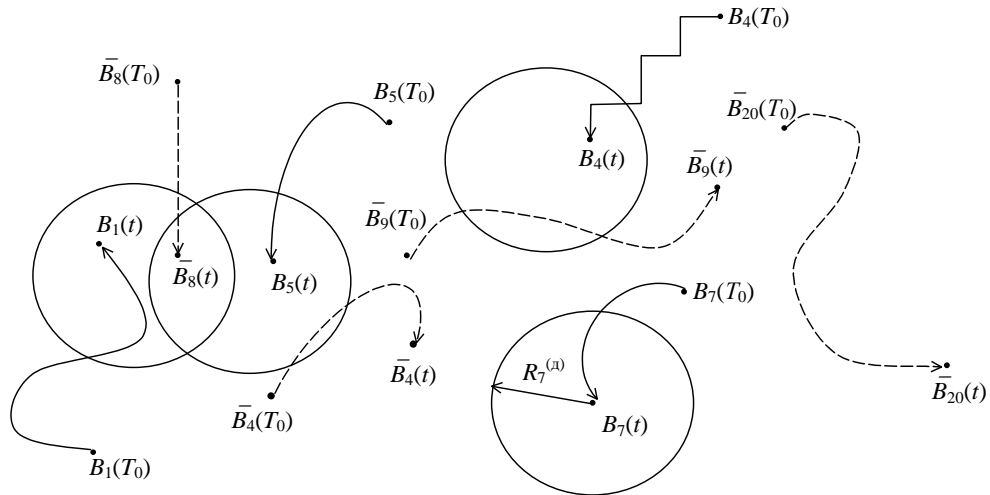


Рисунок 10. Возможные ситуации, связанные с перемещением и взаимодействием объектов КФС с объектами обслуживания

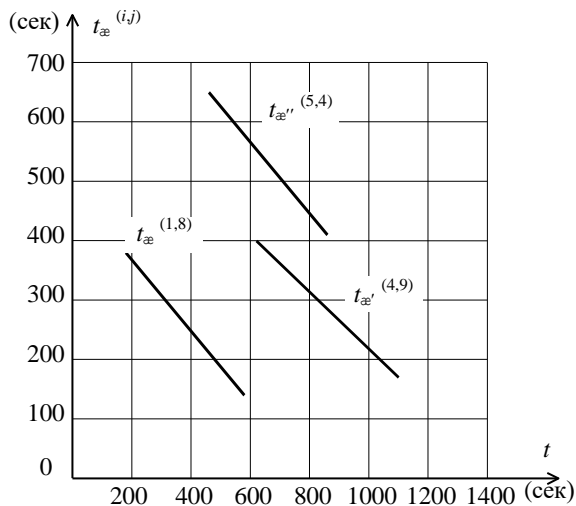


Рисунок 11. Графики зависимости длительности перемещения объектов  $B_j$  от моментов времени начала движения

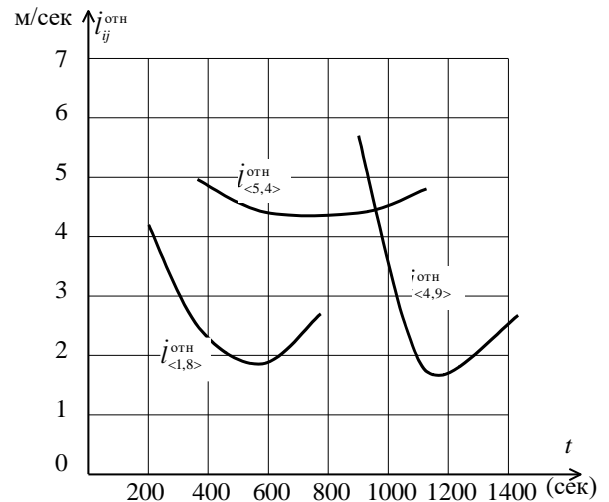


Рисунок 12. Графики зависимости, связывающие относительную скорость перемещения объектов  $B_i$  и  $B_j$  и моменты времени начала движения

На рисунке 10 приведены возможные ситуации обслуживания при перемещении объектов  $B_i$  и  $B_j$  на плоскости. На рисунке 11 изображён график зависимости, связывающие длительность перемещения объекта  $B_j$  в ЗВ объекта  $B_i$  в зависимости от момента времени, определяющего начало движения объекта  $B_j$ ; на рисунке 12 изображён для примера график зависимости, связывающий относительную скорость перемещения объектов  $B_i$  и  $B_j$  в ЗВ с временем начала движения объекта  $B_j$ .

### 2.1.2. Динамическая модель управления операциями, проводимыми КФС

При построении данной и последующих моделей будем использовать динамическую интерпретацию происходящих в КФС событий. Подробно речь об указанном подходе велась в п. 1.3. Модель управления операциями, проводимыми КФС, включает в себя следующие основные элементы [56, 118, 119].

*Модель процесса управления операциями  $M_0$*

$$\dot{x}_v^{(0,1)} = \sum_{j=1}^m u_{vj}^{(0,1)}; \dot{x}_{i\alpha}^{(0,2,v)} = \sum_{j=1}^m \sum_{\lambda=1}^{l_j} \varepsilon_{ij}(\tau) \Theta_{i\alpha j \lambda}(\tau) u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)}; \dot{x}_{vj}^{(0,3)} = u_{vj}^{(0,3)}; \quad (2.7)$$

$$v=1, \dots, n; j=1, \dots, m; i=1, \dots, m; \alpha=1, \dots, s_i.$$

*Ограничения*

$$\sum_{j=1}^m u_{vj}^{(0,1)} \left[ \sum_{\alpha \in \Gamma_{v1}} (a_{\alpha}^{(0,1)} - x_{\alpha}^{(0,1)}(t)) + \prod_{\beta \in \Gamma_{v2}} (a_{\beta}^{(0,1)} - x_{\beta}^{(0,1)}(t)) \right] = 0; \quad (2.8)$$

$$\sum_{\lambda=1}^{l_j} u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)} \left[ \sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{i\alpha 1}} (a_{i\tilde{\alpha}}^{(0,2,v)} - x_{i\tilde{\alpha}}^{(0,2,v)}(t)) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{i\alpha 2}} (a_{i\tilde{\beta}}^{(0,2,v)} - x_{i\tilde{\beta}}^{(0,2,v)}(t)) \right] = 0; \quad (2.9)$$

$$\sum_{v=1}^u u_{vj}^{(0,1)}(t) \leq 1, \forall j; \sum_{j=1}^m u_{vj}^{(0,1)}(t) \leq 1, \forall j; u_{vj}^{(0,1)}(t) \in \{0,1\}; \quad (2.10)$$

$$u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)}(t) \in \{0, u_{vj}^{(0,1)}\}; u_{vj}^{(0,3)}(t) \in \{0,1\}; u_{vj}^{(0,3)}(a_{js_i}^{(0,2,v)} - x_{js_j}^{(0,2,v)}(t)) = 0. \quad (2.11)$$

*Краевые условия*

$$h_0^{(o)}(x^{(o)}(T_0)) \leq O; \quad h_1^{(o)}(x^{(o)}(T_f)) \leq O. \quad (2.12)$$

*Показатели качества программного управления*

$$J_1^{(o)} = \sum_{v=1}^n \sum_{j=1}^m u_{vj}^{(0,3)}(T_f); J_{<2,\alpha,v>}^{(o)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (x_{\alpha i}^{(0,3)}(T_f) - x_{vj}^{(0,3)}(T_f)); J_3^{(o)} = T_f - \sum_{j=1}^m x_{nj}^{(0,1)}(T_f); \quad (2.13)$$

$$J_{<4,i,v>}^{(o)} = \sum_{v,j,\lambda,\alpha} \int_{T_0}^{T_f} \varepsilon_{ij}(\tau) \Theta_{i\alpha j \lambda}(\tau) u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)}(\tau) d\tau, j=1, \dots, m; \lambda=1, \dots, l_j; \alpha=1, \dots, s_i; \quad (2.14)$$

$$J_{<5,i>}^{(o)} = \int_{T_0}^{T_f} \max_j \varepsilon_{ij}(\tau) d\tau, j \neq i; \quad (2.15)$$

$$J_{<6,i>}^{(o)} = \sum_{v,j,\alpha} \int_{T_0}^{T_f} [\varepsilon_{ij}(\tau) - \varepsilon_{ij}(\tau) u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)}(\tau)] d\tau; \quad (2.16)$$

$$J_7^{(o)} = \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{s_i} (a_{i\alpha}^{(0,2,v)} - x_{i\alpha}^{(0,2,v)}(T_f))^2; \quad (2.17)$$

$$J_8^{(o)} = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{j=1}^m \sum_{\lambda=1}^{l_j} \int_{T_0}^{T_f} \tilde{\alpha}_{i\alpha j \lambda}^{(v)}(\tau) u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)}(\tau) d\tau; \quad (2.18)$$

$$J_9^{(o)} = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{j=1}^m \sum_{\lambda=1}^{l_j} \int_{T_0}^{T_f} \tilde{\beta}_{i\alpha j \lambda}^{(v)}(\tau) u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)}(\tau) d\tau, \quad (2.19)$$

где  $x_v^{(0,1)}(t)$  – переменная, значение которой в момент времени  $t$  численно равняется длительности решения задачи  $A_v$  на объектах  $B_j$  ( $j = 1, \dots, m$ );  $x_{i\alpha}^{(0,2,v)}(t)$  – переменная, характеризующая состояния выполнения операции  $D_{\alpha}^{(i)}$  (либо  $D_{\alpha}^{(i,j)}$ ) при решении задачи  $A_v$ ;  $x_v^{(0,3)}(t)$  – переменная, численно равная длительности интервала времени от момента завершения решения задачи  $A_v$  на объекте  $B_j$  до момента  $t = T_f$ ;  $a_{\alpha}^{(0,1)}, a_{\beta}^{(0,1)}, a_{i\tilde{\alpha}}^{(0,2,v)}, a_{i\tilde{\beta}}^{(0,2,v)}, a_{is_i}^{(0,2,v)}, a_{i\alpha}^{(0,1,v)}$  – заданные величины (краевые условия), значения которых должны (либо могут) принять соответствующие переменные  $x_{\alpha}^{(0,1)}(t), x_{\beta}^{(0,1)}(t), x_{i\tilde{\alpha}}^{(0,2,v)}(t), x_{i\tilde{\beta}}^{(0,2,v)}(t), x_{is_i}^{(0,2,v)}(t), x_{i\alpha}^{(0,1,v)}(t)$  в конце интервала управления КФС в момент времени  $t = T_f$ ;  $u_{vj}^{(0,1)}(t), u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)}(t), u_{vj}^{(0,3)}(t)$  – управляющие воздействия, при этом  $u_{vj}^{(0,1)}(t) = 1$ , если задача  $A_v$  решается на объекте  $B_j$ ;  $u_{vj}^{(0,1)}(t) = 0$  – в противоположном случае;  $u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)}(t) = 1$ , если операция  $D_{\alpha}^{(i)}$  (либо  $D_{\alpha}^{(i,j)}$ ) выполняется при решении задачи  $A_v$  с использованием соответствующего канала,  $u_{i\alpha j \lambda}^{(0,2,v)}(t) = 0$  – в противоположном случае;  $u_{vj}^{(0,3)}(t) = 1$  в момент времени, соответствующий окончанию решения задачи  $A_v$  на объекте  $B_j$  и во все последующие моменты времени до  $t = T_f$ ,  $u_{vj}^{(0,3)}(t) = 0$  – в противоположных ситуациях;  $\Gamma_{v1}, \Gamma_{v2}$  – множество номеров задач  $A_{\tilde{v}}$ , непосредственно предшествующих и технологически связанных с задачей  $A_v$  с помощью логических операций «И», «ИЛИ» (либо альтернативное ИЛИ») соответственно;  $\Gamma_{i\alpha 1}, (\Gamma_{i\alpha 2})$  – множество номеров операций взаимодействия, проводимых с объектом  $B_i$ , непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией  $D_{\alpha}^{(i,j)}$  (либо  $D_{\alpha}^{(i)}$ ) с помощью логических операций «И», («ИЛИ» либо альтернативное ИЛИ) соответственно;  $h_0^{(o)}, h_1^{(o)}$  – известные дифференцируемые функции, с помощью которых задаются краевые условия, накладываемые на вектор  $\mathbf{x}^{(o)} = \left\| x_1^{(0,1)}, \dots, x_n^{(0,1)}, x_{11}^{(0,2)}, \dots, x_{m s_m}^{(0,2)}, x_{11}^{(0,3)}, \dots, x_{nm}^{(0,3)} \right\|^T$  в моменты времени  $t = T_0$  и  $t = T_f$ . В табл. 1 приведены примеры возможных вариантов сочетаний краевых условий в рассматриваемых задачах.

В дальнейшем основное внимание будет уделено следующим вариантам задания краевых условий:

вариант К1: (<1,1>, <3,6>);

вариант К3: (<1,3>, <3,4>);

вариант К2:  $\langle 1,1 \rangle, \langle 3,4 \rangle$ ; вариант К3:  $\langle 1,3 \rangle, \langle 3,6 \rangle$ ,

где в каждом варианте в первом кортеже на первом месте стоит номер варианта задания начального момента времени  $t = T_0$ , на втором – вариант задания  $x(T_0)$ , во втором кортеже соответственно  $t = T_f$  и  $x(T_f)$ .

Таким образом, с помощью ограничений (2.8), (2.9) задаются возможные (альтернативные) последовательности решения задач  $A_v$  и выполнения соответствующих операций. Согласно ограничениям (2.10) в каждый текущий момент времени задача  $A_v$  может решаться только на одном объекте  $B_j$  ( $v = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$ ) и, наоборот, на каждом объекте  $B_j$  в каждый текущий момент времени может решаться только одна задача  $A_v$  (указанные ограничения соответствуют ограничениям классической задачи о назначениях [91]). В табл. 2 приведены возможные варианты ограничений, накладываемых на управляющие воздействия  $u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2,v)}(t)$  для различных ситуаций обслуживания в КФС.

Таблица 1 – Примеры возможных вариантов сочетаний краевых условий

Моменты времени t		Вектор состояния x		Вектор состояния в начальный момент времени x(t0)			Вектор состояния в конечный момент времени x(tf)		
		фиксированный	нефиксированный	нефиксированный		фиксированный	нефиксированный		
				свободный	частично-свободный		свободный	частично-свободный	
		1	2	3	4	5	6		
Начальный момент времени t0	фиксированный	1	$\langle 1,1 \rangle$	$\langle 1,2 \rangle$	$\langle 1,3 \rangle$	–	–	–	
	нефиксированный	2	$\langle 2,1 \rangle$	$\langle 2,2 \rangle$	$\langle 2,3 \rangle$	–	–	–	
Конечный момент времени tf	фиксированный	3	–	–	–	$\langle 3,4 \rangle$	$\langle 3,5 \rangle$	$\langle 3,6 \rangle$	
	нефиксированный	4	–	–	–	$\langle 4,4 \rangle$	$\langle 4,5 \rangle$	$\langle 4,6 \rangle$	

Таблица 2 – Возможные варианты ограничений

Номер варианта	Вариант задания ограничений	Номер варианта	Вариант задания ограничений
1	$\sum_{i=1}^m u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} \leq c_{\alpha j\lambda}^{(0,1)}$	8	$\sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{\lambda=1}^{l_j} \sum_{j=1}^m u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} \leq c_j^{(0,8)}$
2	$\sum_{j=1}^m u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} \leq c_{i\alpha\lambda}^{(0,2)}$	9	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} \leq c_{\alpha\lambda}^{(0,9)}$
3	$\sum_{\alpha=1}^{s_i} u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} \leq c_{ij\lambda}^{(0,3)}$	10	$\sum_{\lambda=1}^{l_j} \sum_{i=1}^m u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} \leq c_{j\alpha}^{(0,10)}$
4	$\sum_{\lambda=1}^{l_j} u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} \leq c_{i\alpha j}^{(0,4)}$	11	$\sum_{i=1}^m \sum_{\lambda=1}^{l_j} u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} \leq c_{j\lambda}^{(0,11)}$

5	$\sum_{\lambda=1}^{l_j} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} \leq C_{\alpha}^{(o,5)}$	12	$\sum_{\lambda=1}^{l_j} \sum_{j=1}^m u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} \leq C_{i\alpha}^{(o,12)}$
6	$\sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} \leq C_{\lambda}^{(o,6)}$	13	$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{s_i} u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} \leq C_{i\lambda}^{(o,13)}$
7	$\sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{i=1}^m \sum_{\lambda=1}^{l_j} u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} \leq C_j^{(o,7)}$	14	$\sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{\lambda=1}^{l_j} u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} \leq C_{ij}^{(o,14)}$

В табл. 1, 2 и последующих формулах для простоты записи будем предполагать, что индекс номера задачи  $A_v$ , решаемой в КФС, зафиксирован иона закреплена за  $B_j$  объектом. Поэтому в дальнейшем этот индекс будем опускать. С помощью соотношений (2.11) задаются условия, при которых возможно выполнение комплексов операций, а также срабатывание вспомогательного управляющего воздействия  $u_{vj}^{(0,3)}(t)$ ;  $J_1^{(o)} \div J_9^{(o)}$  – показатели качества управления операциями, проводимыми КФС. При этом показатель  $J_1^{(o)}$  характеризует общее число реализованных в КФС задач на момент времени  $t = T_f$ ;  $J_{<2,\alpha,v>}^{(o)}$  – показатель, характеризующий длительность временного интервала, на котором выполнялась задача  $A_v$ ;  $J_3^{(o)}$  – показатель, численно равный длительности временного интервала, за который в КФС могут быть решены все требуемые задачи  $A_v$ ,  $v = 1, \dots, n$ ;  $J_{<4,i,v>}^{(o)}$  – показатель, численно равный длительности временного интервала, на котором выполняется комплекс операций обслуживания объекта  $B_i$  при решении задачи  $A_v$ ;  $J_{<5,i>}^{(o)}$  – величина, численно равная общей продолжительности (общему времени) нахождения объекта  $B_i$  в ЗВ объекта  $B_j$ .

Показатель (2.16) численно равен длительности интервала времени, в течение которого объект  $B_i$  ожидает обслуживания. Показатель (2.17) вводится в том случае, если необходимо оценить точность выполнения краевых условий, либо минимизировать потери, вызванные невыполнением операций взаимодействия. Используя функционалы (2.18), (2.19), можно косвенно оценить соответственно качество ОВ, точность выполнения директивных сроков выполнения ОВ. При этом  $\tilde{\alpha}_{i\alpha j\lambda}^{(v)}(\tau)$  – заданные гладкие функции времени (весовые функции), с помощью которых оценивают качество ОВ;  $\tilde{\beta}_{i\alpha}^{(v)}(\tau)$  – некоторые заданные монотонно возрастающие (либо убывающие) функции времени, которые выбираются с учётом заданных директивных сроков начала (конца) выполнения ОВ. На рисунках 13, 14, 15 приведены результаты моделирования процессов управления произвольными ОВ в КФС.

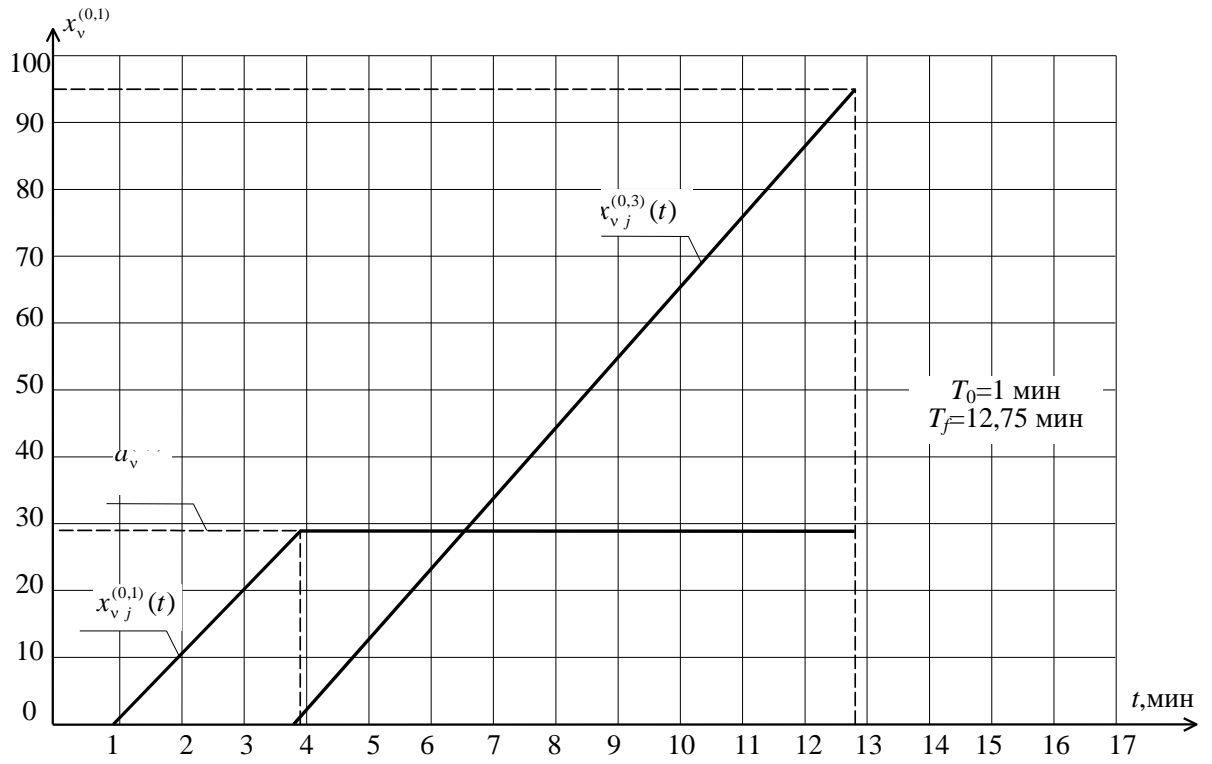


Рисунок 13. График значений переменных состояния операций

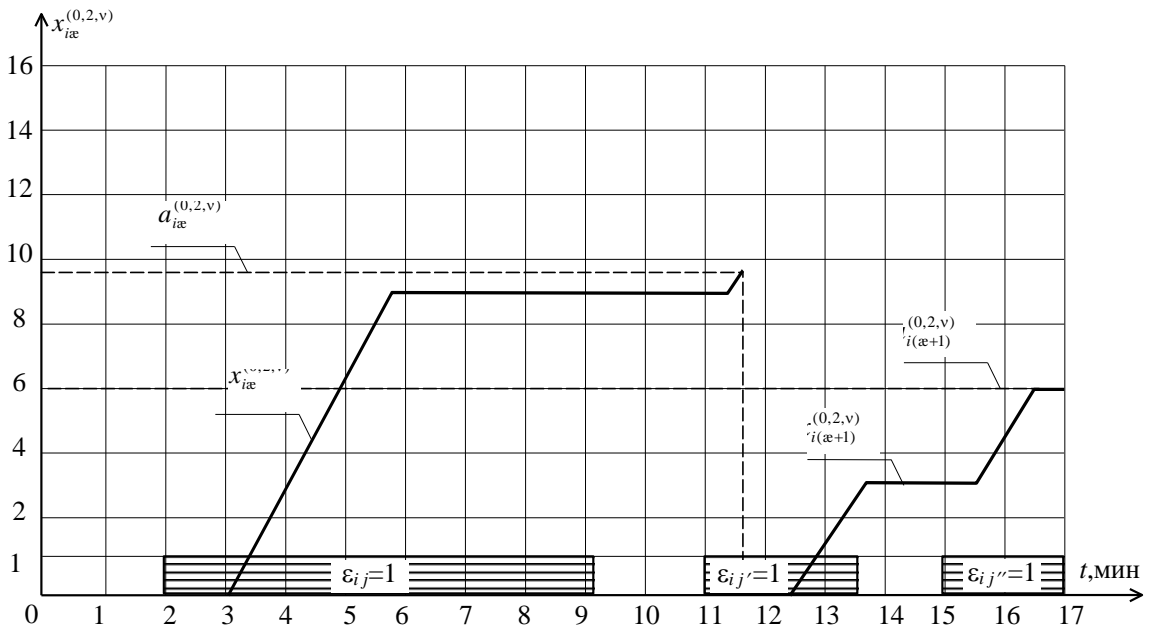


Рисунок 14. Влияние контактного потенциала

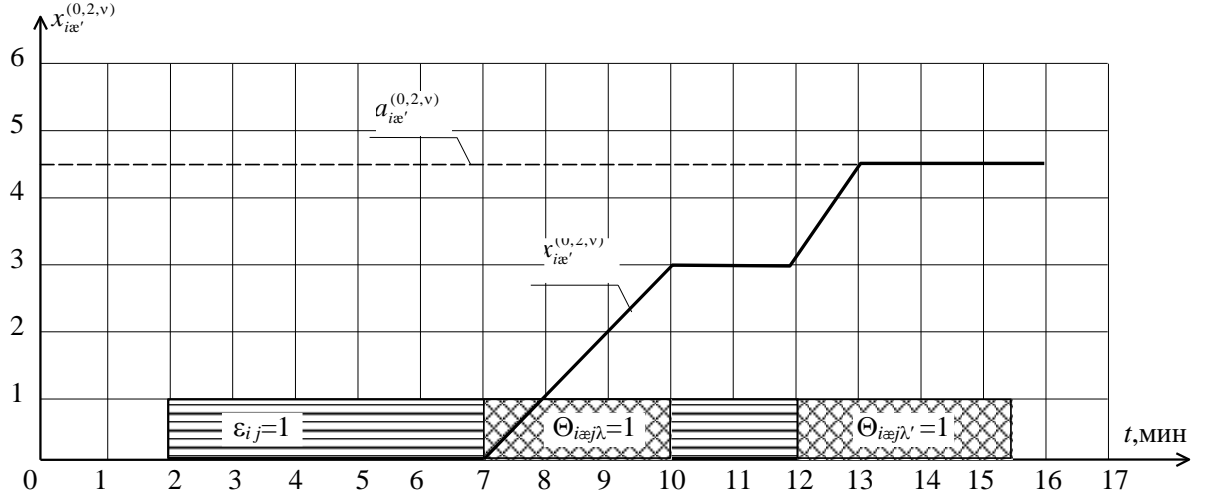


Рисунок 15. Суммарное влияние контактного потенциала и потенциала доступности

### 2.1.3. Динамическая модель управления каналами в КФС

Состояние канала  $C_\lambda^{(i)}$  на объекте  $B_i$  будем характеризовать степенью готовности канала к проведению операции  $D_x^{(i,j)}$  [135]. Для простоты записи последующих формул, как в п. 2.2, будем предполагать, что индекс номера задачи  $A_v$ , решаемой в КФС, зафиксирован и она закреплена за  $B_j$  объектом. Поэтому в дальнейшем этот индекс будем опускать. В этом случае динамическая модель, описывающая процессы переналадки каналов, примет следующий вид.

*Модель процесса управления каналами*

$$\dot{x}_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)} = \sum_{j'=1}^m \sum_{\alpha'=1}^{s_i} \Theta_{i'\alpha'j\alpha} u_{i'\alpha'j\lambda}^{(\kappa,1)} \frac{b_{i'\alpha'j\alpha}^{(j,\lambda)} - x_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}}{x_{i'\alpha'j\lambda}^{(\kappa,1)}}; \quad (2.20)$$

$$\dot{x}_{j\lambda}^{(\kappa,2)} = \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{s_i} (u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} + u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}). \quad (2.21)$$

*Ограничения*  $u_{i\alpha j\lambda}^{(0,2)} x_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)} = 0; \quad x_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}(t) \in \{0,1\}; \quad (2.22)$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^{s_i} u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}(t) \leq 1, \quad \forall j, \forall \lambda. \quad (2.23)$$

*Краевые условия*  $h_0^{(\kappa)}(x^{(\kappa)}(T_0)) \leq O; \quad h_1^{(\kappa)}(x^{(\kappa)}(T_f)) \leq O. \quad (2.24)$

*Показатели качества программного управления*

$$J_1^{(\kappa)} = \sum_{\Delta_1=1}^{m-1} \sum_{\Delta_2=\Delta_1+1}^m \sum_{\lambda=1}^l \sum_{\zeta=1}^l \int_{T_0}^{T_f} (x_{\Delta_1\lambda}^{(\kappa,2)}(\tau) - x_{\Delta_2\zeta}^{(\kappa,2)}(\tau)) d\tau; \quad (2.25)$$

$$J_2^{(\kappa)} = \sum_{\Delta_1=1}^{m-1} \sum_{\Delta_2=\Delta_1+1}^m \sum_{\lambda=1}^l \sum_{\zeta=1}^l (x_{\Delta_1\lambda}^{(\kappa,2)}(T_f) - x_{\Delta_2\zeta}^{(\kappa,2)}(T_f)), \quad (2.26)$$

где  $x_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}(t)$  – состояние канала  $C_\lambda^{(i)}$  объекта  $B_j$  при переналадке из состояния готовности к выполнению ОВ  $D_{\alpha'}^{(i,j)}$  в состояние готовности к выполнению ОВ  $D_\alpha^{(i,j)}$ ;  $b_{i'\alpha' i\alpha}^{(j,\lambda)}$  – заданная величина, численно равная длительности процесса переналадки канала из соответствующих состояний;  $u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}(t)$  – управляющее воздействие, при этом  $u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}(t)=1$ , если  $C_\lambda^{(i)}$  канал находится в состоянии переналадки,  $u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}(t)=0$  – в противоположном случае. Ограничения (2.22) – (2.23) определяют очерёдность по переналадке канала  $C_\lambda^{(i)}$  и условия, при которых возможна переналадка канала  $C_\lambda^{(i)}$ ; переменная  $x_{j\lambda}^{(\kappa,2)}(t)$  численно равна длительности временного интервала, в течение которого задействован канал  $C_\lambda^{(i)}$ . Как и в предыдущей модели  $h_0^{(\kappa)}, h_1^{(\kappa)}$  – известные дифференцируемые функции, с помощью которых задаются краевые условия, накладываемые на вектор  $x^{(\kappa)} = \left\| u_{1111}^{(\kappa,1)}, \dots, u_{msml}^{(\kappa,1)}, u_{11}^{(\kappa,2)}, \dots, u_{ml}^{(\kappa,2)} \right\|^T$ .

Показатели вида (2.25), (2.26) соответственно предназначены для оценивания степени равномерности использования каналов КФС в каждый момент времени  $t \in (T_0, T_f]$  и в момент окончания интервала управления.

На рисунках 16, 17 представлены результаты моделирования процессов управления переналадкой и задействованием каналов объектов  $B_j$ , входящих в состав КФС.

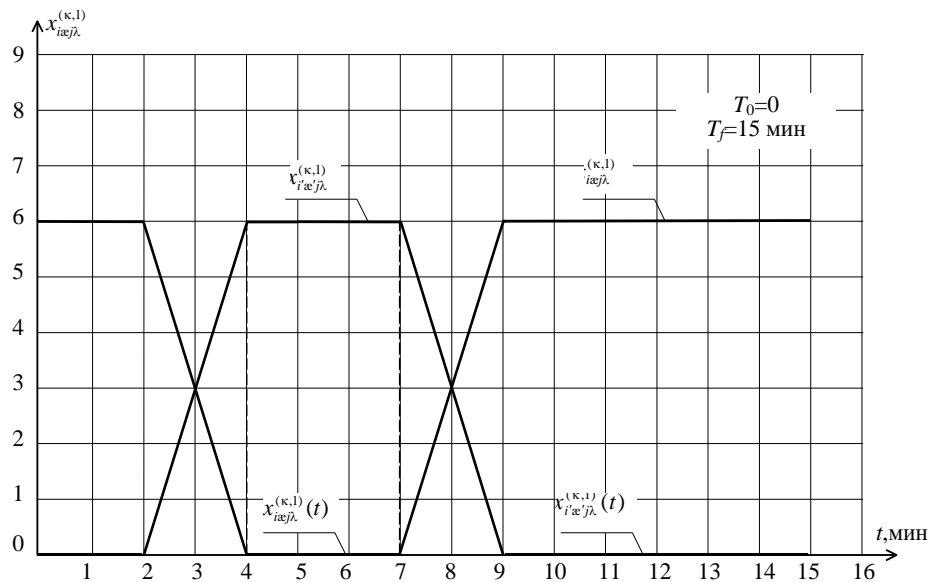


Рисунок 16. Значение переменной состояния операции при переналадке



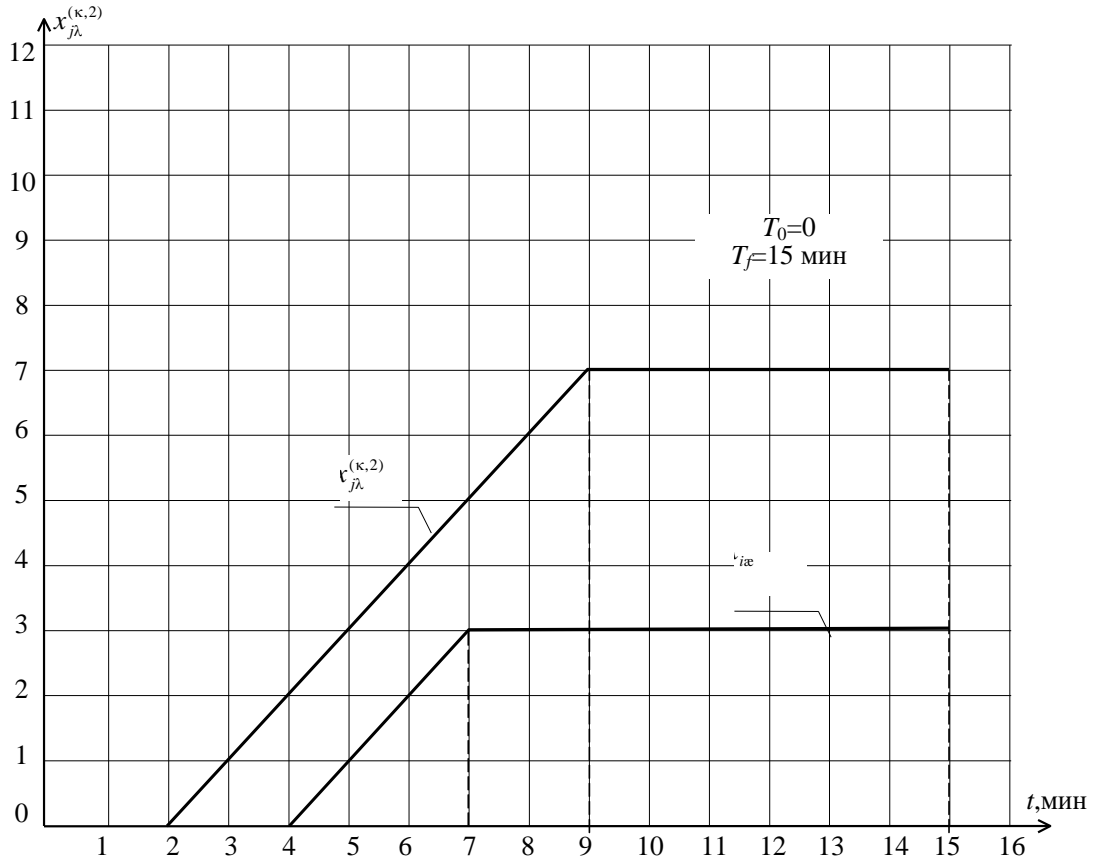


Рисунок 17. Значение переменной состояния ресурса при переналадке

#### 2.1.4. Динамическая модель управления ресурсами КФС

При построении модели  $M_p$  будем исходить из классификации ресурсов КФС, которая была проведена ранее в параграфе 1.4. Тогда для ситуаций, когда при выполнении ОБ  $D_x^{(i,j)}$  (либо  $D_x^{(i)}$ ,  $i=j$ ) объектов  $B_i$  и  $B_j$  задействуются каналы  $C_\lambda^{(i)}, C_\lambda^{(j)}$ , модели управления непополняемыми (пополняемыми), нескладируемыми (складируемыми) ресурсами на объекте  $B_j$  запишутся соответственно в следующем виде.

*Модель процесса управления ресурсами*

$$\dot{x}_{j\lambda\pi}^{(p,1)} = - \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{S_i} d_{i\alpha j\lambda}^{(\pi)} (u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} + u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}); \quad (2.27)$$

$$\dot{x}_{j\lambda\mu}^{(p,2)} = - \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{S_i} g_{i\alpha j\lambda}^{(\mu)} (u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} + u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}); \quad (2.28)$$

$$\dot{x}_{j\lambda\pi\eta}^{(p,1)} = - \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{S_i} d_{i\alpha j\lambda}^{(\pi)} (u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} + u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}) + u_{j\lambda\pi(\eta-1)}^{(p,1)}; \quad (2.29)$$

$$\dot{x}_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,2)} = - \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{S_i} g_{i\alpha j\lambda}^{(\mu)} (u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} + u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}) + u_{j\lambda\mu(\eta'-1)}^{(p,2)}; \quad (2.30)$$

$$\dot{x}_{j\lambda\pi}^{(p,3)} = u_{j\lambda\pi}^{(p,1)}; \quad \dot{x}_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,4)} = u_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,2)}. \quad (2.31)$$

*Ограничения*

$$\sum_{i,\alpha,\lambda} d_{i\alpha j\lambda}^{(\pi)} (u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)} + u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}) \leq \tilde{H}_j^{(\pi)}(t); \quad (2.32)$$

$$\sum_{i,\alpha,\lambda} \int_{T_0}^{T_f} g_{i\alpha j\lambda}^{(\mu)} (u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)}(\tau) + u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}(\tau)) d\tau \leq \int_{T_0}^{T_f} \tilde{H}_j^{(\mu)}(\tau) d\tau; \quad (2.33)$$

$$u_{j\lambda\pi\eta}^{(p,1)} (a_{j\lambda\pi(\eta-1)}^{(p,3)} - x_{j\lambda\pi(\eta-1)}^{(p,3)}) = 0, \quad u_{j\lambda\pi\eta}^{(p,1)} x_{j\lambda\pi\eta}^{(p,1)} = 0. \quad (2.34)$$

$$u_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,2)} (a_{j\lambda\mu(\eta'-1)}^{(p,4)} - x_{j\lambda\mu(\eta'-1)}^{(p,4)}) = 0, \quad u_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,2)} x_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,2)} = 0. \quad (2.35)$$

$$u_{j\lambda\pi\eta}^{(p,1)}(t), u_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,2)}(t) \in \{0,1\}, \quad \eta = 1, \dots, \tilde{\rho}_\lambda; \quad \eta' = 1, \dots, \tilde{\rho}'_\lambda. \quad (2.36)$$

*Краевые условия*

$$h_0^{(p)}(x^{(p)}(T_0)) \leq O; \quad h_1^{(p)}(x^{(p)}(T_f)) \leq O. \quad (2.37)$$

*Показатели качества программного управления ресурсами*

$$J_{1j\pi}^{(p)} = \sum_{\lambda=1}^{l_j} \sum_{\eta=1}^{\tilde{\rho}_\lambda} x_{j\lambda\pi\eta}^{(p,3)}; \quad (2.38)$$

$$J_{2j\mu}^{(p)} = \sum_{\lambda=1}^{l_j} \sum_{\eta'=1}^{\tilde{\rho}'_\lambda} x_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,4)}, \quad (2.39)$$

где  $x_{j\lambda\pi}^{(p,1)}(t), x_{j\lambda\mu}^{(p,2)}(t), x_{j\lambda\pi\eta}^{(p,1)}(t), x_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,2)}(t)$  – соответственно переменные,

характеризующие текущий объём нескладируемого ресурса  $\Phi S_\pi^{(j)}$ , складируемого ресурса  $\Phi N_\mu^{(j)}$ , нескладируемого пополняемого и складируемого пополняемого (на этапах  $\eta$  и  $\eta'$ ) ресурсов, используемых при функционировании канала  $C_\lambda^{(j)}$ ;  $d_{i\alpha j\lambda}^{(\pi)}, g_{i\alpha j\lambda}^{(\mu)}$  – заданные интенсивности расхода нескладируемого  $\Phi S_\pi^{(j)}$  и складируемого ресурса  $\Phi N_\mu^{(j)}$  при выполнении ОВ  $D_\alpha^{(i,j)}$  и проведении переналадки канала  $C_\lambda^{(j)}$  с единичной интенсивностью;  $\tilde{H}_j^{(\pi)}(t), \tilde{H}_j^{(\mu)}(t)$  – известные интенсивности поступления (пополнения) ресурсов  $\Phi S_\pi^{(j)}$  и  $\Phi N_\mu^{(j)}$  соответственно. Если указанные виды ресурсов не являются пополняемыми, то в правых частях соотношений (2.32), (2.33) будет стоять фиксированные величины  $\tilde{H}_j^{(\pi)}, \tilde{H}_j^{(\mu)}$ , которые будут интерпретироваться как максимальные возможные интенсивности расхода соответствующих ресурсов в каждый момент времени.

В том случае, если имеется возможность на  $B_j$  объекте организовать процесс пополнения (регенерации) ресурсов, то вводятся уравнения вида (2.29) – (2.31), в которых  $u_{j\lambda\pi\eta}^{(p,1)}, u_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,2)}$  – управляющие воздействия, регулирующие ход пополнения (регенерации) нескладируемых и

складируемых ресурсов;  $a_{j\lambda\pi(\eta-1)}^{(p,3)}, a_{j\lambda\mu(\eta'-1)}^{(p,4)}$  – заданный объём выполнения операции пополнения (регенерации)  $\Phi S_{\pi}^{(j)}$  нескладируемого ресурса ( $\Phi N_{\mu}^{(j)}$  – складируемого ресурса) на  $(\eta-1)$ -м цикле (на  $(\eta'-1)$ -м цикле) пополнения (регенерации);  $\tilde{\rho}_{\lambda}, \tilde{\rho}'_{\lambda}$  – общее допустимое число циклов регенерации соответствующих ресурсов.

Ограничения (2.34) – (2.36) и вспомогательные переменные  $x_{j\lambda\pi\eta}^{(p,3)}(t), x_{j\lambda\mu\eta'}^{(p,4)}(t)$  вводятся для определения класса управляющих воздействий, а также очередности проведения циклов регенерации (пополнения) ресурсов, определения моментов времени окончания указанных циклов.

Вектор-функции  $h_0^{(p)}, h_1^{(p)}$  предполагаются заданными и дифференцируемыми.

Показатели вида (2.38), (2.39) характеризуют временные интервалы, в течение которых проводилась регенерация нескладируемого  $\Phi S_{\pi}^{(j)}$  и складируемого ресурса  $\Phi N_{\mu}^{(j)}$  на объекте  $V_j$ . Можно предложить ещё целый ряд показателей, с помощью которых оценивается равномерность (неравномерность) расхода (пополнения) соответствующих ресурсов [56, 96].

На рисунках 18, 19 приведены результаты моделирования процессов управления ресурсами КФС.

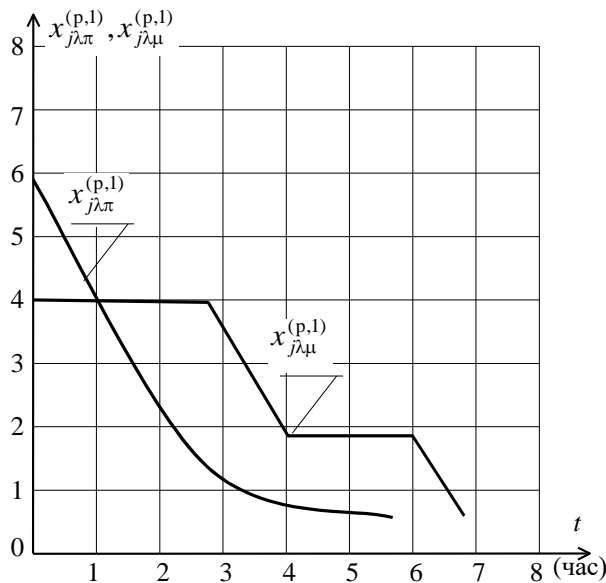


Рисунок 18. Значение переменных состояния складированных и нескладированных ресурсов

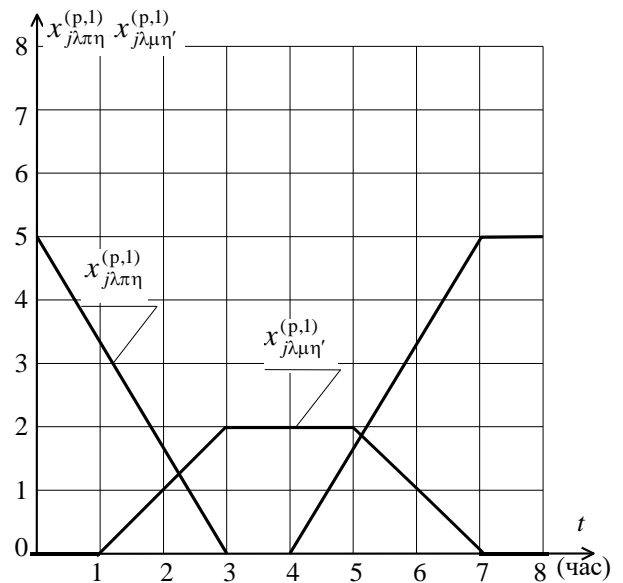


Рисунок 19. Значение переменных состояния пополняемых ресурсов

### 2.1.5. Динамическая модель управления потоками в КФС

Из анализа содержательной постановки задачи управления структурной динамикой КФС и соответствующей концептуальной модели следует, что объекты, входящие в состав указанной системы, осуществляют вещественный, энергетический и информационный обмен друг с другом и с ОБО, в ходе которого образуются соответствующие потоки между элементами и подсистемами КФС. Каждый из образованных потоков характеризуется текущим и требуемым объёмом (уровнем), интенсивностью передачи (приёма), скоростью изменения уровня потока, качественными параметрами потока.

В этом случае на распределение потоков между элементами и подсистемами КФС в ходе её функционирования влияет большое число факторов: динамика перемещения объектов КФС, ОБО, технология автоматизированного управления КФС, распределение функций управления между уровнями КФС, пропускные способности каналов и узлов КФС, переменность структур КФС.

При построении модели управления потоками  $M_{\text{п}}$ , как и раньше, основное внимание уделим вопросам управления потоками КФС в детерминированных условиях (о возможных путях учёта факторов неопределённости речь пойдёт в отдельном параграфе). При этом, не умаляя общности предлагаемого подхода к решению задач управления структурной динамикой, будем в дальнейшем рассматривать в основном информационные потоки в КФС, так как они в указанной системе являются преобладающими и определяют в целом варианты технологии управления объектами  $V_j$ . Основные элементы модели  $M_{\text{п}}$  можно представить в следующем виде

*Модель процесса управления потоками*

$$\dot{x}_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},1)} = u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},1)}; \quad \dot{x}_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},2)} = u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},2)}; \quad (2.40)$$

$$0 \leq u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},1)} \leq c_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},1)} u_{i\alpha j\lambda}^{(\text{о},2)}; \quad (2.41)$$

$$u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},2)} (a_{i\alpha\rho}^{(\text{п},1)} - x_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},1)}) = 0; \quad u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},2)} x_{i\alpha}^{(\text{о},2)} = 0; \quad u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},2)}(t) \in \{0,1\}; \quad (2.42)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{\lambda=1}^{l_i} \sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{\rho=1}^{k_i} x_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},1)} (u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{о},2)} + u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},2)}) \leq \tilde{P}_j^{(1)}; \quad (2.43)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{\lambda=1}^{l_i} \sum_{\alpha=1}^{s_i} u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},1)} \leq \tilde{P}_{j\rho}^{(2)}; \quad (2.44)$$

$$\sum_{\lambda=1}^{l_i} \sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{\rho=1}^{k_i} u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(\text{п},1)} \leq \tilde{P}_{ij}^{(3)}. \quad (2.45)$$

*Краевые условия*

$$h_0^{(\text{п})}(x^{(\text{п})}(T_0)) \leq O; \quad h_1^{(\text{п})}(x^{(\text{п})}(T_f)) \leq O. \quad (2.46)$$

*Показатели качества программного управления потоками в КФС*

$$J_1^{(n)} = \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{s_i \\ i \neq j}} \sum_{j=1}^m \sum_{\substack{l_i \\ i \neq j}} \sum_{\lambda=1}^{k_i} \left( a_{i\alpha\rho}^{(n,1)} - x_{i\alpha j\lambda\rho}^{(n,1)} \right) x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)} \Big|_{t=T_f}; \quad (2.47)$$

$$J_2^{(n)} = \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{s_i \\ i \neq j}} \sum_{j=1}^m \sum_{\substack{l_i \\ i \neq j}} \sum_{\lambda=1}^{k_i} \int_{T_0}^{T_f} x_{i\alpha j\lambda}^{(n,2)}(\tau) d\tau \quad (2.48)$$

где  $x_{i\alpha j\lambda\rho}^{(n,1)}(t)$  – переменная, характеризующая текущий объём информации вида «р», полученный объектом  $B_j$  от объекта  $B_i$  в ходе выполнения ОВ  $D_{\alpha}^{(i,j)}$  (объём информации, обработанный на объекте  $B_j$ ,  $i = j$ );  $x_{i\alpha j\lambda\rho}^{(n,2)}(t)$  – вспомогательная переменная, характеризующая общую продолжительность (время) нахождения на  $B$  объекте информации типа  $\rho$ , полученной (обработанной) в ходе взаимодействия объектов  $B_i$  и  $B_j$  при выполнении ОВ  $D_{\alpha}^{(i,j)}$  с помощью каналов  $C_{\lambda}^{(i)}, C_{\lambda}^{(j)}$ ;  $c_{i\alpha j\lambda\rho}^{(n,1)}$  – заданная константа, характеризующая максимально возможное значение  $u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(n,1)}$ ;  $u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(n,1)}$  – интенсивность передачи информации от объекта  $B_i$  к объекту  $B_j$  (обработки информации на  $B_j$  объекте при условии  $i = j$ );  $u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(n,2)}(t)$  – вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение  $u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(n,2)}(t) = 1$ , если закончен приём (обработка) информации на  $B_j$  объекте,  $u_{i\alpha j\lambda\rho}^{(n,2)}(t) = 0$  – в противоположном случае, либо в том случае, когда после завершения операции  $D_{\alpha}^{(i,j)}$  (либо  $D_{\alpha}^{(i)}$ , если  $i = j$ ) начинает выполняться операция  $D_{\alpha}^{(i,j)}$  (либо  $D_{\alpha}^{(i)}$ , если  $i = j$ ), следующая непосредственно в технологическом цикле управления объектом  $B_i$  за операцией  $D_{\alpha}^{(i,j)}$  (либо  $D_{\alpha}^{(i)}$ );  $\tilde{P}_j^{(1)}, \tilde{P}_{j\rho}^{(2)}, \tilde{P}_{ij}^{(3)}$  – заданные величины, характеризующие соответственно: максимально возможный объём информации, который может находиться на объекте  $B_j$ , пропускную способность объекта  $B_j$  с точки зрения потока информации вида  $\rho$ , пропускную способность каналов, соединяющих объекты  $B_i$  и  $B_j$ ;  $a_{i\alpha\rho}^{(n,1)}$  – заданный объём информации вида  $\rho$ , который может быть передан с объекта  $B_i$  (обработан на объекте  $B_i$ ) в ходе выполнения соответствующей операции.

Функции  $h_0^{(n)}, h_1^{(n)}$  предполагаются известными и дифференцируемыми. Целевые функции вида (2.47) вводятся в том случае, когда требуется оценить суммарные потери, вызванные отсутствием (потерей) информации соответствующих видов при функционировании

КФС; относительно вспомогательной переменной  $x_{i\alpha j\lambda}^{(п,1)}$  следует сказать, что она принимает отличные от нуля значения в том случае, когда состоялся обмен информацией между  $V_i$  и  $V_j$  (обработка информации на объекте  $V_i$ , если  $i = j$ ). С помощью показателя вида (2.48) оценивают суммарные потери времени, вызванные задержками в передаче, обработке, хранении информации при функционировании КФС (суммарные потери в оперативности передачи, обработки, хранении информации, циркулирующей в КФС).

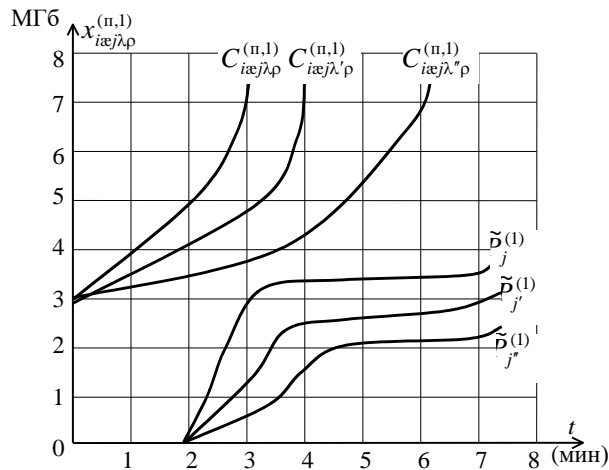


Рисунок 20. Результаты моделирования процессов управления потоками КФС

На рисунке 20 представлены результаты моделирования процессов управления потоками КФС для одного частного сценария её функционирования.

#### 2.1.6. Динамическая модель управления параметрами операций, проводимых в КФС

При построении модели управления операциями (модель  $M_0$ ) мы не учитывали особенности их проведения (реализации). Однако процесс выполнения как целевых, так и технологических операций в КФС сопровождается изменением целого ряда параметров (физических, технических и технологических и т.п.), характеризующих каждую из этих операций. Поэтому модели управления операциями (модель  $M_0$ ) необходимо всякий раз дополнять моделями управления параметрами операций (модель  $M_e$ ). Рассмотрим для примера модель управления параметрами операций, связанными с проведением измерений и оцениванием компонент вектора состояния движения  $V_i$  объекта с использованием канала  $C_\lambda^{(j)}$ , расположенного на объекте  $V_j$ . В этом случае одним из важнейших параметров, характеризующих указанные измерительные операции, является точность определения вектора состояния движения объекта  $V_i$ .

Пусть линейризованные модели движения объекта  $B_i$  и модель измерителей (каналов наблюдения за траекторией движения объекта  $B_i$ ) имеют следующий вид [76, 56, 119]:

$$\dot{\mathbf{x}}_i^{(д)} = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}_i^{(д)}; \quad (2.49)$$

$$y_{j\lambda}^{(i)}(t) = \mathbf{d}_{j\lambda}^T(t)\mathbf{x}_i^{(д)} + \xi_{j\lambda}, \quad (2.50)$$

где  $\mathbf{x}_i^{(д)} = \left\| \mathbf{r}_i^{(д)\top} \dot{\mathbf{r}}_i^{(д)\top} \right\|^T$  – вектор состояния движения объекта  $B_i$ ;  $\mathbf{F}_i(t)$  – заданная матрица;

$\xi_{j\lambda}$  – некоррелированные ошибки измерений канала  $C_{\lambda}^{(j)}$ , которые подчиняются нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной  $\sigma_{j\lambda}^2$ ;  $\mathbf{d}_j(t)$

– заданный вектор, связывающий вектор определяемых параметров  $\mathbf{x}_i^{(д)}$  с измеряемыми параметрами  $y_{j\lambda}^{(i)}(t)$ . В этом случае модель управления параметрами операций примет следующий вид.

*Модель процесса управления параметрами операций*

$$\dot{\mathbf{Z}}_i = -\mathbf{Z}_i\mathbf{F}_i - \mathbf{F}_i^T\mathbf{Z}_i - \sum_{j=1}^n \sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{i\tilde{\alpha}}} \sum_{\lambda=1}^{l_j} u_{i\tilde{\alpha}j\lambda}^{(e,1)} \frac{\mathbf{d}_{i\lambda}\mathbf{d}_{j\lambda}^T}{\sigma_{j\lambda}^2}, \quad \mathbf{Z}_i = \tilde{\mathbf{K}}_i^{-1}. \quad (2.51)$$

*Ограничения*

$$0 \leq u_{i\tilde{\alpha}j\lambda}^{(e,1)} \leq c_{j\lambda}^{(e)} u_{i\tilde{\alpha}j\lambda}^{(o,2)}; \quad (2.52)$$

*Краевые условия*

– вариант «а»

$$t = T_0, \quad \tilde{\mathbf{K}}_i(T_0) = \tilde{\mathbf{K}}_{i0}, \quad (2.53)$$

$$t = T_f, \quad \mathbf{b}_\gamma^T \tilde{\mathbf{K}}_i \mathbf{b}_\gamma \leq \sigma_{\gamma i}^2; \quad (2.54)$$

– вариант «б»

$$t = T_0, \quad \tilde{\mathbf{K}}_i(T_0) = \tilde{\mathbf{K}}_{i0}, \quad (2.55)$$

$$t = T_f, \quad \int_{T_0}^{T_f} \sum_{i, \tilde{\alpha}, j, \lambda} u_{i\tilde{\alpha}j\lambda}^{(e,1)}(\tau) d\tau \leq \tilde{J}_1^{(e)}. \quad (2.56)$$

*Показатели качества управления параметрами операций*

– вариант «а»

$$J_1^{(e)} = \int_{T_0}^{T_f} \sum_{i, \tilde{\alpha}, j, \lambda} u_{i\tilde{\alpha}j\lambda}^{(e,1)}(\tau) d\tau; \quad (2.57)$$

– вариант «б»

$$J_{2\gamma i}^{(e)} = \mathbf{b}_\gamma^T \tilde{\mathbf{K}}_i \mathbf{b}_\gamma, \quad (2.58)$$

где  $Z_i$  – матрица, обратная по отношению к корреляционной матрице  $\tilde{K}_i$  ошибок оценки вектора состояния движения объекта  $B_i$ ;  $u_{i\tilde{\alpha}j\lambda}^{(e,1)}$  – интенсивность проведения измерений параметров движения объекта  $B_i$ ;  $\Gamma_{i\tilde{\alpha}}$  – множество номеров измерительных операций, проводимых с объектом  $B_i$ ;  $c_{j\lambda}^{(e)}$  – заданные константы, характеризующие технические возможности канала  $C_\lambda^{(j)}$  по проведению измерительных операций;  $\mathbf{b}_\gamma = \|0,0,\dots,0,1,0,\dots,0\|^T$  – вспомогательный вектор, выделяющий из матрицы  $\tilde{K}_i$  требуемый элемент  $\gamma$ ;  $\sigma_{\gamma i}^2$  – заданная точность определения  $\gamma$ -й компоненты вектора состояния движения объекта  $B_i$ ;  $\tilde{K}_{i0}$  – заданная матрица, характеризующая ошибки оценки вектора состояния движения объекта  $B_i$  в момент времени  $t = T_0$ ;  $\tilde{J}_1^{(e)}$  – заданная величина, характеризующая суммарные затраты ресурсов объекта  $B_j$  при проведении всей совокупности измерительных операций.

Показатель (2.56) позволяет количественно оценить суммарные затраты ресурсов КФС на проведение измерительных операций; целевая функция (2.57) характеризует точность определения  $\gamma$ -го элемента вектора состояния движения объекта  $B_i$ .

На рисунке 21 приведены результаты моделирования процесса управления параметрами, характеризующими точность измерений вектора состояния движения объекта  $B_i$  для заданной ситуации обслуживания.

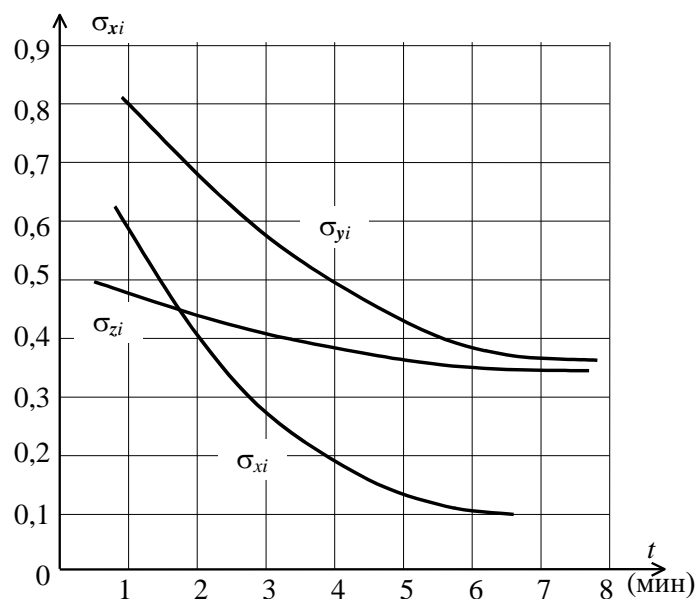


Рисунок 21. Значение параметров, характеризующих точность измерений вектора состояния движения объекта  $B_i$



### 2.1.7. Динамические модели управления структурной динамикой КФС

При построении динамических моделей управления структурной динамикой КФС (модель  $M_c$ ), как и раньше будем использовать предложенную в работах [56, 119, 126] динамическую интерпретацию процессов выполнения комплексов операций обслуживания. Однако в этом случае речь будет идти не о технологических операциях, выполняемых на объектах  $B_i$ , входящих в состав КФС, и не о технологических операциях, выполняемых при взаимодействии указанных объектов друг с другом, а о макрооперациях, выполняемых на уровне КФС. Данные макрооперации, как уже говорилось в п. 1.4, могут быть трёх основных видов:

- макрооперации, связанные с переводом КФС из текущих многоструктурных состояний в требуемые многоструктурные состояния (первый уровень управления структурной динамикой КФС);
- макрооперации, связанные с переводом заданных типов структур КФС из текущих в требуемые структурные состояния (второй уровень управления структурной динамикой КФС);
- макрооперации, связанные с переводом объектов  $B_i$ , входящих в состав КФС, из текущих в требуемые макросостояния (третий уровень управления структурной динамикой КФС).

При формализации данных процессов воспользуемся ранее построенными динамическими моделями управления операциями, проводимыми в КФС (модель  $M_o$ ) и каналами (модель  $M_k$ ).

### Модель управления многоструктурными состояниями КФС

*Модель процесса управления многоструктурными состояниями (модель  $M_c^{(1)}$ )*

$$\dot{x}_{\delta\eta_1}^{(c,1)} = u_{\delta\eta_1}^{(c,1)}; \quad \dot{\tilde{x}}_{\delta}^{(c,1)} = \sum_{\delta'=1}^{K_{\Delta}} \frac{\tilde{h}_{\delta'\delta}^{(c,1)} - \tilde{x}_{\delta}^{(c,1)}}{\tilde{x}_{\delta'}^{(c,1)}} \tilde{u}_{\delta'}^{(c,1)}; \quad \dot{\tilde{\tilde{x}}}_{\delta\eta_1}^{(c,1)} = \tilde{\tilde{u}}_{\delta\eta_1}^{(c,1)}; \quad (2.59)$$

$$\delta = 1, \dots, K_{\Delta}; \quad \eta_1 = 1, \dots, \mathbb{E}_1.$$

*Ограничения*

$$\sum_{\delta=1}^{K_{\Delta}} \left( u_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(t) + \tilde{u}_{\delta}^{(c,2)} \right) \leq 1, \quad \forall \eta_1; \quad u_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(t) \in \{0,1\}; \quad \tilde{u}_{\delta}^{(c,1)}(t), \tilde{\tilde{u}}_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(t) \in \{0,1\}; \quad (2.60)$$

$$\sum_{\eta_1=1}^{\mathbb{E}_1} u_{\delta\eta_1}^{(c,1)} \cdot \tilde{x}_{\delta}^{(c,1)} = 0, \quad u_{\delta\eta_1}^{(c,1)} \left( a_{\delta(\eta_1-1)}^{(c,1)} - x_{\delta(\eta_1-1)}^{(c,1)}(t) \right) = 0; \quad (2.61)$$

$$\tilde{u}_{\delta}^{(c,1)} \left[ \sum_{\chi' \in \Gamma_{\delta 1}^{(2)}} \sum_{\omega' \in \Gamma_{\delta 2}^{(2)}} \tilde{x}_{\chi'\omega'}^{(c,2)} + \prod_{\chi'' \in \Gamma_{\delta 3}^{(2)}} \prod_{\omega'' \in \Gamma_{\delta 4}^{(2)}} \tilde{x}_{\chi''\omega''}^{(c,2)} \right] = 0; \quad (2.62)$$

$$\tilde{u}_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(a_{\delta\eta_1}^{(c,1)} - x_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(t)) = 0. \quad (2.63)$$

*Краевые условия*

$$t = T_0 : x_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(T_0) = \tilde{x}_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(T_0) = 0; \tilde{x}_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(T_0) \in \mathbf{R}^l; \quad (2.64)$$

$$t = T_f : x_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(T_f) \in \mathbf{R}^l; \tilde{x}_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(T_f) \in \mathbf{R}^l; \tilde{x}_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(T_f) \in \mathbf{R}^l;. \quad (2.65)$$

*Показатели качества управления многоструктурными макросостояниями КФС*

$$J_{1\delta}^{(c,1)} = \sum_{\eta_1=1}^{\mathbb{E}_1} x_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(T_f); \quad (2.66)$$

$$J_2^{(c,1)} = \sum_{\eta_1=1}^{\mathbb{E}_1} \sum_{\delta=1}^{K_A} (a_{\delta}^{(c,1)} - x_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(T_f))^2; \quad (2.67)$$

$$J_{3\delta}^{(c,1)} = \sum_{\delta=1}^{K_A} \int_{T_0}^{T_f} \tilde{u}_{\delta}^{(c,1)}(\tau) d\tau; \quad (2.68)$$

$$J_{4\eta_1\delta(\eta_1-1)}^{(c,1)} = \left[ \tilde{x}_{\delta\eta_1}^{(c,1)} - \left( \tilde{a}_{\delta(\eta_1+1)}^{(c,1)} + \tilde{x}_{\delta(\eta_1+1)}^{(c,1)} \right) \right] \Big|_{t=T_f}. \quad (2.69)$$

В приведённых формулах приняты следующие обозначения:  $x_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(t)$  – переменная, характеризующая степень выполнения макрооперации  $D_{\delta\eta_1}^{(c,1)}$ , описывающей функционирование КФС в многоструктурном состоянии  $S_{\delta}$  на  $\eta_1$ -м цикле управления данной системой;  $\tilde{x}_{\delta}^{(c,1)}(t)$  – переменная, характеризующая степень выполнения макрооперации  $\tilde{D}_{\delta}^{(c,1)}$ , связанной с переводом КФС из текущего многоструктурного состояния  $S_{\delta'}$  в требуемое макросостояние  $S_{\delta}$  (в частном случае  $\delta' = \delta$ );  $\tilde{x}_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(t)$  – вспомогательная переменная, значение которой численно равно длительности интервала времени, прошедшего с момента окончания макрооперации  $D_{\delta\eta_1}^{(c,1)}$ ;  $\tilde{h}_{\delta'\delta}^{(c,1)}(t)$  – заданная величина, численно равная длительности перехода КФС из многоструктурного состояния  $S_{\delta'}$  в состояние  $S_{\delta}$ ;  $u_{\delta\eta_1}^{(c,1)}(t)$  – управляющее воздействие, принимающее значение, равное 1, если необходимо выполнить макрооперацию  $D_{\delta\eta_1}^{(c,1)}$ , 0 – в противоположном случае;  $\tilde{u}_{\delta\eta_1}^{(c,1)}$  – вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение, равное 1 в момент времени, соответствующий окончанию выполнения макрооперации  $D_{\delta\eta_1}^{(c,1)}$ , 0 – в противоположном случае;  $\tilde{u}_{\delta}^{(c,1)}(t)$  – управляющее воздействие, принимающее значение 1, если необходимо КФС перевести из текущего  $S_{\delta'}$  в требуемое  $S_{\delta}$  многоструктурное макросостояние, 0 – в противоположном случае.

Ограничения вида (2.60) – (2.63) определяют порядок и последовательность включения (выключения) перечисленных выше управляющих воздействий. В выражении (2.62)  $\Gamma_{\delta 1}^{(2)}, \Gamma_{\delta 3}^{(2)}, \Gamma_{\delta 2}^{(2)}, \Gamma_{\delta 4}^{(2)}$  – соответственно множества номеров типов структур и структурных состояний, в которых указанные структуры могут находиться.

Показатель качеств (2.66) позволяет оценить общую продолжительность нахождения КФС в макросостоянии  $S_{\delta}$ .

Функционал Майера вида (2.67) позволяет оценить суммарные потери из-за невыполнения директивно заданных сроков нахождения КФС в требуемых макросостояниях. В выражении (2.67)  $a_{\delta}^{(c,1)}$  – директивно заданная длительность нахождения КФС в многоструктурном состоянии  $S_{\delta}$ .

Показатель (2.68) позволяет количественно оценить общую продолжительность времени, в течение которого КФС находится в переходном режиме функционирования. С помощью функционала (2.69) удаётся оценить промежуток времени между двумя последовательными попаданиями КФС в многоструктурное состояние  $S_{\delta}$  (на циклах управления  $\eta_1$  и  $(\eta_1+1)$ ).

На рисунках 22 – 24 представлены результаты моделирования процессов управления многоструктурными состояниями КФС для некоторого фиксированного набора исходных данных и сценария развития внешней обстановки.

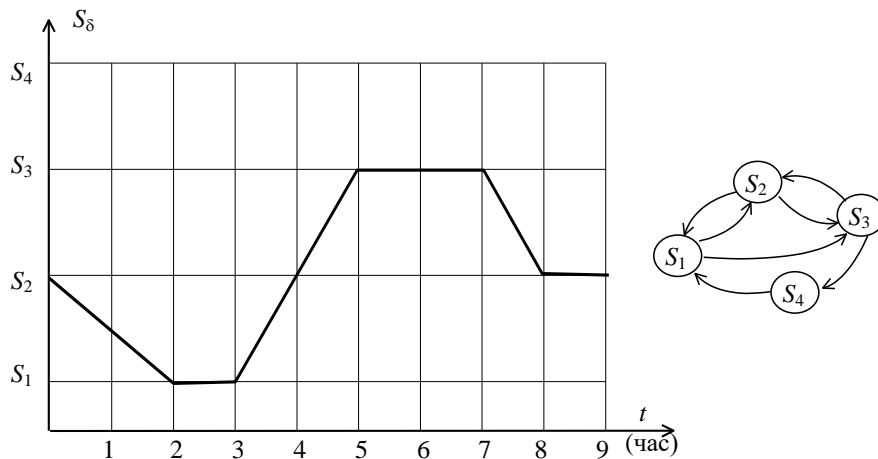


Рисунок 22. Динамика изменения макросостояний

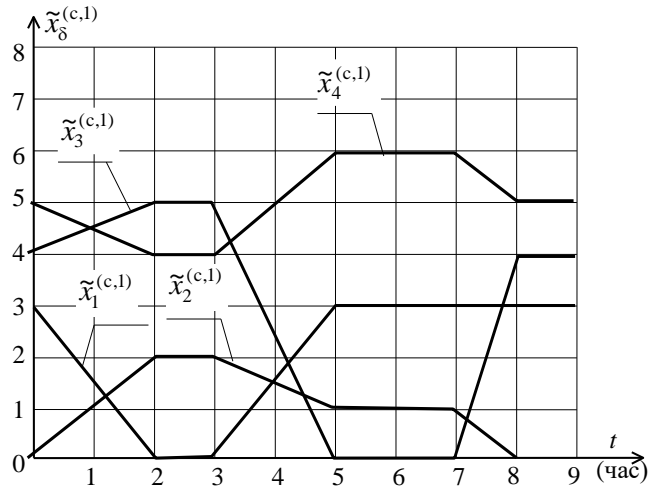


Рисунок 23. Значения основных переменных модели управления многоструктурными состояниями КФС

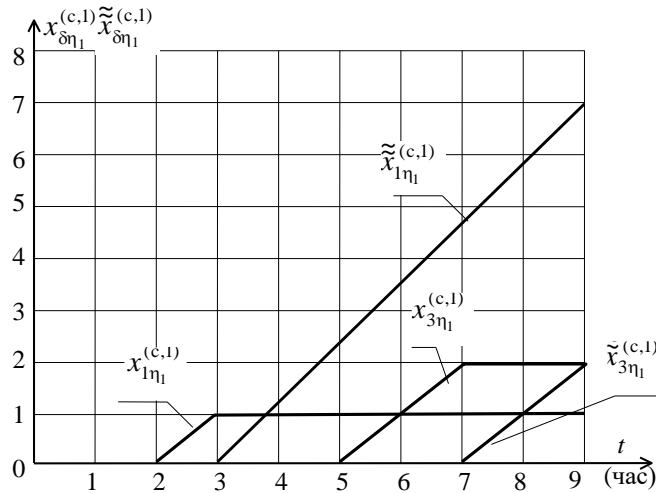


Рисунок 24. Значения основных переменных модели управления многоструктурными состояниями КФС на различных циклах управления

### Модель управления динамикой структур заданного типа

Модель процесса управления динамикой структур (модель  $M_c^{(2)}$ )

$$\dot{x}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)} = u_{\delta\omega\eta_2}^{(c,2)}; \quad \dot{\tilde{x}}_{\chi\omega}^{(c,2)} = \sum_{\omega'=1}^{K_\Omega} \frac{\tilde{h}_{\omega'\omega\chi}^{(c,2)} - \tilde{x}_{\chi\omega}^{(c,2)}}{\tilde{x}_{\chi\omega'}^{(c,2)}} \tilde{u}_{\chi\omega'}^{(c,2)}; \quad \dot{\tilde{x}}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)} = \tilde{u}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}; \quad (2.70)$$

$$\chi = 1, \dots, K_c; \quad \omega = 1, \dots, K_\Omega; \quad \eta_2 = 1, \dots, \mathbb{E}_2.$$

Ограничения

$$\sum_{\omega=1}^{K_\Omega} \left( u_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(t) + \tilde{u}_{\chi\omega'}^{(c,2)} \right) \leq 1, \quad \forall \chi, \forall \eta_2; \quad u_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(t) \in \{0,1\}; \quad \tilde{u}_{\chi\omega}^{(c,2)}(t), \tilde{u}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(t) \in \{0,1\}; \quad (2.71)$$

$$\sum_{\eta_2=1}^{\mathbb{E}_2} u_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)} \cdot \tilde{x}_{\chi\omega}^{(c,2)} = 0, \quad u_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)} \left( a_{\chi\omega(\eta_2-1)}^{(c,2)} - x_{\chi\omega(\eta_2-1)}^{(c,2)}(t) \right) = 0; \quad (2.72)$$

$$\tilde{u}_{\chi\omega}^{(c,2)} \left[ \sum_{i' \in \Gamma_{\chi\omega 1}^{(3)}} \sum_{w' \in \Gamma_{\chi\omega 2}^{(3)}} \sum_{f' \in \Gamma_{\chi\omega 3}^{(3)}} \tilde{x}_{i'w'f'}^{(c,3)} + \prod_{i' \in \Gamma_{\chi\omega 4}^{(3)}} \prod_{w'' \in \Gamma_{\chi\omega 5}^{(3)}} \prod_{f'' \in \Gamma_{\chi\omega 6}^{(3)}} \tilde{x}_{i''w''f''}^{(c,3)} \right] = 0; \quad (2.73)$$

$$\tilde{u}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)} \left( a_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)} - x_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)} \right) = 0. \quad (2.74)$$

*Краевые условия*

$$t = T_0 : x_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(T_0) = \tilde{x}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(T_0) = 0; \tilde{x}_{\chi\omega}^{(c,2)}(T_0) \in \mathbf{R}^1; \quad (2.75)$$

$$t = T_f : x_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(T_f) \in \mathbf{R}^1; \tilde{x}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(T_f) \in \mathbf{R}^1; \tilde{x}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(T_f) \in \mathbf{R}^1; \quad (2.76)$$

*Показатели качества управления динамикой структур заданного типа*

$$J_{1\chi\omega}^{(c,2)} = \sum_{\eta_2=1}^{\mathbb{E}_2} x_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(T_f); \quad (2.77)$$

$$J_{2\chi\omega}^{(c,2)} = \sum_{\eta_2=1}^{\mathbb{E}_2} \tilde{u}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}; \quad (2.78)$$

$$J_{3\chi}^{(c,2)} = \int_{T_0}^{T_f} \sum_{\omega=1}^{K_\Omega} \tilde{u}_{\chi\omega}^{(c,2)}(\tau) d\tau; \quad (2.79)$$

$$J_{4\omega\eta_2}^{(c,2)} = \sum_{\chi=1}^{K_c} \tilde{u}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(t); \quad (2.80)$$

$$J_{5\omega\eta_2}^{(c,2)} = \tilde{u}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(t). \quad (2.81)$$

В приведённых формулах приняты следующие обозначения:  $x_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(t)$  – переменная, характеризующая степень выполнения макрооперации  $D_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}$ , описывающей процесс нахождения структуры типа  $G_\chi$  в структурном состоянии  $S_{\chi\omega}$  на  $\eta_2$ -м цикле управления;  $\tilde{x}_{\chi\omega}^{(c,2)}(t)$  – переменная, характеризующая степень выполнения макрооперации  $\tilde{D}_{\chi\omega}^{(c,2)}$ , описывающей процесс перехода структуры  $G_\chi$  из текущего структурного состояния  $S_{\chi\omega'}$  в требуемое структурное состояние  $S_{\chi\omega}$ ;  $\tilde{x}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(t)$  – вспомогательная переменная, значение которой численно равно длительности интервала времени, прошедшего с момента окончания макрооперации  $D_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}$ ;  $\tilde{h}_{\omega'\omega\chi}^{(c,2)}$  – заданная величина, численно равная длительности перехода структуры  $G_\chi$  из структурного состояния  $S_{\chi\omega'}$  в структурное состояние  $S_{\chi\omega}$ ;  $u_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(t)$  – управляющее воздействие, принимающее значение 1, если необходимо выполнить макрооперацию  $D_{\chi\omega}^{(c,2)}$ , 0 – в противоположном случае;  $\tilde{u}_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}(t)$  – вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение, равное 1 в момент времени, соответствующий окончанию выполнения

макрооперации  $D_{\chi\omega\eta_2}^{(c,2)}$ , 0 – в противоположном случае;  $\tilde{u}_{\chi\omega}^{(c,2)}(t)$  – управляющее воздействие, принимающее значение 1, если необходимо осуществить переход структуры  $G_\chi$  из текущего структурного состояния  $S_{\chi\omega'}$  в требуемое структурное состояние  $S_{\chi\omega}$ , 0 – в противоположном случае.

Ограничения вида (2.71) – (2.74) определяют порядок и последовательность включения (выключения) перечисленных выше управляющих воздействий. В выражении (2.73)  $\Gamma_{\chi\omega 1}^{(3)}, \Gamma_{\chi\omega 4}^{(3)}; \Gamma_{\chi\omega 2}^{(3)}, \Gamma_{\chi\omega 5}^{(3)}; \Gamma_{\chi\omega 3}^{(3)}, \Gamma_{\chi\omega 6}^{(3)}$  – соответственно множества номеров объектов, входящих в структуры КФС, множество номеров макросостояний объектов, входящих в состав КФС и множество номеров мест в макросостояниях объектов КФС.

Показатель качества (2.77) количественно характеризует общую продолжительность нахождения структуры типа  $G_\chi$  в структурном состоянии  $S_{\chi\omega}$ ; с помощью функционала вида (2.78) можно определить сколько раз структура  $G_\chi$  попадала в структурное состояние  $S_{\chi\omega}$ ; показатель вида (2.79) позволяет количественно оценить общую продолжительность времени, в течение которого структура типа  $G_\chi$  находится в переходном состоянии. Показатель качества (2.80) позволяет оценить общее количество разнотипных структур  $G_\chi$ , которые находятся в структурном состоянии  $S_\omega$  ( $\delta = \omega$ ) на  $\eta_2$ -м цикле управления.

Функционал (2.81) оценивает факт наличия  $J_{\delta\chi\omega\eta_2}^{(c,2)} = 1$  (либо отсутствия  $J_{\delta\chi\omega\eta_2}^{(c,2)} = 0$ ) структуры  $G_\chi$  в структурном состоянии  $S_{\chi\omega}$ .

### Модель управления макросостояниями объектов, входящих в состав КФС

*Модель процесса управления макросостояниями объектов (модель  $M_c^{(3)}$ )*

$$\dot{x}_{i w f \eta_3}^{(c,3)} = u_{i w f \eta_3}^{(c,3)}; \quad \dot{\tilde{x}}_{i w f}^{(c,3)} = \sum_{w'=1}^{K_W} \sum_{f'=1}^{K_F} \frac{\tilde{h}_{w'f'w f}^{(c,3)} - \tilde{x}_{i w f}^{(c,3)}}{\tilde{x}_{i w'f'}^{(c,3)}} \tilde{u}_{i w'f'}^{(c,3)}; \quad (2.82)$$

$$\dot{\tilde{x}}_{i w f \eta_3}^{(c,3)} = \tilde{u}_{i w f \eta_3}^{(c,3)}; \quad i = 1, \dots, m, \quad w = 1, \dots, K_W; \quad f = 1, \dots, K_F; \quad \eta_3 = 1, \dots, \mathbb{E}_3. \quad (2.83)$$

*Ограничения*

$$\sum_{w=1}^{K_W} \sum_{f=1}^{K_F} (u_{i w f \eta_3}^{(c,3)}(t) + \tilde{u}_{i w f}^{(c,3)}(t)) \leq 1, \quad \forall i; \quad \forall \eta_3; \quad (2.84)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{w=1}^{K_W} u_{i w f \eta_3}^{(c,3)}(t) \leq 1, \quad \forall f; \quad \forall \eta_3; \quad (2.85)$$

$$u_{i w f \eta_3}^{(c,3)}(t) \in \{0,1\}; \quad \tilde{u}_{i w f}^{(c,3)}(t), \tilde{u}_{i w f \eta_3}^{(c,3)}(t) \in \{0,1\}; \quad (2.86)$$

$$\sum_{\eta_3=1}^{\mathbb{E}_3} u_{iwf\eta_3}^{(c,3)} \cdot \tilde{x}_{iwf\eta_3}^{(c,3)} = 0, \quad u_{iwf\eta_3}^{(c,3)} \left( a_{iwf(\eta_3-1)}^{(c,3)} - x_{iwf(\eta_3-1)}^{(c,3)} \right) = 0; \quad (2.87)$$

$$\tilde{u}_{iwf}^{(c,3)} \left[ \sum_{\alpha' \in \Gamma_{iwf1}^{(4)}} \left( a_{i\alpha'}^{(o,2)} - \tilde{x}_{i\alpha'}^{(o,2)}(t) \right) + \prod_{\beta' \in \Gamma_{iwf2}^{(4)}} \left( a_{i\beta'}^{(o,2)} - \tilde{x}_{i\beta'}^{(o,2)}(t) \right) \right] = 0; \quad (2.88)$$

$$\tilde{u}_{iwf\eta_3}^{(c,3)} \left( \tilde{a}_{iwf(\eta_3-1)}^{(c,3)} - \tilde{x}_{iwf(\eta_3-1)}^{(c,3)} \right) = 0. \quad (2.89)$$

*Краевые условия*

$$t = T_0 : x_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(T_0) = \tilde{x}_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(T_0) = 0; \quad \tilde{x}_{iwf}^{(c,3)}(T_0) \in \mathbf{R}^1; \quad (2.90)$$

$$t = T_f : x_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(T_f) \in \mathbf{R}^1; \quad \tilde{x}_{iwf}^{(c,3)}(T_f) \in \mathbf{R}^1; \quad \tilde{x}_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(T_f) \in \mathbf{R}^1; \quad (2.91)$$

*Показатели качества управления макросостояниями объектов КФС*

$$J_{1wf\eta_3}^{(c,3)} = \sum_{i=1}^m \tilde{u}_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(T_f); \quad (2.92)$$

$$J_{2i}^{(c,3)} = \int_{T_0}^{T_f} \sum_{w=1}^{K_W} \sum_{f=1}^{K_F} \tilde{u}_{ifw}^{(c,3)}(\tau) d\tau; \quad (2.93)$$

$$J_{3iwf}^{(c,3)} = \sum_{\eta_3=1}^{\mathbb{E}_3} x_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(T_f); \quad (2.94)$$

$$J_{4iwf}^{(c,3)} = \sum_{\eta_3=1}^{K_3} \left( a_{iwf}^{(c,3)} - x_{iwf}^{(c,3)}(T_f) \right)^2; \quad (2.95)$$

$$J_{5i\eta_3(\eta_3+1)}^{(c,3)} = \left[ \tilde{x}_{iwf\eta_3}^{(c,3)} - \left( \tilde{a}_{iwf}^{(c,3)} + \tilde{x}_{iwf(\eta_3+1)}^{(c,3)} \right) \right] \Big|_{t=T_f}. \quad (2.96)$$

В приведённых формулах приняты следующие обозначения:  $x_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(t)$  – переменная, характеризующая степень выполнения макрооперации  $D_{iwf\eta_3}^{(c,3)}$ , описывающей процесс функционирования объекта  $B_i$  в макросостоянии  $S_{iwf}$  на  $\eta_3$ -м цикле управления;  $\tilde{x}_{iwf}^{(c,3)}$  – переменная, характеризующая степень выполнения макрооперации  $\tilde{D}_{iwf}^{(c,3)}$ , описывающей процесс перехода объекта  $B_i$  из текущего макросостояния  $S_{iw'f'}$  в требуемое макросостояние  $S_{iwf}$ ;  $\tilde{x}_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(t)$  – вспомогательная переменная, значение которой численно равно длительности интервала времени, прошедшего с момента окончания макрооперации  $D_{iwf\eta_3}^{(c,3)}$ ;  $\tilde{h}_{w'f'wf}^{(c,3)}$  – заданная величина, численно равная длительности перехода объекта  $B_i$  из макросостояния  $S_{iw'f'}$  в макросостояние  $S_{iwf}$  ( $w', w$  – номера макросостояний объекта  $B_i$ , соответственно  $f', f$  – номера мест в указанных макросостояниях);  $u_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(t)$  – управляющее воздействие, принимающее значение

равное 1, если необходимо выполнить макрооперацию  $D_{iwf\eta_3}^{(c,3)}$ , 0 – в противоположном случае;  $\tilde{u}_{iwf}^{(c,3)}(t)$  – управляющее воздействие, принимающее значение равное 1, если требуется осуществить переход объекта  $B_i$  из текущего макросостояния  $S_{iw'f}$  в требуемое макросостояние  $S_{iwf}$ ;  $\tilde{u}_{iwf\eta_3}^{(c,3)}(t)$  – вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение равное 1, в момент времени, соответствующий окончанию выполнения макрооперации  $D_{iwf\eta_3}^{(c,3)}$ , 0 – в противоположном случае.

Ограничения (2.84) – (2.89) определяют порядок и последовательность включения (выключения) перечисленных выше управляющих воздействий. В выражении (2.88)  $\Gamma_{iwf1}^{(4)}, \Gamma_{iwf2}^{(4)}$  – множества номеров операций, проводимых на объекте  $B_i$  (при взаимодействии с объектом  $B_i$ ), непосредственно предшествующих макрооперации  $D_{iwf}^{(c,3)}$  и связанных с ней логическими операциям «И», «ИЛИ», альтернативное «ИЛИ». С помощью ограничения (2.88) устанавливается связь модели  $M_o$  с моделями  $M_c$ . В свою очередь, взаимосвязь моделей  $M_c^{(3)}$  с  $M_c^{(2)}$ ,  $M_c^{(2)}$  с  $M_c^{(1)}$  осуществляется соответственно за счёт смешанных ограничений вида (2.73) и (2.62).

Показатель качества (2.92) характеризует количество объектов  $B_i$ , которое на  $\eta_3$ -м цикле управления находилось в макросостоянии  $S_{iwf}$ ; с помощью функционала вида (2.93) можно количественно оценить общую продолжительность времени, в течение которого объект  $B_i$  находился в переходных макросостояниях; показатель (2.94) позволяет определить общую продолжительность нахождения объекта  $B_i$  в макросостоянии  $S_{iwf}$ ; функционал Майера вида (2.95) позволяет оценить суммарные потери из-за невыполнения директивно заданных сроков нахождения объекта  $B_i$  в макросостоянии  $S_{iwf}$ . В выражении (2.95)  $a_{iwf}^{(c,3)}$  – директивно заданная длительность нахождения объекта  $B_i$  в макросостоянии  $S_{iwf}$ . С помощью функционала (2.96) удаётся оценить промежуток времени между двумя последовательными попаданиями объекта  $B_i$  в макросостоянии  $S_{iwf}$  (на циклах управления  $\eta_3$  и  $(\eta_3+1)$ ). Следует подчеркнуть, что приведённый перечень показателей качества управления структурной динамикой КФС (в рамках моделей  $M_c^{(1)}, M_c^{(2)}, M_c^{(3)}$ ) может быть значительно расширен (например, используя функционалы, подобные тем, что были предложены в моделях  $M_o, M_k, M_p, M_e, M_d, M_n$ ). Однако это определяется уже конкретными прикладными задачами, для решения которых привлекаются рассматриваемые модели. В заключение данного параграфа отметим, что в моделях  $M_c^{(2)}, M_c^{(3)}$  закономерности изменения переменных имеют тот же характер, что и соответствующие переменные в модели  $M_c^{(1)}$ .



### 2.1.8. Динамическая модель управления вспомогательными операциями

С помощью динамической модели управления вспомогательными операциями (модель  $M_B$ ) учтём в рассматриваемых ранее моделях  $M_o$ ,  $M_k$ ,  $M_p$  ограничения на неразрывность процессов выполнения переналадки каналов и операций, проводимых в КФС. Необходимость учёта данных ограничений связана со спецификой использования приведённых выше динамических моделей и вызвана тем, что в процессе численного поиска оптимальных программ управления структурной динамикой КФС в некоторые (заранее неизвестные) моменты времени на интервале  $(T_o, T_f]$  возможны прерывания как при переналадке каналов, так и при выполнении операций, описывающих функционирование КФС.

На практике современные технические средства КФС в одних случаях допускают прерывание выполняемых операций (например, в режимах мультипрограммирования, мультипроцессирования и т.п.), в других случаях вводится строгий запрет на прерывание операций (например, при передаче особо важной информации или при выходе объекта из штатной ситуации). В этих условиях в абстрактных математических моделях (например, моделях  $M_o$ ,  $M_k$ ,  $M_p$ ) необходимо предусмотреть возможные формализованные варианты оптимального разрешения конфликтных ситуаций, связанных с прерыванием.

Существует несколько вариантов формализации ограничений на неразрывность выполнения операций [76, 56]. Причём все эти варианты сходны в одном: учёт ограничений на неразрывность выполнения операций и переналадки каналов приводит в соответствующих математических моделях к расширению размерности фазового пространства.

Для этого введём вспомогательные переменные, которые должны удовлетворять следующим дифференциальным уравнениям:

$$\dot{x}_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)} = u_{i\alpha j\lambda}^{(o,2)}; \quad \dot{x}_{i\alpha j\lambda}^{(B,2)} = x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)}; \quad \dot{x}_{i\alpha j\lambda}^{(B,3)} = u_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)}; \quad (2.97)$$

$$\dot{x}_{i\alpha j\lambda}^{(B,4)} = u_{i\alpha j\lambda}^{(k,1)}; \quad \dot{x}_{i\alpha j\lambda}^{(B,5)} = u_{i\alpha j\lambda}^{(B,2)}; \quad \dot{x}_{i\alpha j\lambda}^{(B,6)} = u_{i\alpha j\lambda}^{(B,3)} - u_{i\alpha j\lambda}^{(B,2)}, \quad (2.98)$$

где  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,\zeta)}$ ,  $\zeta = 1 \dots 6$  – вспомогательные переменные,  $u_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)}$ ,  $u_{i\alpha j\lambda}^{(B,2)}$ ,  $u_{i\alpha j\lambda}^{(B,3)}$  – вспомогательные

управляющие воздействия, которые должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$u_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)} \left( a_{i\alpha}^{(o,2)} - \sum_{i=1}^m \sum_{\lambda=1}^l x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)} \right) = 0; \quad (2.99)$$

$$u_{i\alpha j\lambda}^{(B,2)} x_{i\alpha j\lambda}^{(B,4)} = 0, \quad u_{i\alpha j\lambda}^{(B,3)} x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)} = 0; \quad (2.100)$$

$$u_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)}(t) \in \{0,1\}, \quad u_{i\alpha j\lambda}^{(B,2)}(t) \in \{0,1\}, \quad u_{i\alpha j\lambda}^{(B,3)}(t) \in \{0,1\}. \quad (2.101)$$

Ограничения (2.99), (2.100) определяют вариант возможного «включения» вспомогательных управляющих воздействий  $u_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)}(t)$ ,  $u_{i\alpha j\lambda}^{(B,2)}(t)$ ,  $u_{i\alpha j\lambda}^{(B,3)}(t)$ .

С учётом вышеизложенного первый вариант формализации условий неразрывности сводится к заданию изопериметрических условий вида:

$$\int_{T_0}^{T_f} \left(1 - u_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)}\right) x_{i\alpha j\lambda}^{(B,4)} x_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)} \left(a_{i\alpha}^{(o,2)} - x_{i\alpha}^{(o,2)}\right) d\tau = 0, \quad (2.102)$$

$$\int_{T_0}^{T_f} \left(1 - u_{i\alpha j\lambda}^{(o,1)}\right) x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)} x_{i\alpha j\lambda}^{(\kappa,1)} \left(a_{i\alpha}^{(o,2)} - x_{i\alpha}^{(o,2)}\right) d\tau = 0. \quad (2.103)$$

где  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)}(t_0) = x_{i\alpha j\lambda}^{(B,4)}(t_0) = 0$ ,  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)}(T_f) \in \mathbb{R}^1$ ,  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,4)} \in \mathbb{R}^1$ ,  $\mathbb{R}^1$  – множество вещественных чисел. Соотношения (2.102), (2.103) задают соответственно ограничения на неразрывность выполнения операций по переналадке канала  $C_\lambda^j$  и операции  $D_{\alpha}^{(i,j)}$ . Следует отметить, что задание ограничений на неразрывность выполнения операций, связанных с восполнением (регенерацией) складированных и нескладированных ресурсов проводится так же, как и для операций взаимодействия).

Может быть предложен другой способ формализации ограничений на неразрывность выполнения операции и переналадки каналов в КФС. Данные ограничения в виде дополнительных краевых условий запишутся следующим образом:

$$\left\{ \left[ x_{i\alpha j\lambda}^{(B,3)} x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)} + \frac{\left(a_{i\alpha}^{(o,2)}\right)^2}{2} - x_{i\alpha j\lambda}^{(B,2)} \right] x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)} \right\}_{t=T_f} = 0, \quad (2.104)$$

$$\left( x_{i\alpha j\lambda}^{(B,6)} - x_{i\alpha j\lambda}^{(B,4)} \right) \Big|_{t=T_f} = 0. \quad (2.105)$$

при условии,  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,\zeta)}(T_0) = 0$ ,  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,\zeta)}(T_f) \in \mathbb{R}^1$ .

В выражении (2.104) величина произведения  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,3)} x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)}$  численно равна площади подынтегральной кривой, соответствующей решению первого уравнения в формуле (2.97) на интервале времени  $(t'_{i\alpha j\lambda}, T_f]$ , где  $t'_{i\alpha j\lambda}$  – момент окончания выполнения операции  $D_{\alpha}^{(i,j)}$ , проводимой каналом  $C_\lambda^j$ .

Величина  $\frac{\left(a_{i\alpha}^{(o,2)}\right)^2}{2}$  численно равна площади подынтегральной кривой, соответствующей решению первого уравнения в формуле (2.97) на интервале времени  $(T_0, t'_{i\alpha j\lambda}]$  при условии, что операция взаимодействия (ОВ) выполнялась без прерывания с использованием ресурсов одного канала  $C_\lambda^j$ . Из анализа (2.104) следует, что в том случае, когда ОВ  $D_{\alpha}^{(i,j)}$  выполнялась каналом

$C_\lambda^j$  без прерываний, разность величин, стоящих в квадратной скобке равна нулю. В противном случае (при прерывании ОВ  $D_x^{(i,j)}$ ) данная разность отлична от нуля. Для того, чтобы учесть ситуации, при которых канал  $C_\lambda^j$  не планируется для выполнения ОВ  $D_x^{(i,j)}$  на интервале  $(T_0, T_f]$ , в выражение (2.104) введён дополнительный множитель  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,1)}$ , который в момент времени  $t = T_0$  равен нулю.

Ограничения (2.105) позволяют формализовать требования, связанные с неразрывностью выполнения операций по переналадке каналов КФС, В этом случае, если переналадка канала  $C_\lambda^j$  из состояния готовности к выполнению ОВ  $D_{x'}^{(i,j)}$  в состояние готовности к выполнению ОВ  $D_x^{(i,j)}$  спланирована без прерываний, то, как следует из соотношения (2.105), финальные значения  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,6)}(T_f)$  и  $x_{i\alpha j\lambda}^{(B,4)}(T_f)$  должны совпадать. В противном случае (при прерывании) указанная разность отлична от нуля. На рис. 25 – 30 приведены для примера различные ситуации обслуживания, которые приводят к разным типам прерываний операций взаимодействия (ОВ) объектов КФС друг с другом, с объектами, входящими в состав внешней среды. На представленных рисунках приняты следующие условия: длительность интервала управления ОВ  $D_x^{(i,j)}$ ,  $D_{x'}^{(i,j)}$  равняется 9 условным временным единицам (у.в.е.): при этом  $T_0 = 0$ ,  $T_f = 9$ ,  $t \in T = (0,9]$ .

На рисунке 25 изображена ситуация, при которой прерывание процесса выполнения ОВ  $D_x^{(i,j)}$  происходит из-за того, что длительность нахождения объекта  $B_i$  в зоне взаимодействия (ЗВ) с объектом  $B_j$  равняется не 4,5 у.в.е., а 3 у.в.е. Поэтому происходит прерывание ОВ  $D_x^{(i,j)}$  по концу ЗВ (первый тип прерывания). Завершение данной ОВ происходит уже в ЗВ объекта  $B_i$  с объектом  $B_j$  в момент времени  $t = 7,5$  у.в.е.

На рисунке 26 показан характер изменения вспомогательных переменных для первого типа прерываний. Рисунок 27 иллюстрирует ситуацию, при которой объект, имеющий больший приоритет (значимость, «вес»), прерывает проведение ОВ с объектом, обладающим меньшим приоритетом. Из анализа данного рисунка следует, что на интервале времени  $t = (4,6]$  наблюдается перекрытие ЗВ объекта  $B_j$  с ЗВ объектов  $B_i$  и  $B_{i'}$ . В этом случае в момент времени  $t = 4$  у.в.е., т.е. в момент входа более приоритетного объекта  $B_{i'}$  в ЗВ с объектом  $B_j$ , последний прекращает выполнение ОВ  $D_x^{(i,j)}$  с объектом  $B_i$  и начинает выполнять ОВ  $D_{x'}^{(i,j)}$ . Однако и для этого объекта из-за ограниченной длительности его нахождения в ЗВ с объектом  $B_j$  также не

удаётся к моменту времени  $t = 6$  у.в.е. завершить выполнение ОВ  $D_{x'}^{(i,j)}$  до конца  $x_{i'x'}^{(o,2)}(6) \neq a_{i'x'}^{(o,2)}$ . Для этого приходится в новой ЗВ объекта  $B_{i'}$  с объектом  $B_{j'}$  продолжать её выполнение. Однако и этой ЗВ недостаточно для выполнения краевого условия  $x_{i'x'}^{(o,2)}(T_f = 9) = a_{i'x'}^{(o,2)}$ . Данный тип прерываний назовём прерыванием по приоритету объекта (второй тип прерывания). На рисунке 28, так же, как и на рисунке 26, показан характер изменения соответствующих вспомогательных переменных. И, наконец, на рисунке 29 изображена ситуация, когда в условиях последовательного перекрытия ЗВ объекта  $B_i$  с объектами  $B_j, B_{j'}, B_{j''}$  прерывания ОВ  $D_{x'}^{(i,j)}$  происходят в моменты начала каждой новой ЗВ (соответственно, в моменты времени  $t_1 = 4$  у.в.е.,  $t_2 = 6$  у.в.е.). На рисунке 29 ЗВ объекта  $B_i$  с объектом  $B_{j'}$  равняется 4,5 у.в.е.:  $t \in (1; 4,5]$ , ЗВ объекта  $B_i$  с объектом  $B_{j'}$  равняется 2,5 у.в.е.:  $t \in (4; 6,5]$ , ЗВ объекта  $B_i$  с объектом  $B_{j''}$  равняется 2 у.в.е.:  $t \in (6; 8]$ . Рисунок 30 иллюстрирует характер изменения вспомогательных переменных для последнего (третьего) типа прерываний. Назовём этот тип прерываний – прерыванием по приоритету канала (ресурса).

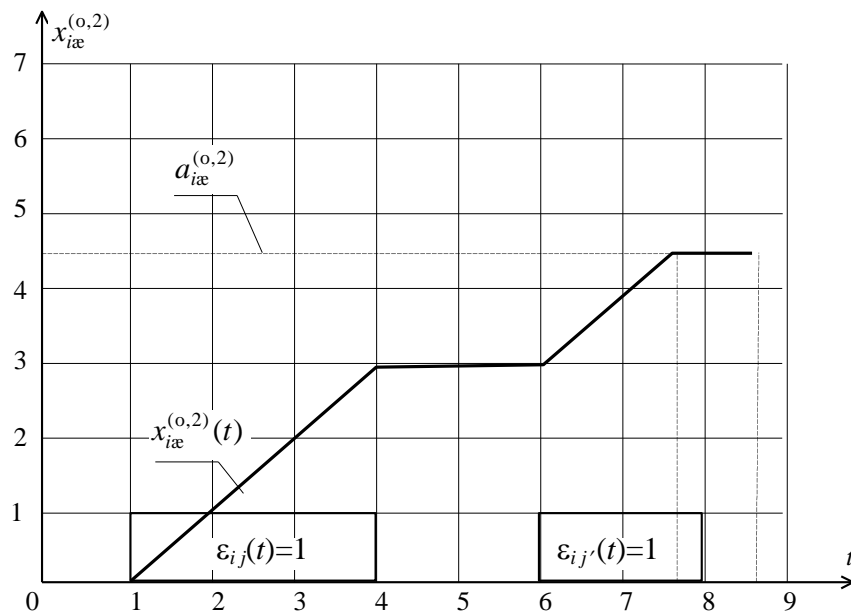


Рисунок 25. Прерывание по концу зоны видимости (первый тип)

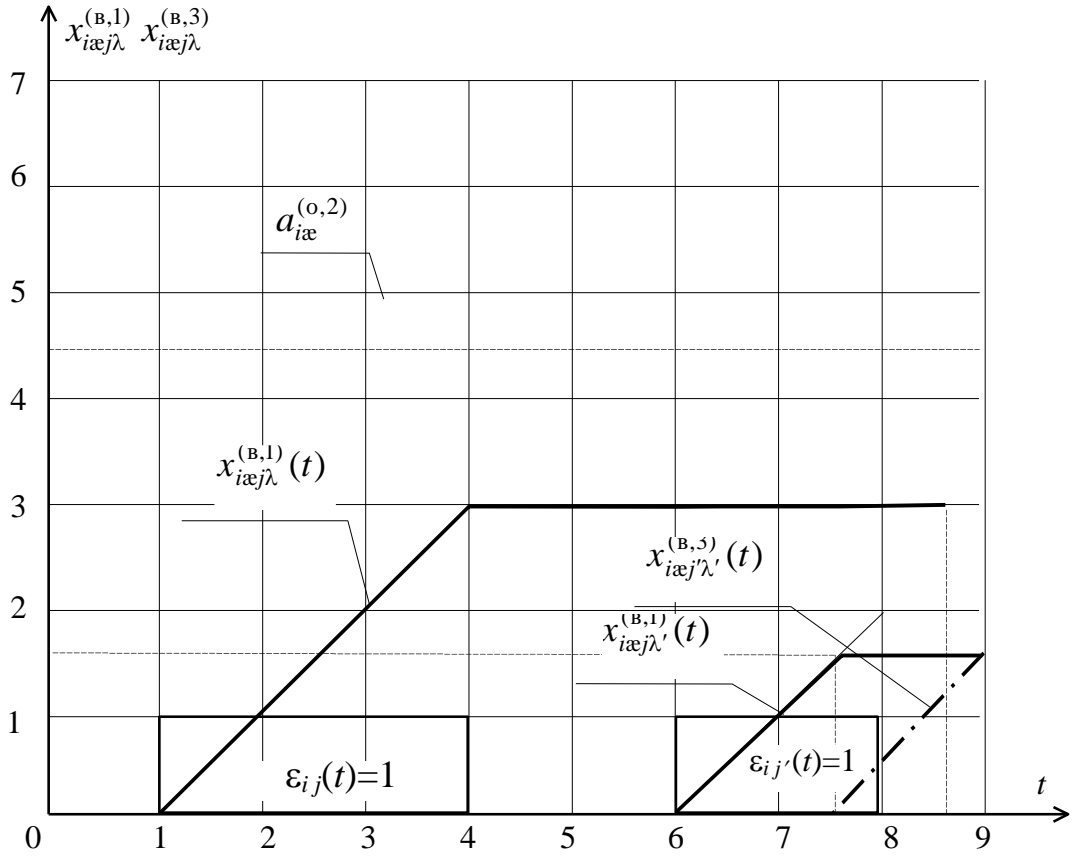


Рисунок 26. Характер изменения вспомогательных переменных для первого типа прерываний

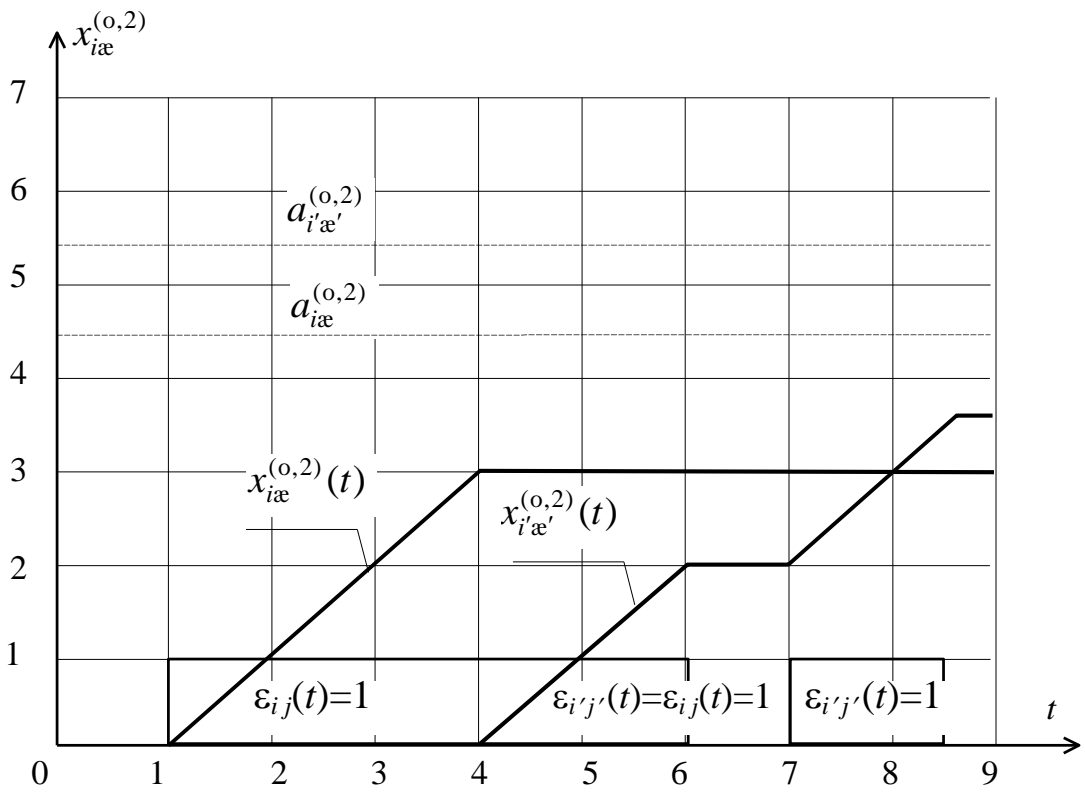


Рисунок 27. Прерывание по приоритету объекта (второй тип)

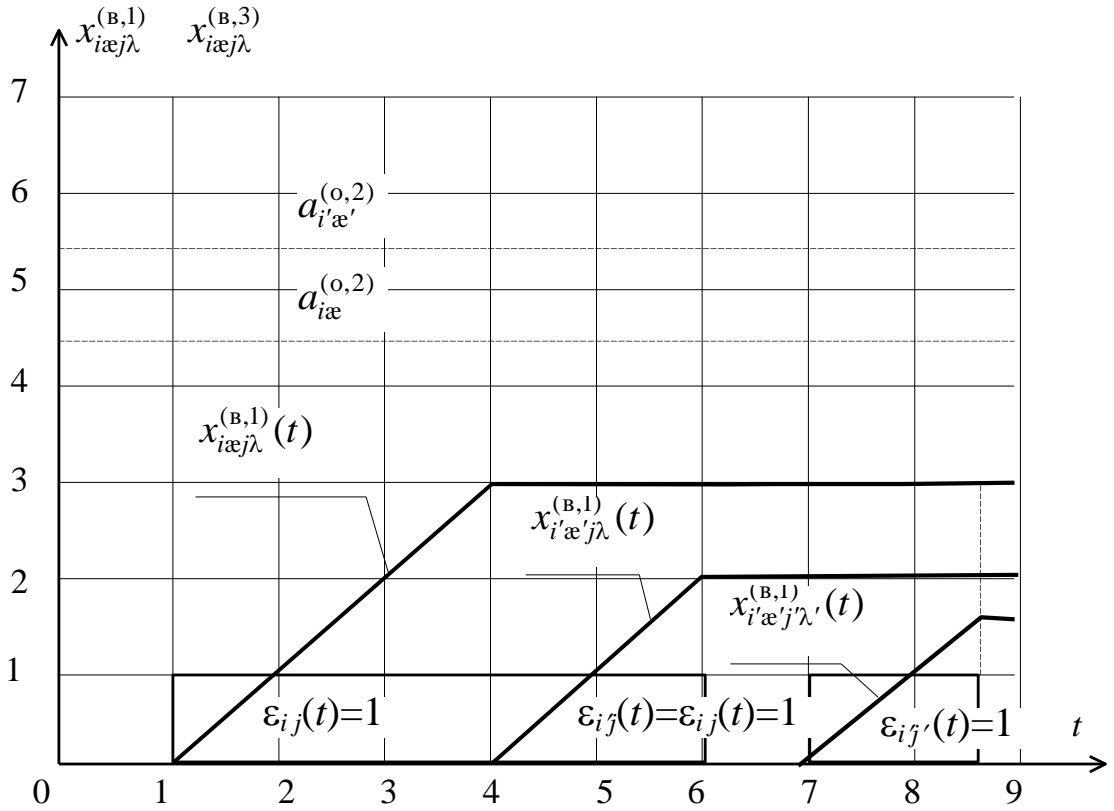


Рисунок 28. Характер изменения вспомогательных переменных для второго типа прерываний

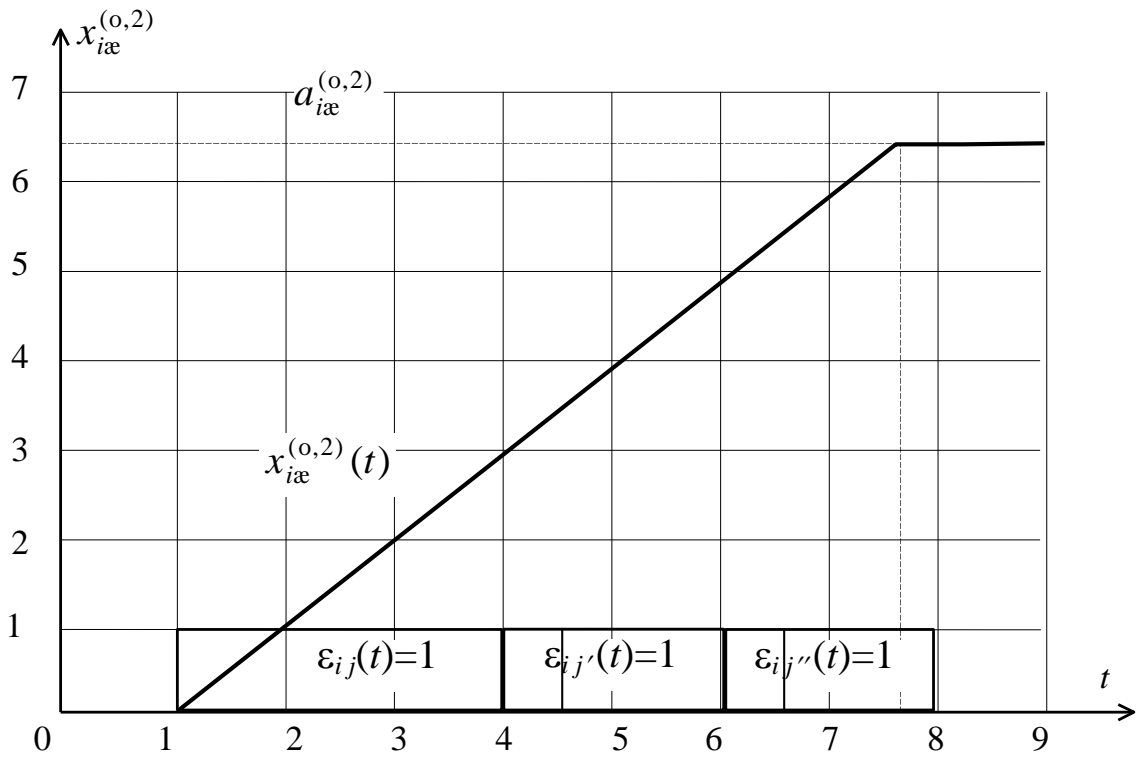


Рисунок 29. Прерывание по приоритету ресурса (третий тип)

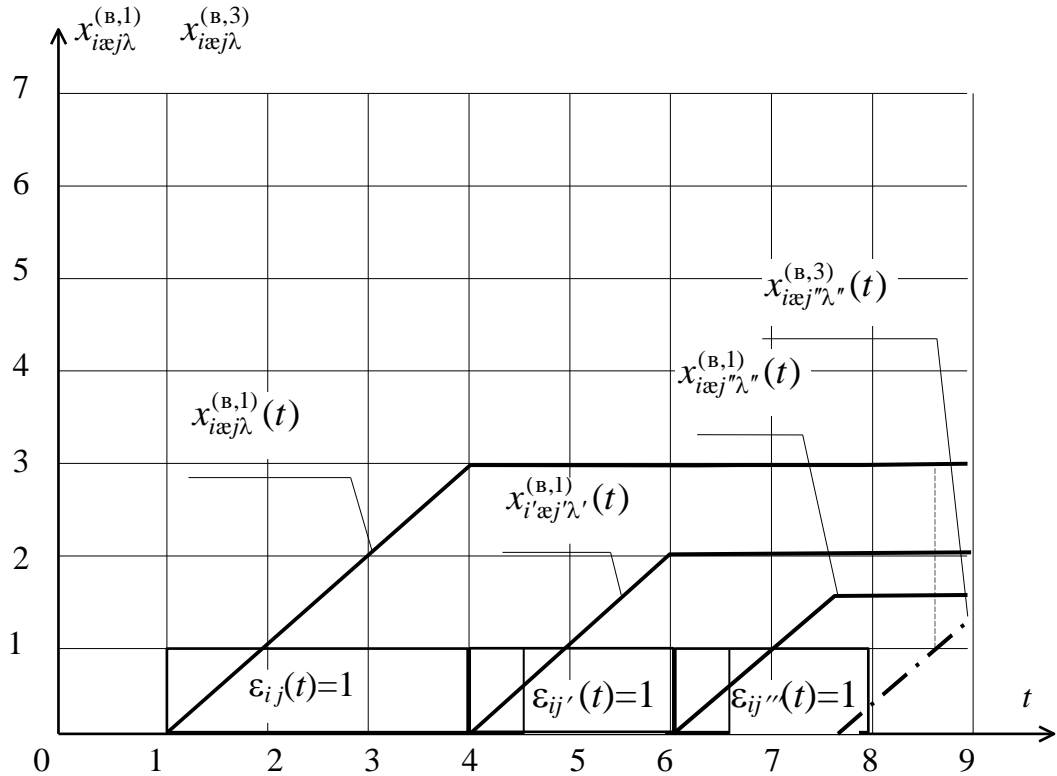


Рисунок 30. Характер изменения вспомогательных переменных для третьего типа прерываний

## 2.2. Обобщённая детерминированная логико-динамическая модель управления структурной динамикой КФС

Анализ ранее построенных моделей управления структурной динамикой (УСД) (см. параграфы 2.1 – 2.8) показывает, что в целом обобщённая детерминированная динамическая модель УСД КФС (модель  $M$ ) может быть представлена в следующем виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad (2.106)$$

$$\mathbf{h}_0(\mathbf{x}(T_0)) \leq \mathbf{O}, \quad \mathbf{h}_1(\mathbf{x}(T_f)) \leq \mathbf{O}, \quad (2.107)$$

$$\mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{O}, \quad \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{O}, \quad (2.108)$$

$$J_i = J_i(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = \varphi_i(\mathbf{x}(t_f)) + \int_{T_0}^{T_f} f_{0i}(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), \tau) d\tau, \quad i = 1, \dots, I_M, \quad (2.109)$$

где  $\mathbf{x}$  – обобщённый вектор многоструктурного состояния КФС;  $\mathbf{u}$  – обобщённый вектор управляющих воздействий;  $\mathbf{h}_0, \mathbf{h}_1$  – известные векторные функции, с помощью которых задаются соответственно исходные данные для задачи УСД КФС в момент времени  $t = T_0$  и граничные (требуемые) значения вектора состояния КФС в момент окончания интервала управления ( $t = T_f$ ). Следует отметить, что краевые условия в сформулированных ранее задачах УСД КФС в общем

случае могут быть как фиксированными на левом и правом конце фазовой траектории  $\mathbf{x}(t)$ , так и подвижными. Векторные функции  $\mathbf{q}^{(1)}$ ,  $\mathbf{q}^{(2)}$  задают основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, накладываемые на процесс функционирования КФС.

Проведённый анализ показывает, что всё множество показателей, оценивающих качество УСД КФС  $J_{\tilde{i}}$  ( $\tilde{i} = 1, \dots, I_M$ ), можно разбить на следующие группы показателей:

$J_1$  – показатели, оценивающие оперативность функционирования КФС;

$J_2$  – показатели, оценивающие пропускную способность КФС (например, число объектов, обслуженных в КФС по заданной технологии);

$J_3$  – показатели, оценивающие качество выполнения операций (работ), входящих в технологические циклы управления (ТЦУ) ОБО, ТЦУ элементами и подсистемами КФС;

$J_4$  – показатели, оценивающие расход ресурсов при функционировании КФС;

$J_5$  – показатели, оценивающие гибкость вариантов структурного построения КФС (показатели структурной и функциональной самоорганизации [52, 90, 142, 143]);

$J_6$  – показатели, оценивающие живучесть КФС;

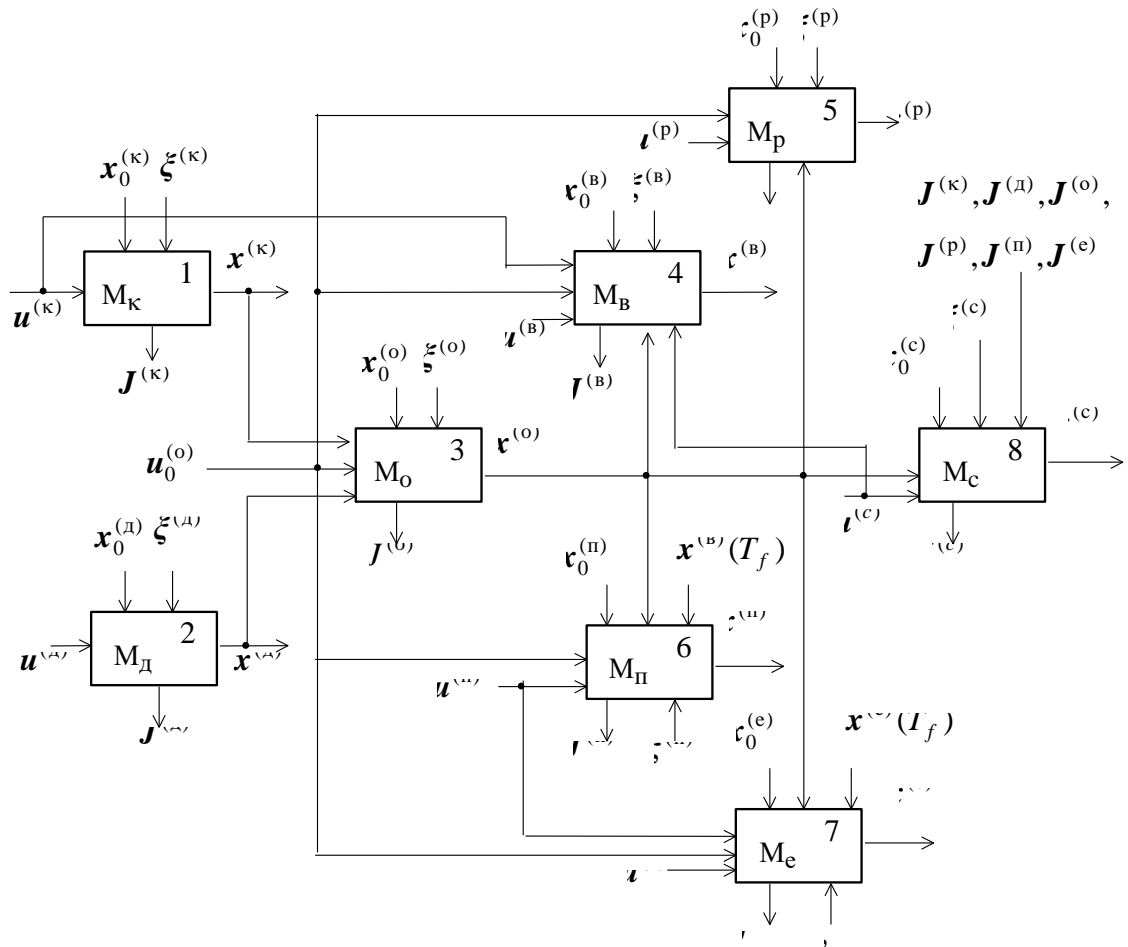
$J_7$  – показатели, оценивающие помехозащищённость КФС;

$J_8$  – показатели, оценивающие надёжность КФС на этапе её применения по целевому назначению.

В целом построенная модель  $M(2.106) - (2.109)$  представляет из себя детерминированную нелинейную нестационарную конечномерную дифференциальную динамическую систему с перестраиваемой структурой. Взаимосвязь моделей  $M_o, M_k, M_p, M_n, M_e, M_c, M_b, M_d$ , входящих в состав обобщённой модели  $M$ , представлена на рисунке 31. В этом случае ранее сформулированные на содержательном уровне задачи УСД КФС сводятся к задачам управления динамической системой вида  $(2.106) - (2.109)$ .

Проведённые исследования показали, что в зависимости от выбранного способа применения КФС задачи УСД КФС могут быть сформулированы и как задачи выбора с мультипредпочтением как на расчленённом (региональный и децентрализованный режим работы КФС), так и на нерасчленённом (централизованный режим работы КФС) множестве допустимых альтернатив, задаваемых с использованием соответствующих динамических моделей.





- $M_d$  – динамическая модель управления движением КФС  
 $M_\kappa$  – динамическая модель управления каналами в КФС  
 $M_o$  – динамическая модель управления операциями, проводимыми в КФС  
 $M_\Pi$  – динамическая модель управления потоками в КФС  
 $M_p$  – динамическая модель управления ресурсами КФС  
 $M_e$  – динамическая модель управления параметрами операций, проводимыми в КФС  
 $M_c$  – динамическая модель управления структурной динамикой КФС  
 $M_b$  – динамическая модель управления вспомогательными операциями КФС

Рисунок 31. Взаимосвязь частных моделей, входящих в состав обобщённой модели УСД КФС

Указанные задачи имеют ряд специфических черт, которые отличают их от классических задач теории оптимального управления сложными динамическими системами [66-76]. Первая особенность данных задач заключается в том, что правые части дифференциальных уравнений, описывающих процесс выполнения операций в КФС, терпят разрыв не только при перераспределении технических средств каналов между объектами, но и в моменты входа (выхода) объектов в зоны взаимодействия друг друга. Рассматриваемые задачи поэтому можно отнести к задачам управления с промежуточными условиями [76].

Другая особенность задач состоит в том, что данные задачи относятся к классу задач многокритериального выбора. Далее будут обоснованы различные варианты правил

согласования (построения обобщённых функций эффективности), позволяющие на основе расчёта конкретных показателей, входящих в множество  $\{J_1, J_2, \dots, I_{I_M}\}$ , получить обобщённый показатель качества УСД КФС. Ранее в работах [56, 119, 126] были предложены конкретные алгоритмы формирования правил согласования в рассматриваемых задачах УСД КФС.

Следующая особенность задач УСД КФС состоит в том, что сведения об основных факторах и условиях, влияющих на успешное решение указанных задач, имеют различную степень достоверности и определённости. Кроме того, существенно затрудняет процесс управления, как правило, отсутствие аналитической зависимости между указанными факторами и условиями и элементами, определяющими (описывающими) технологию управления. Это в первую очередь касается факторов и условий, затрудняющих выполнение целевых задач объектами (например, возмущающие факторы со стороны внешней среды).

Ещё одна особенность предложенной выше обобщённой модели УСД КФС состоит в том, что все основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, имеющие сугубо нелинейный характер, учитываются не при задании дифференциальных уравнений, описывающих динамику соответствующих процессов (см. параграфы 2.1.1-2.1.8), а при формировании области допустимых значений управляющих воздействий  $Q(x)$ , задании краевых условий. Исключение составляют лишь модели программного управления потоками и каналами, которые относятся к классу билинейных нестационарных дифференциальных динамических моделей, и нелинейные модели программного управления движением элементов и подсистем КФС.

Следует указать ещё на одну особенность задач УСД КФС. Ранее при задании краевых условий в конкретных моделях, построенных в параграфах 2.1.1-2.1.8, говорилось только о вариантах К1, К2. Напомним, что для вариантов К3, К4 в начальный момент времени  $t = T_0$  заданы условия следующего вида  $h_0(x(t)) \in \mathbf{R}^{\tilde{n}_{об}}$ . В этом случае появляется возможность осуществить поиск не только оптимальной программы управления  $u^*(t)$ , но и найти наилучшее распределение значений компонент вектора  $x^*$  в момент времени  $t = T_0$ . О содержательной стороне данного аспекта задач УСД КФС уже говорилось ранее в параграфе 1.4, когда речь шла о выборе оптимальных программ согласования способов применения объектов с вариантами структурного построения КФС с режимами её функционирования на интервале планирования  $(T_0, T_f]$ . Анализ возможных вариантов упрощения приведённой выше модели УСД КФС (модели  $M$ ) показывает [56], что для большинства классов объектов, которые могут входить в состав КФС и с которыми она может взаимодействовать, на интервале управления можно использовать линеаризованные модели программного управления движением, нестационарные линейные

дифференциальные динамические модели программного управления потоками и каналами. Таким образом, наряду с нелинейными уравнениями (2.106), описывающими динамику процессов функционирования основных элементов и подсистем КФС, при решении практических задач могут быть предложены следующие три модификации данных уравнений:

вариант  $M1$

$$\dot{\mathbf{x}}^{(1)} = A^{(1)}(t)\mathbf{x}^{(1)} + B^{(1)}(t)\mathbf{u}^{(1)} + C^{(1)}(t)\mathbf{x}^{(1)}\mathbf{u}^{(1)}; \quad (2.110)$$

вариант  $M2$

$$\dot{\mathbf{x}}^{(2)} = A^{(2)}(t)\mathbf{x}^{(2)} + B^{(2)}(t)\mathbf{u}^{(2)}; \quad (2.111)$$

вариант  $M3$

$$\dot{\mathbf{x}}^{(3)} = B^{(3)}(t)\mathbf{u}^{(3)}, \quad (2.112)$$

где  $\mathbf{x}^{(1)}$ ,  $\mathbf{x}^{(2)}$ ,  $\mathbf{x}^{(3)}$  – обобщённые векторы состояния КФС в соответствующих моделях;  $\mathbf{u}^{(1)}$ ,  $\mathbf{u}^{(2)}$ ,  $\mathbf{u}^{(3)}$  – обобщённые векторы управляющих воздействий в моделях  $M1$ ,  $M2$ ,  $M3$  соответственно;  $A^{(1)}(t)$ ,  $A^{(2)}(t)$ ,  $B^{(1)}(t)$ ,  $B^{(2)}(t)$ ,  $B^{(3)}(t)$ ,  $C^{(1)}(t)$  – заданные матрицы. Соотношения (2.107) – (2.109) в каждой из предложенных модификаций имеют один и тот же вид. При этом область допустимых значений управляющих воздействий, задаваемая в виде системы ограничений (2.108), является переменной, зависящей от текущего состояния фазового вектора  $\mathbf{x}(t)$  ( $\mathbf{x}^{(1)}(t)$ ,  $\mathbf{x}^{(2)}(t)$  либо  $\mathbf{x}^{(3)}(t)$ ). Следует подчеркнуть, что в ряде ранее выполненных автором работ [90, 56, 119, 126] было показано, что ограничения вида (2.108) можно задать (сформировать) таким образом, чтобы выполнялись условия общности положения или, другими словами, область  $Q(\mathbf{x})$  была бы выпуклой. Указанная особенность описания модели  $M$  и её модификаций ( $M1$ ,  $M2$ ,  $M3$ ) позволит в дальнейшем конструктивно решать все основные задачи анализа процесса функционирования КФС, управления её основными элементами и подсистемами.

Таким образом, подводя итог вышеизложенному, ещё раз подчеркнём, что все перечисленные ранее в параграфе 1.6 задачи УСД КФС (задачи класса С) формально сводятся к детерминированным экстремальным задачам оптимального управления сложными дифференциальными динамическими системами (2.106) – (2.112).

Разработанная к настоящему времени общая методология решения задач указанного класса включает в себя три основные направления исследований [66, 76]:

- качественную теорию экстремальных задач, охватывающую проблемы существования и единственности, глобального экстремума, управляемости, наблюдаемости, устойчивости соответствующих динамических систем, проблемы выявления необходимых и достаточных условий экстремальности (оптимальности), а также проблему корректности постановки задач оптимизации (устойчивости, чувствительности их решения);
- теорию методов преобразования экстремальных задач;

- теорию вычислительных методов, направленных на разработку методов и алгоритмов поиска конкретных решений экстремальных задач на ЭВМ.

В дальнейшем остановимся более подробно на каждом из перечисленных направлений, конкретизируя соответствующие подходы применительно к задачам УСД КФС.

При этом примем ряд допущений. Будем предполагать, что на основе частных показателей качества  $J_1, \dots, J_8$  построен обобщённый показатель качества  $J_{об}$  (обобщённая функция эффективности), который имеет следующий вид:

$$J_{об} = \lambda_1 \varphi_{об}(\mathbf{x}(T_f)) + \lambda_2 \int_{T_0}^{T_f} f_{об}^{(1)}(\mathbf{x}(\tau)) d\tau + \lambda_3 \int_{T_0}^{T_f} f_{об}^{(2)}(\mathbf{u}(\tau)) d\tau, \quad (2.113)$$

где  $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 > 0, \sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1$  – заданные коэффициенты,  $\varphi_{об}, f_{об}^{(1)}, f_{об}^{(2)}$  – заданные

функции, определённые соответственно на  $X \subseteq \mathbf{R}^{n_{об}}, X \times T, U \subseteq \mathbf{R}^{m_{об}}$  ( $T = \mathbf{R}^+$  – множество моментов времени,  $\mathbf{R}^+$  – множество положительных действительных чисел,  $X, U$  – множества допустимых значений  $\mathbf{x}, \mathbf{u}$ ). Пусть функция  $\varphi_{об}(\mathbf{x})$  непрерывна на  $X$ , функция  $f_{об}^{(1)}(\mathbf{x}(\tau), \tau)$  вместе со своей производной по  $\mathbf{x}$  при любом  $\tau \in (T_0, T_f]$  непрерывна по  $\mathbf{x}$  и для любого ограниченного  $\mathbf{x} \in X$  ограничена и кусочно-непрерывна по  $\tau$ ; функция  $f_{об}^{(2)}$  при любом  $\tau$  выпукла по  $\mathbf{u}$  и для любого ограниченного  $\mathbf{u} \in U$  ограничена и кусочно-непрерывна по  $t$  [66]. Кроме того, в модели  $M$  и её модификациях наряду с классом допустимых управляющих воздействий  $K_\sigma$  [66] рассмотрим расширенный класс допустимых управлений  $K_{\sigma p}$ , в котором условия релейности управления вида

$$u_g \in \{0, 1\}, \quad (2.114)$$

(где  $g \in \{1, \dots, m_{об}\}$  – множество номеров компонент вектора  $\mathbf{u}$ ), соответственно заменены на менее жёсткие условия вида

$$u_{gz} \in [0, 1]. \quad (2.115)$$

В этом случае множество допустимых значений управляющих воздействий  $Q_p(\mathbf{x})$  будет представлять из себя выпуклую оболочку множества  $Q(\mathbf{x})$ .

### **2.3. Анализ возможных вариантов учёта факторов неопределённости в моделях управления структурной динамикой КФС**

Характерная особенность современных КФС состоит в том, что в процессе их функционирования происходит постоянное изменение структуры и параметров как объектов управления, входящих в состав КФС, так и управляющих подсистем КФС. Указанные изменения вызваны как развитием самих элементов КФС, так и воздействием на них внешней среды.

Основная особенность управления КФС состоит в том, что сведения об основных факторах и условиях, влияющих на успешное решение задач автоматизированного управления (АУ) соответствующими объектами, имеют различную степень достоверности и определённости. Анализ отечественных и зарубежных публикаций, проведённый в параграфе 0, кроме прочего выявил, что при решении задач оперативного планирования работы технических средств КФС в соответствующих детерминированных математических моделях не учитывается влияние факторов неопределённости, возникающих на этапе реализации составленных планов. В результате такого подхода устойчивость синтезированных планов будет низкая, что в свою очередь, приводит на этапе реализации планов к увеличению общего числа их коррекций, увеличению нагрузки на КФС, снижению её пропускной способности, устойчивости функционирования [139].

Проведённый анализ показывает, что при синтезе технологии и комплексном планировании управления информационными процессами в промышленном интернете целесообразно учёт факторов неопределённости осуществлять так же как и для других классов сложных технических объектов, а именно, в несколько этапов, включающих в себя [90, 56, 112, 140, 139]: адаптацию параметров и структуры моделей, алгоритмов УСД КФС к прошлому и текущему состоянию объектов управления (ОН), управляющих подсистем (УП) и внешней среды; имитацию условий реализации плана с учётом различных вариантов организации оперативного управления элементами и подсистемами КФС в конкретных ситуациях; структурную и параметрическую адаптацию плана, моделей и алгоритмов СПМО УСД КФС к возможным (прогнозируемым на имитационных моделях) состояниям ОУ, УП и среды. В этом случае уже имеются основания говорить не об оптимизационном, а об адаптационном планировании применения КФС.

## 2.4. Выводы

1. В результате выполненных исследований был разработан полимодельный комплекс, в состав которого вошли аналитико-имитационные логико-динамические модели управления движением, каналами, ресурсами, комплексами и параметрами целевых, обеспечивающих и вспомогательных операций, потоками и структурами КФС. При этом в обобщенном виде данный полимодельный комплекс удалось представить в виде многоуровневого альтернативного динамического системного графа с перестраиваемой структурой.

2. Первое достоинство предложенного обобщенного описания состоит в том, что с его помощью обеспечивается на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях детализации корректное согласование (в соответствии с критериями гомоморфизмов и динамоморфизмов отношений) разработанных в диссертации математических (аналитико-имитационных) моделей управления структурной динамикой КФС (реальных и виртуальных-программных) с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), 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 решить как задачи синтеза технологий функционирования КФС, так и задачи комплексного планирования информационных процессов, протекающих в них для обеспечения эффективного функционирования промышленного интернета вещей.

3. В рамках созданного полимодельного комплекса удалось в явном виде учесть такие базовые логические функции и соответствующие ограничения как «И», «ИЛИ», «альтернативное ИЛИ», «НЕ». При этом введение данных функций и ограничений не привело к выходу синтезируемых программных управлений КФС (или, по-другому, планов их функционирования) из класса кусочно-непрерывных функций. Всё это позволило при решении задач синтеза технологий и программ информационными процессами в промышленном интернете на конструктивной основе использовать фундаментальные и прикладные результаты, полученные как в классической, так и современной теории управления.

4. Еще одно достоинство предложенного полимодельного комплекса состоит в том, что с его помощью можно единообразно (с использованием одних и тех же математических структур) формально описать как задачи комплексного моделирования процессов управления КФС, так и задачи планирования их действий, коррекции планов (перепланирования), а также задачи оперативного управления и мониторинга их состояния, обеспечив, тем самым, корректную межмодельную координацию за счёт использования единого языка описания рассматриваемых процессов.

5. В целом предложенная автором динамическая интерпретация процессов управления элементами и подсистемами промышленного интернета позволяет, как показали проведенные исследования: широко использовать при решении как задач синтеза технологий функционирования КФС, так и задач комплексного планирования информационных процессов промышленного интернета 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.

6. Учет факторов неопределенности в разработанном полимодельном комплексе предложено осуществлять с использованием комбинированных подходов, базирующихся на разработанных диссертантом технологиях комплексного моделирования, ориентированных как на аналитико-имитационное моделирование возможных сценариев реализаций программ проактивного управления КФС на этапе их выполнения с последующей их коррекцией и введением требуемого уровня различных видов избыточности (функциональной, технической, временной и т.п), так и на основе построения и анализа аппроксимированных областей достижимости в пространстве критериальных функций и интервально заданных возмущающих воздействий, позволяющих выявить наиболее робастные программы проактивного управления КФС.

### 3. Методы и алгоритмы решения задач выбора оптимальных технологий и программ управления структурной динамикой КФС

#### 3.1. Методы и алгоритмы решения задач выбора оптимальных технологий и программ управления структурной динамикой КФС в детерминированных условиях

В данном параграфе мы более подробно остановимся на вопросах выбора оптимальных технологий и программ управления структурной динамикой КФС в том случае, когда управление её основными подсистемами осуществляется из единого центра управления (централизованный режим функционирования КФС) в детерминированных условиях. При этом будем предполагать, что сведения о внешней среде, в которой будут реализовываться оптимальные технологии программы управления КФС, нам известны. В параграфе 3.3 будет показано как при решении задач синтеза технологий и программ управления КФС можно учесть факторы неопределенности, связанные с воздействием внешней среды. В перечисленных условиях мы уже можем управляемую структурную динамику КФС задать с помощью представленных во 2 главе диссертации системы детерминированных динамических моделей программного управления следующего вида:

$$M = \left\{ \vec{u}(t) \mid \dot{\vec{x}} = \vec{f}(\vec{x}, \vec{u}, t); \vec{h}_0(\vec{x}(T_0)) \leq \vec{O}, \vec{h}_1(\vec{x}(T_f)) \geq \vec{O}; \vec{q}^{(1)}(\vec{x}, \vec{u}) = \vec{O}, \vec{q}^{(2)}(\vec{x}, \vec{u}) \leq \vec{O} \right\}, \quad (3.1)$$

где  $\vec{x}$ ,  $\vec{u}$  – обобщённые векторы состояния и управления КФС, компонентами которых являются переменные, входящие в дифференциальные уравнения, описывающие процессы программного управления движением, каналами, операциями, ресурсами, потоками, параметрами операций, структурами, вспомогательными операциями;  $\vec{h}_0$ ,  $\vec{h}_1$  – известные вектор-функции, с помощью которых задаются краевые условия для вектора  $\vec{x}$  в моменты времени  $t = T_0$  и  $t = T_f$ ;  $\vec{q}^{(1)}(\vec{x}, \vec{u}) = \vec{O}$ ,  $\vec{q}^{(2)}(\vec{x}, \vec{u}) \leq \vec{O}$  – векторные функции, с помощью которых задают основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, накладываемые на процессы функционирования элементов и подсистем КФС. В выражении (3.1) для простоты записи последующих формул, без ограничения общности, во-первых, опущены индексы «pl» у вектора  $\vec{u}$ , а также параметр  $\Theta$ , к которым мы вернемся далее когда речь пойдет о параметрической и структурной адаптации представленных во второй главе логико-динамических моделей управления КФС.

Будем также предполагать, что, используя известные способы скаляризации векторного показателя качества  $\vec{J}_\Theta$ , удалось его представить в скалярной форме  $J_{ob}$  [82].



В ранее выполненных работах [105, 106, 126] было показано, что данную задачу с помощью принципа максимума (а точнее с помощью метода локальных сечений, который реализует принцип максимума для случая, когда используются смешанные динамические ограничения) можно свести к двухточечной (в общем случае многоточечной) краевой задаче. Напомним, что сопряжённая система уравнений в этих условиях имеет следующий вид:

$$\dot{\psi}_l = -\frac{\partial H}{\partial x_l} + \sum_{\alpha=1}^{I_1} \lambda_\alpha(t) \frac{\partial \bar{q}_\alpha^{(1)}(\bar{x}(t), \bar{u}(t))}{\partial x_l} + \sum_{\beta=1}^{I_2} \rho_\beta(t) \frac{\partial \bar{q}_\beta^{(2)}(\bar{x}(t), \bar{u}(t))}{\partial x_l}. \quad (3.2)$$

Коэффициенты  $\lambda_\alpha(t)$ ,  $\rho_\beta(t)$  находятся из следующих соотношений:

$$\rho_\beta(t) \bar{q}_\beta^{(2)}(\bar{x}(t), \bar{u}(t)) \equiv 0, \beta \in \{1, \dots, I_2\}, \quad (3.3)$$

$$\text{grad}_{\bar{u}} H(\bar{x}(t), \bar{u}(t), \bar{\psi}(t)) = \sum_{\alpha=1}^{I_1} \lambda_\alpha(t) \text{grad}_{\bar{u}} \bar{q}_\alpha^{(1)}(\bar{x}(t), \bar{u}(t)) + \sum_{\beta=1}^{I_2} \rho_\beta(t) \text{grad}_{\bar{u}} \bar{q}_\beta^{(2)}(\bar{x}(t), \bar{u}(t)). \quad (3.4)$$

В формулах (3.2) – (3.4)  $x_l$ ,  $\psi_l$  – компоненты обобщённых векторов состояний основной  $\bar{x}$  и сопряжённой  $\bar{\psi}$  систем уравнений. Уравнения (3.2) должны быть, в общем случае, дополнены условиями трансверсальности на левом и правом концах фазовой траектории данной динамической системы следующего вида:

$$\psi_l(T_0) = -\left. \frac{\partial J_{ob}}{\partial x_l} \right|_{x_l(T_0)=x_{l0}}, \quad \psi_l(T_f) = -\left. \frac{\partial J_{ob}}{\partial x_l} \right|_{x_l(T_f)=x_{lf}}. \quad (3.5)$$

Кратко рассмотрим алгоритмическую сторону реализации приведённых соотношений принципа максимума. В соответствии с данным принципом для определения оптимального программного управления  $\bar{u}^*(t)$  (напомним, что по договорённости в данной главе индексы « $pl$ » в выражении  $\bar{u}_{pl}^*(t)$  нами опущены) и соответствующей фазовой траектории  $\bar{x}^*(t)$  должны быть решены две системы уравнений: основная система уравнений (3.1) и сопряжённая система уравнений (3.2). При заданных для указанных систем уравнений начальных условиях:  $\bar{h}_0(\bar{x}(T_0)) \leq \bar{O}$ ;  $\bar{\psi}(T_0)$  значение управляющих воздействий  $\bar{u}^*(t)$  в момент времени  $t = T_0$  вычисляется исходя из максимизации функции Гамильтона следующего вида:

$$H(\bar{x}(t), \bar{u}(t), \bar{\psi}(t)) = \bar{\Psi}^T \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}, t). \quad (3.6)$$

Формула (3.6) записана в предположении, что обобщённый функционал, оценивающий качество управления структурной динамикой КФС, приведён к виду функционала Майера [64, 72].

Полученное экстремальное значение управляющих воздействий подставляется в правые части дифференциальных уравнений (3.1), (3.2), делается один шаг интегрирования основной и сопряжённой систем уравнений:  $t_1 = T_0 + \tilde{\delta}$  ( $\tilde{\delta}$  – шаг интегрирования), и затем вновь проводится определение  $\bar{u}^*(t)$  для  $t = t_1$  на основе максимизации функции Гамильтона (3.6) и т.д. ( $t_2 = t_1 + \tilde{\delta}$

...). Процесс интегрирования продолжается до тех пор, пока не выполняются краевые условия  $\bar{h}_1(\bar{x}(T_f)) \leq \bar{O}$ , и не будет обеспечена с заданной точностью сходимость как по функционалу, так и по соответствующим альтернативам. На этом заканчивается процедура построения экстремали  $\bar{x}^*(t)$  и соответствующего экстремального управления  $\bar{u}^*(t)$ .

В рассмотренной выше процедуре остаётся невыясненным только один момент: как задать компоненты вектора  $\bar{\psi}(T_0)$ , соответствующие тем компонентам вектора  $\bar{x}(T_0)$ , значения которых фиксированы в момент времени  $t = T_0$ .

Выбор указанного вектора определяется граничными (краевыми) условиями задачи УСД КФС. Таким образом, принцип максимума позволяет задачу неклассического вариационного исчисления свести к краевой задаче. Другими словами, в этом случае происходит редукция задачи выбора оптимальных технологий и программ УСД КФС к задаче отыскания корней трансцендентных уравнений следующего вида

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}(\bar{\psi}(T_0)) = \bar{O}. \quad (3.7)$$

В дальнейшем рассмотрим самый сложный случай постановки задачи выбора оптимальных технологий и программ УСД КФС, для которого зафиксированы краевые условия вектора состояния КФС в момент времени  $t = T_0$  (фиксированный правый конец, фиксированный интервал времени УСД КФС):

$$\bar{x}(T_f) = \bar{a}, \quad (3.8)$$

где вектор  $\bar{a} = \|a_1, a_2, \dots, a_{\tilde{n}}\|^T$  – вектор заданных чисел;  $\tilde{n}$  – размерность обобщённого вектора состояния КФС. Таким образом, задача выбора оптимальных технологий и программ УСД КФС сводится к поиску вектора  $\bar{\psi}(T_0)$ , который обращает компоненты вектор-функции

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}(\bar{\psi}(T_0)) = \bar{x}(T_f) - \bar{a} \quad (3.9)$$

в нули. Необходимо отметить, что задача отыскания нулей функции (3.9) эквивалентна задаче поиска минимума функции

$$\Delta_u(\bar{\psi}(T_0)) = \frac{1}{2}(\bar{a} - \bar{x}(T_f))^T(\bar{a} - \bar{x}(T_f)). \quad (3.10)$$

Существенная особенность задач (3.9), (3.10) состоит в том, что функциональная зависимость между  $\bar{\psi}(T_0)$  и вектором  $\bar{\rho}(T_f) = (\bar{a} - \bar{x}(T_f))$  задана опосредованно, через систему дифференциальных уравнений (3.1). Из-за указанной особенности, рассматриваемые краевые задачи решаются, как правило, численными методами.

Ранее в работах [66-76] была проведена классификация методов и алгоритмов решения задач оптимального управления. Обобщённо данную классификацию можно представить в виде морфологического дерева, изображённого на рисунке 32.

## Методы и алгоритмы решения задач оптимального управления (ЗОУ)

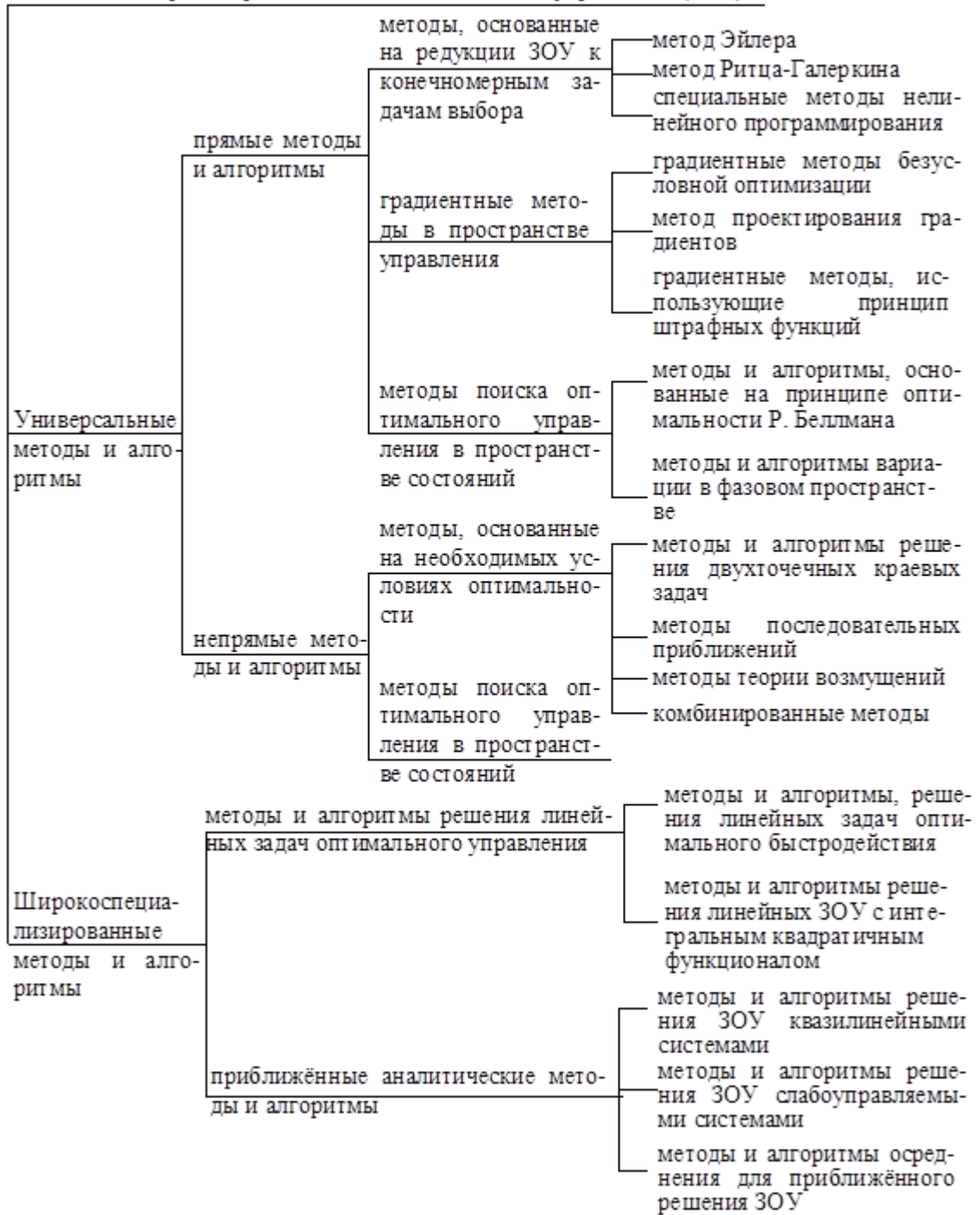


Рисунок 32. Классификация методов и алгоритмов решения задач оптимального управления

Проведённый анализ показывает, что при численном решении рассматриваемых двухточечных краевых задач с закреплённым левым и правым концом фазовой траектории  $\vec{x}(t)$  и фиксированном интервалом времени  $(T_0, T_f]$ , наиболее широкое распространение на практике получили следующие методы:

- методы Ньютона и различные его модификации [67, 68, 72];
- методы штрафных функционалов [67, 70];
- градиентные методы [67, 68, 70, 72].

Остановимся более подробно на особенностях реализации указанных методов и алгоритмов применительно к поставленной задаче.

Метод Ньютона и его модификации. Суть метода Ньютона состоит в следующем: задаётся начальное приближение  $\bar{\psi}(T_0) = \bar{\psi}_{(0)}(T_0)$ . Последующие приближения находятся по следующей формуле:

$$\bar{\psi}_{(r)}(T_0) = \bar{\psi}_{(r-1)}(T_0) - \left[ \frac{\partial \bar{\rho}_{(r-1)}(T_f)}{\partial \bar{\psi}_{(r-1)}(T_0)} \right] \bar{\rho}_{(r-1)}(T_f), \quad (3.11)$$

где  $\bar{\rho}_{(r)}(T_f) = \bar{a} - \bar{x}_{(r-1)}(T_f)$ ,  $r = 1, 3, \dots$ .

Наиболее трудоёмкой операцией при реализации метода Ньютона является операция вычисления матрицы частных производных вида:

$$\tilde{\Pi} = \left( \frac{\partial \bar{\rho}_{(r-1)}(T_f)}{\partial \bar{\psi}_{(r-1)}(T_0)} \right). \quad (3.12)$$

Данная матрица в общем случае должна вычисляться численно на каждой итерации ( $r = 1, 2, \dots$ ) либо по конечноразностным формулам, либо путём интегрирования системы в вариациях относительно исходной системы. Наряду с методом Ньютона можно применять различные его модификации. Простейшая из них состоит в том, что вместо формулы (3.11) используется следующее соотношение

$$\bar{\psi}_{(r)}(T_0) = \bar{\psi}_{(r-1)}(T_0) - \gamma_{(r)} \tilde{\Pi}^{-1} \bar{\rho}_{(r-1)}(T_f), \quad (3.13)$$

где  $\gamma_r$  ( $0 \leq \gamma_r \leq 1$ ) подбирается на каждой итерации так, чтобы удовлетворялось условие

$$\Delta_u(\bar{\psi}_{(r)}(T_0)) < \Delta_H(\bar{\psi}_{(r-1)}(T_0)). \quad (3.14)$$

На каждой итерации в начале полагается  $\gamma_{(r)} = 1$  и проводится проверка условия (3.14). Если оно выполняется, то осуществляется переход к последующим итерациям, в противном случае производится последовательное присвоение коэффициенту  $\gamma_{(r)}$  значений  $1/3$ ,  $1/4$  и т.д. пока не будет удовлетворено условие (3.14). В целом процесс решения задачи должен заканчиваться, если  $\Delta_u(\bar{\psi}_{(r)}(T_0)) < \varepsilon_u$ , где  $\varepsilon_u$  – заданная точность.

Достоинство метода Ньютона и его модификаций состоит в простоте реализации (нет необходимости в данном случае проводить интегрирование сопряжённой системы уравнений вида (3.2)), высокой скорости сходимости (в случае удачного выбора  $\bar{\psi}(T_0)$  – первого приближения вектора сопряжённой системы) и высокой точности решения. Основным недостатком как метода Ньютона, так и его модификаций, заключается в том, что сходимость данных методов

существенно зависит от того, как выбрано  $\bar{\psi}(T_0)$ . В случае отсутствия хорошего начального приближения (в нашем случае – хорошего эвристического допустимого плана функционирования КФС), указанные методы расходятся. Кроме того, анализ показывает, что в том случае, если вектор  $\bar{\rho}(T_f)$  имеет большую размерность, то при реализации метода Ньютона и его модификаций могут возникнуть существенные вычислительные трудности, вызванные необходимостью вычисления и обращения матриц вида (3.12).

Метод штрафных функционалов. Остановимся на основных особенностях применения данного метода при решении рассматриваемых двухточечных краевых задач. В этом случае наряду с основным функционалом  $J_{ob}$  в задаче УСД КФС вводят расширенный функционал вида

$$\tilde{J}_{ob,p} = J_{ob} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\tilde{n}} C_i (a_i - x_i(T_f))^2, \quad (3.15)$$

где  $C_i$  – положительные коэффициенты. При достаточно больших значениях  $C_i$  минимум функционала  $J_{ob,p}$  достигается там, где  $\rho_i(T_f) = 0$ , так как погрешность в удовлетворении хотя бы одного краевого условия (3.8) приводит к возрастанию функционала (3.15). Алгоритм решения краевой задачи в этом случае заключается в следующем: на каждой итерации проводится поиск  $u_{(r)}(t)$  при фиксированном  $C_i$  (например, используя метод Ньютона). Если точность удовлетворения краевых условий недостаточна, то проводят увеличение коэффициентов  $C_i$  в несколько раз и переходят к новой итерации. Решение считается полученным при достижении заданной точности выполнения краевых условий (3.8).

Необходимо отметить, что метод штрафных функционалов, несмотря на кажущуюся простоту и оригинальность, обладает одним существенным недостатком: получить точное решение, используя данный метод, очень трудно. Поэтому данный метод целесообразно комбинировать с другими вычислительными методами.

Градиентные методы. Рассматриваемую двухточечную краевую задачу можно решить, используя разнообразные градиентные методы, методы обобщённых градиентов (субградиентов). Итерационная формула алгоритмов градиентного типа имеет вид

$$\bar{\psi}_{(r)}(T_0) = \bar{\psi}_{(r-1)}(T_0) + \gamma_{(r)} \bar{\Delta}_{(r-1)}, \quad (3.16)$$

где  $r = 1, 2, 3, \dots$  – номер итерации;  $\bar{\Delta}_{(r-1)}$  – некоторый вектор, например, градиент функции  $\Delta_u$  вида

$$\Delta_{(r-1)} = \text{grad} \Delta_u (\bar{\psi}_{(r-1)}(T_0)) = \left\| \frac{\partial \Delta_u}{\partial \bar{\psi}_{\langle 1, (r-1) \rangle}}, \dots, \frac{\partial \Delta_u}{\partial \bar{\psi}_{\langle \tilde{n}, (r-1) \rangle}} \right\|^T,$$

определяющий направление движения из точки  $\bar{\psi}_{(r-1)}(T_0)$ ,  $\gamma_{(r)}$  – шаговый множитель, величина которого определяет величину шага в направлении  $\Delta_{(r-1)}$ . Итеративные алгоритмы,

строящиеся с использованием субградиентов (обобщённых градиентов), отличаются от соответствующих градиентных алгоритмов лишь тем, что вместо градиента  $\Delta_{(r-1)}$  в формулу (3.16) вводится тот или иной субградиент.

В задачах УСД КФС в качестве субградиента можно, как показывает анализ [75], выбрать следующее выражение:

$$\Delta_{\langle i, (r-1) \rangle} = a_i - x_{\langle i, (r-1) \rangle}(T_f).$$

Тогда основная итерационная формула переписывается в следующем виде

$$\bar{\Psi}_{\langle i, (r) \rangle}(T_0) = \bar{\Psi}_{\langle i, (r-1) \rangle}(T_0) + \gamma_{\langle i, r \rangle} (\bar{a}_i - \bar{x}_{\langle i, r \rangle}(T_f)), \quad (3.17)$$

где  $\gamma_{\langle i, r \rangle}$  выбирается по определённому правилу. Например,

$$\gamma_{\langle i, r \rangle} = \begin{cases} \frac{1}{2} \gamma_{\langle i, (r-1) \rangle}, & \text{если } \text{sign} dx_i \neq \text{sign} dx_{1_i} \neq \text{sign} dx_{2_i}; \\ \gamma_{\langle i, (r-1) \rangle}, & \text{в противоположном случае,} \end{cases}$$

где  $dx_i = a_i - x_{\langle i, r \rangle}$  – невязка по краевым условиям на итерации  $r$ ;  $dx_{1_i} = a_i - x_{\langle i, (r-1) \rangle}$ ,  $dx_{2_i} = a_i - x_{\langle i, (r-1) \rangle}$  соответственно невязки по краевым условиям на итерации  $(r-1)$ ,  $(r-3)$ . Основное достоинство данного подхода состоит в том, что при его реализации не требуется вычисление градиентов функций  $\bar{r}_{(r)}(T_f)$  и поэтому существенно сокращается объём вычислений по сравнению с «чисто» градиентными методами. Однако основной недостаток градиентных (субградиентных) методов заключается в их медленной сходимости (а в ряде случаев и расходимости). Скорость сходимости численных алгоритмов, построенных на базе градиентных методов, существенно зависят от того, как выбрано начальное приближение  $\bar{\Psi}_{(0)}(T_0)$ .

Таким образом, делая общий вывод по результатам анализа существующих методов численного решения задач оптимального программного управления следует указать на необходимость их комбинированного использования, при котором происходит взаимная компенсация недостатков каждого из предлагаемых методов. Поэтому поиск  $\bar{\Psi}_{(0)}(T_0)$  в задачах выбора оптимальных технологий и программ УСД КФС будем осуществлять в два этапа [72, 75]. На первом этапе будем искать решение задачи УСД КФС при отсутствии жёстких ограничений на значение краевых условий в момент  $t = T_f$ . В результате решения данной задачи оптимального управления со свободным краевым концом получаем некоторое приближение  $\tilde{\Psi}_{(r)}(T_0)$  ( $r = 1, 2, \dots$ ).

Далее, на втором этапе, принимая в качестве начального значения  $\tilde{\tilde{\Psi}}_{(0)}(T_0) = \tilde{\Psi}_{(r)}(T_0)$  и используя метод Ньютона (либо метод штрафных функционалов или градиентные методы), можно за конечное число шагов найти решение исходной задачи выбора оптимальных технологий и программ УСД КФС.

Рассмотрим один из наиболее эффективных методов решения задач оптимального программного управления со свободным правым концом – метод Крылова-Черноушко [144]. Общая вычислительная схема данного метода применительно к исследуемой задаче состоит в следующем.

**Шаг 1** – задаётся диспетчерское решение (допустимое программное управление КФС)  $\vec{u}_d(t), \forall t \in (T_0, T_f], \vec{u}_d(t) \in M$ .

**Шаг 3** – интегрируется основная система уравнений (3.1) с начальными условиями  $\vec{h}_0(\vec{x}(T_0)) \leq \vec{O}$ . В результате интегрирования получается фазовая траектория  $\vec{x}_d(t) \forall t \in (T_0, T_f]$ .

**Шаг 3** – интегрируется сопряжённая система уравнений (3.2) от момента времени  $t = T_f$  до момента времени  $t = T_0$  с начальными условиями вида:

$$\psi_{\langle i, d \rangle}(T_f) = \frac{1}{2} \frac{\partial (a_i - x_{\langle i, d \rangle}(T_f))^2}{\partial x_{\langle i, d \rangle}}, \quad i = 1, \dots, \tilde{n}, \quad (3.18)$$

где (3.18) есть условия трансверсальности в задаче оптимального управления со свободным правым концом. В результате интегрирования становятся известными функции времени  $\psi_{\langle i, d \rangle}$ , и, что самое главное,  $\psi_{\langle i, d \rangle}(T_0)$ .

**Шаг 4** – ищется управление  $\vec{u}_{(r)}(t)$ , исходя из условия

$$H(\vec{x}_{(r)}(t), \vec{u}_{(r+1)}(t), \vec{\psi}_{(r)}(t)) = \max_{\vec{u}_{(r)} \in M} H(\vec{x}_{(r)}(t), \vec{\psi}_{(r)}(t), \vec{u}_{(r)}(t)), \quad (3.19)$$

где  $r = 1, 3, \dots$  – номер итерации. Диспетчерское решение соответствует итерации с номером  $r = 0$ . Одновременно с максимизацией гамильтониана (3.19) интегрируется основная и сопряжённая системы уравнений (3.1), (3.2) от  $t = T_0$  до  $t = T_f$ .

При этом, в каждый момент времени решается несколько задач математического программирования (их максимальное число определяется общим количеством используемых при УСД КФС моделей), представляющих из себя отдельные компоненты (составляющие) функции Гамильтона. На этом заканчивается первая итерация ( $r = 1$ ). Затем, если выполняются условия

$$|J_{ob}^{(r)} - J_{ob}^{(r-1)}| \leq \varepsilon_1, \quad (3.20)$$

$$\|\vec{u}_{(r)}(t) - \vec{u}_{(r-1)}(t)\| \geq \varepsilon_2, \quad (3.21)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – заданные константы, определяющие точность выполнения условий (3.20), (3.21), то уже на первой итерации получено экстремальное управление  $\vec{u}_{(r)}^*(t) = \vec{u}_{(r)}(t)$  и  $\vec{\psi}_{(r)}(T_0)$ . Если указанные условия не выполняются, то осуществляется переход на шаг 3 и т.д.

В общем случае (модель  $M$ ) величина шага процедуры численного интегрирования дифференциальных уравнений (3.1), (3.2) выбирается исходя из соображений допустимого уровня аппроксимации данных уравнений конечно-разностными соотношениями и

соответствующих границ справедливости принципа максимума. Если провести линеаризацию моделей управления движением КФС ( $M_{\langle g, \Theta \rangle}$ ), то тогда для указанной модели и всех остальных моделей, входящих в состав модели  $M$  ( $M_{\langle o, \Theta \rangle}$ ,  $M_{\langle k, \Theta \rangle}$ ,  $M_{\langle p, \Theta \rangle}$ ,  $M_{\langle n, \Theta \rangle}$ ,  $M_{\langle e, \Theta \rangle}$ ,  $M_{\langle c, \Theta \rangle}$ ,  $M_{\langle v, \Theta \rangle}$ ) и являющихся конечномерными нестационарными линейными динамическими системами (для  $M_{\langle k, \Theta \rangle}$  – билинейными динамическими системами), интегрирование основной и сопряжённой систем уравнений сводится к простейшим рекуррентным соотношениям, основанным на методе Эйлера.

Достоинство данного метода состоит в том, что его сравнительно просто можно реализовать на ЭВМ, при этом не требуется больших затрат памяти. Метод Крылова-Черноусько не столь чувствителен к выбору начального приближения допустимого управления  $\bar{u}_d(t)$  по сравнению с перечисленными ранее методами. Кроме того, при использовании данного метода последовательные приближения управляющих воздействий проводятся в классе разрывных функций. Это является удобным, так как при выборе оптимальных программ УСД КФС распределение её большинства ресурсов носит релейный характер.

Вместе с тем, следует подчеркнуть, что простейший метод последовательных приближений (ПМП) расходится. Поэтому для улучшения сходимости ПМП постоянно предлагаются различные его модификации [145]. В работе [146] показано, что предложенные к настоящему времени модификации ПМП гарантируют монотонную сходимость при решении двухточечных краевых задач в том случае, когда дифференциальные уравнения, описывающие изменение состояния соответствующей динамической системы, являются линейными, а область допустимых управлений и целевая функция являются выпуклыми. Рассмотрим один из существующих вариантов улучшения сходимости ПМП.

В этом случае формула (3.19), служащая для определения нового приближения  $\bar{u}_{(r)}(t)$ , применяется не на всём отрезке  $\sigma = (T_0, T_f]$ , а лишь на его части  $\sigma' = (t', t'']$ , т.е.

$$\bar{u}_{(r+1)}(t) = \tilde{N}(\bar{u}_{(r)}(t)), \quad t \in (t', t'']; \quad \bar{u}_{(r+1)}(t) = \bar{u}_{(r)}(t), \quad t \notin (t', t''], \quad (3.22)$$

где  $\tilde{N}$  – оператор, который каждому допустимому управлению  $\bar{u}(t)$  ставит в соответствие новое приближение по схеме, изложенной ранее [см. формулу (3.19)].

Интервал  $(t', t'']$ , входящий в интервал  $(T_0, T_f]$ , выбирается так, чтобы выполнялось условие

$$J_{ob}^{(r+1)} < J_{ob}^{(r)},$$

где  $J_{ob}^{(r+1)}, J_{ob}^{(r)}$  – значения обобщённого показателя качества, отвечающие управлениям  $\bar{u}_{(r+1)}(t)$ ,  $\bar{u}_{(r)}(t)$  соответственно. Подбор чисел  $t', t''$  на каждой итерации происходит с учётом специфики решаемой задачи. Проведённый анализ показывает, что в рассматриваемой задаче



выбора программ управления множество моментов времени  $(\tilde{t}'_{<e,(r+1)>}, \tilde{t}''_{<e,(r+1)>})$ ,  $e = 1, \dots, E_r$  на  $(r+1)$ -й итерации формулируется при максимизации функции Гамильтона (3.19) на  $r$ -й итерации из тех моментов времени, в которые происходит прерывание операций в моделях  $M$ . Указанная выше идея определения интервала времени  $(t', t'']$  была реализована при разработке и реализации **комбинированного** метода и алгоритма выбора оптимальных технологий и программ УСД КФС, построенных на основе метода «ветвей и границ» и метода последовательных приближений.

### 3.2. Комбинированный метод и алгоритм решения задачи выбора оптимальных технологий и программ управления структурной динамикой КФС в детерминированных условиях

Рассмотрим содержание предлагаемых метода и алгоритма для случая использования двух классов моделей:

- моделей программного управления операциями  $M_{<o>}$ ;
- моделей программного управления вспомогательными операциями  $M_{<v>}$ .

При реализации предлагаемого комбинированного метода и соответствующего алгоритма наряду с основной задачей программного управления (обозначим её буквой  $\Gamma$ ) рассматривается релаксированная задача выбора оптимальных технологий и программ УСД КФС (обозначим её буквой  $P$ ), в которой сняты ограничения, связанные с требованиями неразрывного выполнения операций взаимодействия  $D_{\alpha}^{(i)}$ . Пусть целевая функция в задаче  $\Gamma$  имеет следующий вид

$$J_p = \left\{ J_{ob} + \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^{s_i} \sum_{j=1}^m \sum_{\lambda=1}^l \left[ z_{i\alpha j \lambda}^{(o,1)} z_{i\alpha j \lambda}^{(o,3)} + \frac{(a_{i\alpha})^2}{2} - z_{i\alpha j \lambda}^{(o,2)} \right]^2 \left( z_{i\alpha j \lambda}^{(o,1)} \right)^2 \right\} \Big|_{t=T_f} \quad (3.23)$$

В выражении (3.23) вторая компонента является тем дополнительным показателем, с помощью которого оцениваются потери из-за невыполнения краевых условий и ограничений на неразрывное выполнение операций взаимодействия (ОВ) в КФС. Сформулируем теорему о свойствах, которых должна удовлетворять релаксированная задача оптимального выбора технологий и программ УСД КФС. Ранее в работе [126] была доказана следующая теорема, которая была положена в основу предлагаемого комбинированного метода.

**ТЕОРЕМА.** Пусть задача  $P$  является релаксированной задачей по отношению к задаче  $\Gamma$ . Тогда

- а) если задача  $P$  не имеет допустимых решений, то  $\Gamma$  также их не имеет;
- б) значение минимума обобщённого показателя в  $P$  не больше, чем в  $\Gamma$ ;

в) если оптимальное программное управление для задачи Р допустимо в задаче Г, то данное управление и есть оптимальное решение задачи Г.

Доказательство данной теоремы сводится к следующему.

А. Анализ задачи Р показывает, что данная задача не имеет допустимых решений в том случае, когда нет ни одного управляющего воздействия  $\vec{u}(t)$ , с помощью которого динамическую систему (3.23) можно перевести из заданного начального состояния  $\vec{x}(T_0)$  в заданное конечное состояние  $\vec{x}(T_f)$ . Данные краевые условия присутствуют и в задаче Г. Поэтому их невыполнение в задаче Р влечёт за собой невыполнение данных условий и в задаче Г.

В. Из рассмотрения выражения (3.23) следует, что в задаче Р значение функционала  $J_{ob}$  будет меньше значения целевой функции  $J_p$  в задаче Г на величину выражения, количественно характеризующего потери из-за прерываний ОВ.

С. При доказательстве данного пункта будем предполагать, что известно оптимальное программное управление КФС в задаче Р  $\vec{u}_p^*(t)$ ,  $\forall t \in (T_0, T_f]$ , которое является допустимым в задаче Г;  $\vec{x}_p^*(t)$  – решение дифференциальных уравнений, описывающих модели  $M_{<o>}$ ,  $M_{<v>}$ . В этом случае  $\vec{u}_p^*(t)$  удовлетворяет основным соотношениям метода локальных сечений (максимизирует гамильтониан) и в задаче Г. Можно показать, что функционал (3.23) в указанной ситуации достигает минимума при  $\vec{u}_p^*(t)$ ,  $\vec{x}_p^*(t)$ . В основу решения задачи УСД КФС положена, как указывалось выше, схема комбинированного использования МПП и метода «ветвей и границ». Рассмотрим содержание основных шагов алгоритма.

Вычислительная схема данного алгоритма взята из работы [46] и состоит в следующем.

**Шаг 1.** Задаётся диспетчерское решение (произвольное допустимое управление или, по-другому, допустимый план)  $\vec{u}_g(t)$ ,  $t \in (T_0, T_f]$ . В качестве  $\vec{u}_g(t)$  может быть выбран и  $\vec{u}_g(t) \equiv \vec{O}$ .

**Шаг 2.** Интегрируется основная система уравнений (3.1) с начальными условиями  $\vec{h}_0(\vec{x}(T_0)) \leq \vec{O}$  и  $\vec{u}(t) = \vec{u}_g(t)$ . В результате интегрирования получается  $\vec{x}^{(o)}(t)$ , кроме того, в момент времени  $t = T_f$  определяем  $J_p = J_p^{(o)}$ , которое принимаем за рекорд; вычисляются условия трансверсальности (3.5).

**Шаг 3.** Интегрируется сопряжённая система уравнений вида (3.2) с начальными условиями (3.5) от  $t = T_f$  до  $t = T_0$  с  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_g(t)$ . В момент времени  $t = T_0$  получаем первое приближение  $\Psi_i^{(o)}(t_0)$ . На этом заканчивается итерация с номером  $r = 0$ .

**Шаг 4.** Начиная с момента времени  $t = T_0$  ищется управление  $u^{(r+1)}(t)$  ( $r = 0, 1, 3, \dots$  – номер итерации) исходя из условия (3.19). Одновременно с максимизацией гамильтониана интегрируются основная и сопряжённая системы уравнений. При этом в каждый момент времени решаются параллельно несколько классов задач математического программирования.

Если в процессе максимизации гамильтониана в некоторый момент времени  $\tilde{t}$ ,  $\tilde{t} \in (T_0, T_f]$ , более приоритетная операция взаимодействия  $D_\xi^{(o)}$  прерывает ОВ  $D_x^{(i)}$ , то в этот момент времени проводится ветвление (разбиение) исходной задачи  $\Gamma$  на две подзадачи  $(P_x^{(i)}, P_\xi^{(o)})$ .

В задаче  $P_x^{(i)}$  вводится запрет на прерывание ОВ  $D_x^{(i)}$  и далее с использованием метода последовательных приближений решается релаксированная задача планирования. Значение целевой функции (3.23) в этом случае обозначим через  $J_{p0}^{(1)}$ . В задаче  $P_\xi^{(o)}$  ранее начавшаяся ОВ  $D_x^{(i)}$  снимается с выполнения, а в момент времени  $\tilde{t}$  начинает выполняться ОВ  $D_\xi^{(o)}$ . При этом, если во фронте предлагаемых для выполнения операций существует менее приоритетные, чем ОВ  $D_x^{(i)}$  операции, которые могут быть завершены до момента времени  $\tilde{t}$  на освободившемся (после снятия с выполнения  $D_x^{(i)}$ ) ресурсе, то для этих ОВ в соответствии с (3.19) проводится распределение соответствующего ресурса. Далее, после выполнения ОВ  $D_\xi^{(o)}$  решается релаксированная задача планирования. Значение целевой функции (3.23) в этом случае обозначим  $J_{p1}^{(1)}$ . Если  $J_{p0}^{(1)} < J_p^{(0)}$  или  $J_{p1}^{(1)} < J_p^{(0)}$  [в предположении, что решается задача минимизации функционала (3.23)], то за рекорд принимается соответственно  $J_p = J_{p0}^{(1)}$  или  $J_p = J_{p1}^{(1)}$ . В этом случае, если выполняются оба неравенства, то за рекорд принимается  $J_p = \min\{J_{p0}^{(1)}, J_{p1}^{(1)}\}$ , а конфликтная ситуация разрешается следующим образом: если  $J_{p0}^{(1)} < J_{p1}^{(1)}$ , то при максимизации (3.19) вводится запрет на прерывание  $D_x^{(i)}$ , в противном случае, если  $J_{p0}^{(1)} > J_{p1}^{(1)}$ , то ОВ  $D_x^{(i)}$  вводится в гамильтониан в момент времени  $\tilde{t}$  – момент прихода более приоритетной ОВ  $D_\xi^{(o)}$ .

Далее, после разрешения указанной конфликтной ситуации, продолжается распределение ресурсов системы управления КФС, исходя из соотношения (3.19) с учётом требований неразрывности выполнения операций взаимодействия до новой конфликтной ситуации, которая разрешается по аналогичной схеме. Рассмотренный вариант разрешения конфликтной ситуации при дихотомическом ветвлении можно обобщить на случай  $\bar{k}$ -ного ветвления, где  $\bar{k}$  – число одновременно прерванных ОВ в некоторый момент  $\tilde{t}$ .

Итерационный процесс поиска оптимального плана заканчивается при следующих условиях: либо когда в процессе решения релаксированной задачи получаем допустимое

решение задачи Г, либо в том случае, когда после окончания интегрирования на шаге 4 алгоритма выполняются условия

$$|J_p^{(r+1)} - J_p^{(r)}| < \varepsilon_1, \quad (3.24)$$

где  $\varepsilon_1$  – заданная величина,  $r = 0, 1, \dots$ . Если условие (3.24) не выполняется, то происходит повторение шага 3 и т.д.

При этом множество моментов времени, в которые проводится максимизация гамильтониана на  $(r+1)$ -й итерации, в данном случае формируется при максимизации гамильтониана на  $r$ -й итерации из тех моментов времени, в которые на  $r$ -й итерации происходило прерывание менее приоритетных ОВ. Вычислительная эффективность (трудоемкость) предложенного алгоритма на одной итерации приближенно может быть оценена по следующей формуле

$$\bar{N} \leq C(\bar{m}_1) \bar{K}_1 \bar{K}_2 \left( \frac{\bar{\sigma}}{\Delta t} \right), \quad (3.25)$$

где  $\bar{N}$  – среднее число операций типа сложения на одной итерации;  
 $\bar{C}(\bar{m}_1) = \frac{11\bar{m}_1^3 + 12\bar{m}_1^2 + 2\bar{m}_1}{6}$  – максимальное число операций типа сложения выполняемых при решении задачи о назначениях венгерским методом в каждый текущий момент времени [при максимизации (3.19)] на интервале планирования;  $\bar{m}_1$  – максимальная размерность указанной задачи о назначениях, которая определяется числом независимых путей в заданном сетевом графике комплекса ОВ;  $\bar{\sigma}$  – длина интервала планирования,  $\Delta t$  – шаг интегрирования основной и сопряженной систем уравнений;  $\bar{K}_1$  – максимальное число прерываний на одной итерации  $\left( \bar{K}_1 = \frac{\sigma}{\Delta t} \right)$ ;  $\bar{K}_2$  – максимальное число ветвлений при каждом прерывании ( $\bar{K}_2 = ns$ ).

Анализ результатов решения на ЭВМ задач выбора оптимальных технологий и программ управления структурной динамикой КФС с использованием предложенного алгоритма показал, что его скорость сходимости в наибольшей степени зависит от выбора первого приближения вектора сопряженной системы  $\bar{\psi}(t_0)$ , задание которого, в свою очередь, определяется «диспетчерским» (допустимым) управлением, формируемым на первой итерации. При этом, в процессе решения задачи планирования при распределении ресурсов наземных технических средств в каждый момент времени предпочтение тем ОВ, чей «динамический» приоритет в данный момент времени больше. В этом случае «динамический» приоритет трактуется значительно шире, чем это делалось во всех предыдущих работах по данной тематике [119, 147].

В 5 главе диссертации будут подробно проанализированы особенности алгоритмической и программной реализации предлагаемого метода применительно к космической сфере.

### **3.3. Содержание и особенности реализации основных этапов решения задач синтеза технологий и комплексного планирования функционирования системы управления КФС**

#### **3.3.1. Особенности решения задач синтеза технологий и комплексного планирования функционирования системы управления КФС**

Анализ возможных вариантов функционирования системы управления КФС в различных условиях обстановки показывает, что в общем случае при комплексном планировании операций и управлении структурами приходится решать не одну, а целую совокупность сложных взаимообусловленных задач многоуровневого, многоэтапного и многокритериального выбора с учётом факторов неопределённости. Перед тем, как непосредственно перейти к рассмотрению основных этапов решения указанных задач остановимся несколько подробнее на основных особенностях процесса реализации данных этапов.

Первая и, пожалуй, самая главная особенность решения задач комплексного планирования состоит в необходимости в процессе поиска оптимальных программ управления основными элементами и подсистемами системы управления постоянно осуществлять согласование разнородных моделей, полученных в результате формальной, либо неформальной декомпозиции решаемых задач. При этом наряду с собственно модельным согласованием при решении задач анализа и оптимизации должно проводиться межмодельное и (или) внутримодельное согласование критериальных (целевых) функций, с помощью которых проводится сравнение различных альтернативных вариантов функционирования системы управления КФС.

В зависимости от этапа и особенностей решения той или иной задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования (задачи А, Б, С, см. параграф 1.6) межмодельное согласование может проводиться как на концептуальном, так и на алгоритмическом, информационном, программном уровне описания.

Вторая особенность задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС состоит в обязательном проведении предварительного анализа существования решения задач комплексного планирования. Необходимость анализа корректности согласования (синтеза) многомодельного комплекса специального программно-математического обеспечения (СПМО) является своего рода платой за полноту и адекватность представления исследуемой системы.

Решение задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования происходит в условиях существенной критериальной и модельной неопределенности, связанной с

отсутствием достоверных сведений о реальном состоянии элементов и подсистем системы управления КФС, о возможных вариантах воздействия внешней среды на системы управления КФС на этапе реализации плана. Указанные обстоятельства приводят к необходимости активного участия ЛПР в решении задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования, так как только в этом случае, оптимально синтезируя в рамках СПМО возможности человека и ЭВМ, удаётся в интерактивном режиме привнести в модели и алгоритмы планирования такую дополнительную информацию, которая позволит корректно сформулировать (доопределить) и решить соответствующие задачи программного управления. При этом в самом СПМО а также в общесистемном ПО должны быть предусмотрены инструментальные программные средства, обеспечивающие взаимодействие ЛПР с моделями и алгоритмами синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС на профессионально ориентированном языке, близком к естественному. Указанная (третья) особенность решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС тесно связана с возможными направлениями реализации принципа внешнего дополнения при разработке и создании СПМО.

Еще одна особенность организации процесса решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования, проведения соответствующего системного моделирования состоит в том, что на всех его этапах должны широко использоваться современные средства автоматизации моделирования, решения задач анализа и оптимизации (языки имитационного Моделирования, стандартные пакеты прикладных программ и т.п.). В противном случае синтеза технологий и комплексных планов функционирования станет невозможным из-за очень больших затрат времени, денежных средств и других ресурсов, которые нужно выделять каждый раз в случае отсутствия необходимых унифицированных средств автоматизации моделирования.

Основная идея решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС в рамках предлагаемой ИмС и СПМО основывается на последовательном сужении (сжати) множества допустимых альтернатив (множества допустимых планов применения системы управления КФС) путём отбраковки их в соответствии с отношениями предпочтения, заданными на многомодельном комплексе. При этом в начале решения (когда размерность задач планирования велика) отбраковка альтернатив может проводиться на грубых (упрощённых, агрегированных) моделях синтеза технологий и комплексных планов функционирования, однако по мере уточнения получаемых решений с помощью ЛПР в СПМО осуществляется переход к всё более полным и корректным моделям.

Указанная выше процедура близка по своему идейному содержанию к методам последовательного анализа вариантов и «ветвей и границ».

В заключение данного параграфа отметим, что, как и раньше, основное внимание при рассмотрении этапов решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования уделим наиболее часто встречающейся на практике ситуации, при которой осуществляется централизованное планирование работы элементов и подсистем системы управления КФС. Далее в пункте 3.3.6 будут проанализированы особенности решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования при децентрализованном и региональном способах применения элементов и подсистем системы управления КФС.

### 3.3.2. Этап подготовки к решению задач комплексного планирования

Данный этап включает в себя следующие основные шаги.

Шаг 1. В интерактивном режиме осуществляется автоматизированная подготовка, контроль, анализ и ввод необходимых для решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования исходных данных (ИД). При отсутствии требуемых ИД происходит либо их генерация с использованием комплекса моделей, либо указанные ИД формируются на основе экспертного опроса. Стандартный набор ИД для синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС приведён в параграфе 1.6.

Шаг 2. Планирование самого процесса планирования: выбор и оптимизация технологии решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования, определение необходимых затрат времени и ресурсов, выделяемых в системы управления КФС на реализацию каждого этапа синтеза технологий и комплексных планов функционирования с учётом директивного времени окончания этапа планирования, имеющихся ИД, складывающейся обстановки. Кроме того, на данном шаге определяется структура и состав моделей и алгоритмов, используемых при синтезе технологий и комплексных планов функционирования.

Проведённые исследования показывают, что задача оптимального синтеза вычислительных технологий и планирования процесса планирования близка по своему содержанию к задаче оптимального распределения ресурсов и выбора структуры математического обеспечения модульной системы обработки данных [148]. В работах [148, 149] приведены конкретные подходы к решению задач данного класса.

Шаг 3. На основании предварительно проведённого качественного анализа рассматриваемых задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС и времени, отводимого на их решение в интерактивном режиме,

осуществляется формирование конкретных систем дифференциальных уравнений, описывающих основную и сопряжённую систему уравнений, формирование функции Гамильтона, множества критериальных функций и множества пространственно-временных, технических и технологических ограничений, соответствующих складывающейся на интервале планирования обстановке.

При формировании набора алгоритмов решения рассматриваемых задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС следует учитывать, что в данных задачах процедуры координационного выбора могут строиться по различным схемам. Принято выделять следующие варианты классификации моделей и алгоритмов координации:

а) в моделях координационного выбора целевые функции элементов и подсистем ( $\gamma$ -го) уровня иерархической структуры системы управления КФС строятся на основе декомпозиции целевой функции координатора ( $\gamma+1$ )-го уровня;

б) целевая функция координатора ( $\gamma+1$ )-го уровня строится на основе композиции целевых функций подсистем с учётом их относительной важности, а координатор согласует планы работы элементов и подсистем ( $\gamma$ ) уровня, исходя из их ограниченных общих ресурсов;

в) элементы и подсистемы ( $\gamma$ ) уровня системы управления КФС имеют собственные интересы и соответствующие им целевые функции, которые координатор ( $\gamma+1$ )-го уровня учитывает при выборе координирующего воздействия в соответствии со своей целевой функцией, отражающей интересы системы управления КФС на ( $\gamma+1$ )-м уровне.

Кроме того, для вариантов б), в) принято различать два подхода к организации итеративного процесса координации:

- процесс координации осуществляется путём реального итеративного обмена информацией между координатором, и подсистемами;
- после получения и анализа информации подсистем координатор сам осуществляет весь итеративный процесс с целью выработки координирующего сигнала, который сообщается подсистемам.

Наряду с формированием моделей синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС на данном этапе должно проводиться исследование следующих вопросов:

- анализ существования и единственность оптимальных программ управления элементами и подсистемами системы управления КФС;



- оценка управляемости и достижимости в задачах синтеза технологий и комплексных планов функционирования;
- анализ корректности постановки задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования.

Шаг 4. Важную роль на этапе подготовки к решению задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования играет оценка принципиальной возможности получения данного решения, корректности согласования моделей и алгоритмов. Для разного уровня и степени детализации описания элементов и подсистем разрабатываемого СПМО проверка корректности их согласования осуществляется своими методами.

Так, на концептуальном (категорийно-функторном) уровне описания моделей синтеза технологий и комплексных планов функционирования классы рассматриваемых динамических моделей в общем случае представляются монадными морфизмами («специальным образом построенные морфизмы в категории индексированных множеств» [150]), а их взаимодействие описывается многокомпонентной конфигурационной диаграммой. В этом случае задача анализа корректности взаимодействия на категорном языке формулируется как «задача определения коммутативности конфигурационной диаграммы» и сводится к классической задаче о неподвижной точке эндоморфизма [150].

На алгоритмическом, программном и информационном уровне описания задачи проверки корректности согласования моделей синтеза технологий и комплексных планов функционирования и оценки принципиальной возможности получения программ управления элементами и подсистемами системы управления КФС сводятся к задачам планирования вычислений на комплексе вычислительных и диалоговых моделей.

Решение всех вышеперечисленных задач должно осуществляться в интерактивном режиме, в ходе которого ЛПП при отсутствии существования решения задачи планирования вычислений в зависимости от складывающейся ситуации изменяет состав и структуру моделей синтеза технологий и комплексных планов функционирования, исходные данные задачи планирования, технологию решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования. После указанных операций проводится повторное решение задачи планирования вычислений.

Шаг 5. Завершается первый этап решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования трансляцией описания вычислительных моделей указанных задач на язык формальных процедур поиска допустимых планов применения системы управления КФС.

### 3.3.3. Этап анализа целевых и информационно-технологических возможностей системы управления КФС, формирования допустимых планов применения её основных элементов и подсистем

Рассматриваемый этап включает в себя следующие основные шаги.

Шаг 1. Для сформированных на предыдущем шаге моделей синтеза технологий и комплексных планов функционирования системы управления КФС проводится построение множеств достижимости и их аппроксимация. При этом в указанные модели и соответствующие критериальные функции в агрегированном виде (с использованием заданных функций и коэффициентов) вводится информация о возможных допустимых вариантах функционирования основных элементов и подсистем системы управления КФС на интервале планирования. Данные варианты могут быть предварительно сгенерированы как на аналитико-имитационных моделях, так и получены непосредственно от соответствующих элементов и подсистем СУ КФС. Анализ показывает, что при построении множеств достижимости в задачах синтеза технологий и комплексных планов функционирования возможны следующие комбинации условий проведения координации моделей СПМО:  $a_1, b_1, v_1, a_2, b_2, v_2$  (см. в пункте 3.3.2 шаг 3). Так, например, в потоковой модели синтеза технологий и комплексных планов функционирования (модель  $M_n$ ) на основании результатов работы программ планирования и управления работой АСОД, ВСр формируется информация о возможных числовых значениях и вариантах распределения пропускных способностей каналов АСОД для фиксированных направлений обмена информацией, информация о вариантах числовых значений пропускных способностей элементов (узлов) и подсистем СУ КФС. В динамические модели программного управления параметрами операций поступает информация о функциональной зависимости, связывающей значения параметров в момент окончания выполнения соответствующих операций с временем начала их выполнения (функции  $b_{i\alpha\theta\delta}^{(n)1}$ ).

Следует подчеркнуть, что отмеченные выше особенности функционирования КФС, СО (цикличность работы, стандартная технология и т.п.) позволяют заранее (до этапа планирования) определить классы эквивалентных (с точки зрения целевых и информационно-технологических возможностей) структурных состояний СУ КФС и соответствующие множества достижимости для каждого варианта взаимодействия элементов и подсистем СУ. Это позволяет значительно повысить оперативность реализации данного этапа синтеза технологий и комплексных планов функционирования.

Шаг 2. В интерактивном режиме ЛПР проводится анализ геометрии и свойств множеств достижимости. Оценивается выполнимость заданных краевых условий в задаче синтеза технологий и комплексных планов функционирования. При этом у ЛПР имеется возможность

оперативно на экране терминального устройства ЭВМ строить как двухмерные сечения множеств достижимости в пространстве целевых функций и пространстве состояний, так и, используя полярную систему координат, анализировать в целом множество достижимости в соответствующем пространстве.

Шаг 3. Осуществляется поиск допустимого программного управления элементами и подсистемами СУ КФС. Данную задачу можно решать двумя путями. Во-первых, используя результаты предварительных исследований множеств достижимости  $D(t_f, t_0, x(t_0))$  в рассматриваемой задаче и соответствующие условия трансверсальности (3.5), проводится максимизация функции Гамильтона (3.6), интегрирование основной (3.1) и сопряжённой (3.2) систем уравнений от момента  $t_f$  до  $t_0$  с учётом заданных пространственно-временных, технических и технологических ограничений. В результате интегрирования получаем первое приближение вектора сопряжённой системы уравнений в момент времени  $t = t_0$  и соответствующее допустимое программное управление.

При втором варианте поиска допустимого плана применения элементов и подсистем СУ КФС необходимо задать эвристические правила распределения ресурсов между целевыми и технологическими операциями. В этом случае можно для каждой операции определить приоритеты, используя, например, подходы, предложенные в работах [151, 152]. Далее, используя в каждый момент времени  $t \in (t_0, t_f]$  модели синтеза технологий и комплексных планов функционирования, осуществляется распределение ресурсов СУ КФС на основании заранее рассчитанных приоритетов, определяется программа допустимого управления элементами и подсистемами СУ. Определив программу управления СУ КФС, можно осуществить интегрирование основной системы уравнений, определить значение вектора состояния  $x(t)$  в момент времени  $t = t_f$ . Далее, используя условия трансверсальности и полученную программу управления, проводится интегрирование сопряжённой системы уравнений, от момента  $t = t_f$  до момента  $t = t_0$ , определяется первое приближение вектора сопряжённой системы уравнений в момент времени  $t = t_0$ :  $\phi(t_0)$ .

Шаг 4. Завершается второй этап решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования автоматизированным вводом результатов поиска допустимого плана применения СУ КФС в модель оптимизации планов.

### 3.3.4. Этап оптимизации комплексного плана проведения операций и управления структурами СУ КФС

Процедура поиска оптимального плана применения СУ КФС сводится к решению сложной многоэтапной многоуровневой оптимизационной задачи координационного выбора в условиях неопределенности. При этом в дальнейшем будем различать факторы неопределенности, вызванные возможным возмущающим воздействием внешней среды на элементы и подсистемы СУ КФС на этапе реализации плана и «критериальную неопределенность», возникающую при решении задач векторной оптимизации.

Конструктивно межуровневое взаимодействие моделей синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС может осуществляться как с использованием технических и технологических ограничений (указанный вариант в литературе [60] назван модельной координацией), так и на основе модификации целевых функций нижестоящих уровней (так называемая целевая координация). Возможен смешанный вариант взаимодействия (модельно-целевая координация). Результаты ранее проведённых исследований показывают [126], что и в том, и в другом случае координирующими сигналами в рассматриваемых задачах синтеза технологий и комплексных планов функционирования являются компоненты вектора сопряжённой системы уравнений  $\phi(t_0)$ . В работе [147] в связи с этим указывается, что решения сопряжённой системы уравнений в задачах математического планирования являются теневыми ценами распределяемых ресурсов или, по другой терминологии, объективно обусловленными оценками. Вектор  $\phi(t_0)$  в процессе решения задач оптимизации комплексных планов применения элементов и подсистем СУ КФС определяет в пространстве  $X \subseteq \mathbb{R}^{n_{об}}$  с  $K$  в каждый момент времени  $t \in (t_0, t_f]$  такое направление вектора фазовой скорости динамической системы (модели)  $M$  в точке  $x(t)$ , вдоль которого целевая функция  $J_{об}$  убывает с наибольшей скоростью.

В основе алгоритмов поиска оптимальных программ управления элементами и подсистемами СУ КФС лежат предложенные выше процедуры решения краевых задач. К ним с помощью принципа максимума были сведены исходные задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС. В зависимости от принятой схемы решения задач координационного выбора последовательность использования указанных алгоритмов может быть различной.

Так, например, возможен вариант координации решений задач планирования, при котором на 1 шаге на каждом из уровней СУ КФС, начиная с  $\gamma = 1$  и заканчивая последним уровнем  $\gamma = \Gamma_A$  последовательно осуществляется расчёт характеристик множеств достижимости

на соответствующих моделях  $M^{(\gamma)}$  и выдача их в агрегированном виде (в виде показателей Ц и ИТВ) на вышестоящий уровень.

На 2 шаге рассматриваемой процедуры координации на каждом из уровней СУ КФС на основе анализа характеристик множеств достижимости данного и нижестоящего уровня СУ и текущей обстановки осуществляется последовательный поиск оптимального программного управления элементами и подсистемами СУ КФС, начиная с верхнего ( $\gamma = \Gamma_A$ ) уровня и заканчивая уровнем  $\gamma = 1$ . В этом случае координация решений нижестоящих уровней  $\gamma$  вышестоящими ( $\gamma + 1$ ) осуществляется либо через модификацию целевых функции, с помощью которых, например, задаются штрафы за нарушение директивных сроков выполнения операций, спланированных ранее на ( $\gamma + 1$ )-м уровне, либо через модификацию ограничений (краевых условий в модели  $M^{(\gamma)}$ , ограничений, накладываемых на класс управляющих воздействий  $Q^{(\gamma)}(\mathbf{x}^{(\gamma)}, \mathbf{x}^{(\gamma+1)})$ ).

Указанный алгоритм решения задач комплексного планирования соответствует в1, в2 вариантам реализации, предложенных выше процедур координационного выбора.

В том случае, если в СУ КФС принимаются а1, а2 варианты реализации процедур координационного выбора расчёт оптимальных программ управления элементами и подсистемами СУ КФС осуществляется последовательно "сверху-вниз". Координация получаемых на каждом из уровней планов осуществляется на основе директивного задания нижестоящему уровню ( $\gamma$ ) СУ КФС вышестоящим уровнем ( $\gamma + 1$ ) значений показателей Ц и ИТВ, которые должны быть достигнуты при решении задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования на данном ( $\gamma$ ) уровне СУ.

Наиболее сложный вариант реализации процедур координационного выбора (вариант 01, 02) соответствует случаю, когда осуществляется совместный поиск оптимальных программ управления элементами и подсистемами СУ КФС одновременно на всех иерархических уровнях в рамках обобщённой модели  $M$ . Координация решений в указанных ситуациях проводится в рамках общего алгоритма поиска оптимальных программ управления динамической системой (3.1). При этом модели синтеза технологий и комплексных планов функционирования ( $\gamma + 1$ )-го уровня СУ КФС воздействуют на модели ( $\gamma$ ) уровня координирующими сигналами, представляющими из себя компоненты вектора сопряжённой системы уравнений  $\Phi(t)$ . В ходе итерационного решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования информация о результатах функционирования моделей  $M^{(\gamma)}$  поступает в модели  $M^{(\gamma+1)}$  в виде компонент векторов  $\mathbf{u}^{(\gamma)}(t)$ ,  $\mathbf{x}^{(\gamma)}(t)$ .

Следует подчеркнуть, что во всех перечисленных выше вариантах реализации процедур координационного выбора наиболее сложным остаётся вопрос решения задач многокритериального выбора, возникающих как при межуровневой координации, так и при оптимизации показателей качества планирования на каждом из уровней СУ КФС.

В указанных ситуациях выбора первым и необходимым шагом при поиске Оптимальных программ управления является выделение и исследование множества недоминируемых альтернатив или, по-другому, множества Парето [146]. В рассматриваемых задачах синтеза технологий и комплексных планов функционирования данное множество определяется следующим образом:

$$Q^{(np)}(x) = \{u | \forall (i \in \{1, \dots, I_M\}) (J_i(u(\cdot)) \leq J_i(u'(\cdot))) \wedge \exists (i \in \{1, \dots, I_M\}) (J_i(u(\cdot)) < J_i(u'(\cdot))), u(\cdot), u'(\cdot) \in Q(x)\} \quad (3.26)$$

Выбор конкретной альтернативы  $u^*(t)$  (оптимальной программы управления) должен осуществляться из данного множества  $Q^{(np)}(x)$ . Процедура поиска множества Парето в реальных задачах синтеза технологий и комплексных планов функционирования связана с довольно значительными вычислительными трудностями вследствие большой размерности задач планирования и ограниченности времени принятия решений. В связи с этим в рамках разрабатываемого СПМО может быть предложено два основных направления многокритериальной оптимизации.

В рамках первого подхода предлагается осуществлять в автоматическом либо интерактивном режиме последовательное сужение множества допустимых альтернатив  $Q(x) \supseteq Q_{(1)}(x) \supseteq Q_{(2)}(x) \supseteq \dots \supseteq Q_{I_M}(x)$ , где  $I_M$  – количество анализируемых отношений предпочтения, задаваемых с помощью соответствующих критериальных функций, оценивающих качество синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС.

Второй подход к решению задач многокритериального выбора основан на построении и оптимизации обобщённой критериальной функции  $I_{сб}$  (обобщённого показателя эффективности), оценивающей потенциальную эффективность функционирования СУ КФС на интервале планирования.

В этом случае возможно несколько вариантов конкретизации указанной процедуры.

Пусть при поиске оптимального программного управления элементами и подсистемами СУ КФС известна явная зависимость обобщённого показателя эффективности применения СУ КФС  $I_{сб}$  от частных показателей качества планирования

$$I_{сб} = \sum_{i=1}^{I_M} J_i \lambda_i \quad (3.27)$$

где  $\lambda_i \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^{I_M} \lambda_i = 1$ . В том случае, если известны значения весовых коэффициентов в формуле (3.27) задача векторной оптимизации сводится к обычной однокритериальной задаче программного управления динамической системой (3.1) и может быть решена с помощью методов, изложенных в параграфах 3.1-3.2.

Следует, однако, подчеркнуть, что процедура нахождения данных коэффициентов представляет из себя весьма сложную проблему.

Широко используемый на практике подход, основанный на эвристическом (экспертном) задании их значений, приводит, как показывает анализ [146], к потерям в эффективности применения СУ КФС при оптимизации планов её работы. Указанные потери вызваны тем, что коэффициенты в свёртке частных показателей качества планирования не учитывают нелинейный характер влияния показателей  $J_i$  ( $i = 1, \dots, I_M$ ) друг на друг и в целом на обобщённый показатель качества планирования  $J_{сб}$ .

Ранее в параграфе 0 указывалось, что в задачах синтеза технологий и комплексных планов функционирования учёт факторов неопределённости и оценка их влияния на результаты планирования должны проводиться с использованием имитационной модели ( $M_{II}$ ), описывающей процесс реализации ранее полученных программ управления элементами и подсистемами СУ КФС при различных вариантах возмущающих воздействий. В этом случае наряду с анализом устойчивости комплексных планов применения СУ можно ставить и решать задачи поиска оптимальных программ управления АПО в условиях неопределённости. Данные задачи по своему содержанию близки к задачам двухэтапного стохастического (либо нечёткого) программирования, в которых ситуационная функция выбора [153] строится в процессе проведения машинных экспериментов с моделью  $M_{II}$  и задаётся в конечном итоге алгоритмически.

Рассматриваемые задачи формулируются следующим образом

$$\hat{J}_{об}(x(\cdot), u(\cdot), v_{оп}(x(\cdot), \omega)) \xrightarrow{u(\cdot) \times v_{оп}(\cdot, \cdot) \in Q(x(\cdot)) \times Q'(x(\cdot), \omega)} extr \quad (3.28)$$

где  $\omega \in \Omega$  – пространство элементарных событий (множество неопределённости), с заданной на нём  $\sigma$ -алгеброй событий и  $\lambda_M$  – мерой;  $v_{оп}(x(\cdot), \omega)$  – управляющие воздействия, с помощью которых в модели имитируются процессы оперативного управления на этапе реализации плана,  $Q'(x(\cdot), \omega)$  – множество допустимых значений управляющих воздействий  $v_{оп}(\cdot, \cdot)$ .

Трудность решения задачи (3.28) состоит в том, что зависимость функционала (3.28) от эндогенных переменных  $u(\cdot) v_{оп}(\cdot, \cdot)$  задана не аналитически, а алгоритмически, через модели  $M_{II}$ , причём размерность указанных векторов очень велика.

Методы поиска экстремума целевой функции, основанные на проведении направленных имитационных экспериментов, в данном случае оказываются не приемлемыми.

Поэтому для решения указанной задачи предлагается следующая неформальная декомпозиция, основанная на структурных особенностях моделей  $M$ ,  $M_{II}$ . Так, модель  $M$  можно декомпозировать на следующие восемь групп моделей:  $MM_a = \langle M_k, M_o \rangle$ ,  $MM_b = \langle M_g, M_o \rangle$ ,  $MM_c = \langle M_z, M_o \rangle$ ,  $MM_d = \langle M_p, M_o \rangle$ ,  $MM_e = \langle M_n, M_o \rangle$ ,  $MM_{жк} = \langle M_e, M_o \rangle$ ,  $MM_3 = \langle M_c, M_o \rangle$ .

Используя методы и алгоритмы, предложенные в параграфе 3.2, можно для каждой из указанных групп моделей построить соответствующие множества достижимости  $D_a(t_f, t_o, x^{(k)}(t_o), x^{(o)}(t_o))$ ,  $D_b(t_f, t_o, x^{(g)}(t_o), x^{(o)}(t_o))$ ,  $D_c(t_f, t_o, z(t_o), x^{(o)}(t_o))$ ,  $D_d(t_f, t_o, x^{(p)}(t_o), x^{(o)}(t_o))$ ,  $D_e(t_f, t_o, x^{(n)}(t_o), x^{(o)}(t_o))$ ,  $D_{жк}(t_f, t_o, x^{(k)}(t_o), x^{(o)}(t_o))$ ,  $D_3(t_f, t_o, x^{(c)}(t_o), x^{(o)}(t_o))$ .

В этих условиях можно показать, что оптимальное решение исходной глобальной задачи (3.28) достигается в некоторой точке множества Парето  $x(\lambda) \in D(t_f, t_o, x(t_o))$ , определяемой в результате решения частных оптимизационных задач, сформулированных для каждой из перечисленных выше групп моделей. Для этого необходимо в указанных задачах так задать критериальные функции, чтобы выполнялось свойство монотонности, при котором значения глобальной целевой функции (3.28) не возрастают (не убывают), если не возрастают (не убывают) значения частных критериальных функций.

Анализ показывает, что для основных групп показателей, оценивающих качество синтеза технологий и комплексных планов функционирования в условиях возмущающих воздействий (подробнее о данных показателях будет говориться в следующем параграфе), сформулированная выше гипотеза выполняется.



С учётом вышеизложенного исходная задача оптимизации заменяется решением следующей совокупности задач:

$$\hat{J}_{об}(x(t, \lambda), u(t, \lambda), v_{оп}(x(t, \lambda), \omega)) \xrightarrow{\lambda \in \{\lambda | u(t, \lambda) \times v_{оп}(x(t, \lambda), \omega) \in Q(x(\lambda)) \in Q'(x(\lambda), \omega)\}} extr, \quad (3.29)$$

$$\sum_{\phi \in \Phi} \lambda_{\phi} J_{\phi}(x'_{\phi}) \xrightarrow{x'_{\phi} \in D_{\phi}(t, t_0, t_{\phi}(t_0))} extr, \quad (3.30)$$

$$\sum_{\phi \in \Phi} \lambda_{\phi} J = 1, \lambda_{\phi} \geq 0, x'_{\phi} = \|x^{(\phi)T}, x^{(0)T}\|^T,$$

$$\phi \in \Phi = \{a, \bar{b}, v, z, \partial, ж, з\}.$$

В этом случае при фиксированном значении вектора  $\lambda_l$  ( $(l = 0, 1, \dots)$  – номер текущей итерации), решаются задачи поиска вектора  $x_{(l)}^*(t_f)$ , при котором функция (3.30) получает экстремальное значение. Данные задачи относятся к классу задач частично целочисленного программирования, где ограничения на целочисленность накладываются только на компоненты вектора состояния  $x^{(c)}$ . Характерная особенность указанных задач состоит в том, что поиск компонент вектора  $x_{(l)}^*$  на частных моделях можно осуществлять не на всём множестве альтернатив (задаваемых с помощью множества достижимости  $\mathbf{D}(t_f, t_o, x(t_o))$ ), а только на его подмножествах, соответствующих областям недоминируемых альтернатив частных моделей, получаемых в результате ортогонального проецирования целевых множеств на множества достижимости  $\mathbf{D}(t_f, t_o, x'_{\phi}(t_o))$ ,  $\phi \in \Phi = \{a, \bar{b}, v, z, \partial, ж, з\}$ . При этом в каждую из частных моделей наряду с собственным вектором  $x^{(\phi)}$  входит вектор  $x^{(o)}$ , описывающий состояние выполнения комплексов операций в модели  $M_o$ . Перечисленные структурные особенности задачи (3.30) позволяют при решении провести её декомпозицию и, тем самым, преодолеть проблему размерности. После получения  $x_{(l)}^*(t_f)$ , используя основную и сопряжённую системы уравнений (3.1), (3.2), условия трансверсальности в момент времени  $t = t_f$  проводится итерационный поиск оптимальной программы управления  $u_{(l)}^*(t, \lambda_{(l)})$  элементами и подсистемами СУ КФС на основе методов, изложенных в параграфах 3.1, 3.2. Данные результаты используются в задаче (3.29) для поиска очередного приближения вектора  $\lambda_{(l+1)}$ . Рассматриваемая задача в силу того, что  $card \Phi \ll n_{об}$ ,  $card \Phi \ll m_{об}$  значительно проще исходной (3.28). В этом как раз и состоит выигрыш от предлагаемого варианта декомпозиции. В заключение отметим, что задача поиска  $\lambda^*$  на модели (3.29) по своему содержанию близка к задаче оптимального планирования машинных экспериментов. В ней эндогенными переменными являются компоненты вектора  $\lambda$ , экзогенной переменной служит обобщённая функция, оценивающая качество синтеза

технологий и комплексных планов функционирования. При планировании экстремальных машинных экспериментов с моделью  $M_H$  может использоваться метод крутого восхождения, или, по-другому, метод Бокса-Уилсона [154]. Суть данного метода состоит в пошаговом исследовании поверхности отклика с помощью ряда небольших по объёму полных и неполных факторных экспериментов, направленных на решение двух важных вопросов, состоящих в выборе направления движения в факторном пространстве для проведения следующего перспективного эксперимента, приближающего к оптимальной точке  $\lambda^*, x^*(\cdot), u^*(\cdot)$ , и в определении вида поверхности отклика в точке близкой к экстремуму. Использование в указанной процедуре результатов, полученных на аналитических моделях  $M$  позволяет значительно сузить область варьирования эндогенных переменных.

Анализ показывает, что в том случае, если зависимость (3.27) в явной виде не задана, могут быть предложены наряду с вышеизложенным подходом варианты решения задач многокритериальной оптимизации планов применения СУ КФС, основанные на человеко-машинных процедурах. Основное содержание указанных алгоритмов состоит в экспериментальном построении в пространстве показателей качества планирования градиента неявно заданной обобщённой функции (3.27) и её последующей локальной аппроксимации и оптимизации. Следует, однако, отметить, что данный способ решения задачи предъявляет довольно «жёсткие» требования к классу оптимизируемых целевых функций  $J_{об}, J_1, \dots, J_{I_M}$  (возрастающие, дифференцируемые квазивогнутые функции) и множеству допустимых альтернатив  $\mathbf{D}(t_f, t_o, x(t_o))$  которое должно быть выпуклым компактом. Кроме того, данный способ решения задач векторной оптимизации требует значительных затрат как машинного времени, так и времени работы ЛПР. Поэтому указанный подход может использоваться, как правило, при решении задач перспективного и долгосрочного планирования, когда временные ограничения не являются такими «жёсткими», как это имеет место на этапе оперативного планирования.

### 3.3.5. Этап оценки устойчивости комплексных планов проведения операций и управления структурами СУ КФС

Анализ показывает, что в зависимости от состава и структуры исходных данных, их достоверности и определённости может быть предложено несколько вариантов процедур оценки устойчивости синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС. В связи с тем, что результатом решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования являются варианты (программы) функционирования СУ КФС на интервале

планирования, оценку устойчивости составленных планов применения СУ КФС будем проводить с использованием тех же показателей потенциальной целевой эффективности, с помощью которых на практике оценивается качество процесса функционирования СУ КФС, его устойчивость. Рассмотрим три наиболее характерных варианта задания ИД: детерминированные ИД (вариант №1), стохастические ИД (вариант №2), ИД, заданные интервально (вариант №3).

В том случае, если рассматривается первый вариант ИД, для каждого полученного ранее плана работы СУ КФС  $x^n(t)$  (индекс « $n$ » обозначает в дальнейшем плановую, расчётную траекторию движения динамической системы (2.49)) имитируются с помощью моделей, входящих в состав блока 1 СПМО, возможные варианты целенаправленного воздействия внешней среды на элементы и подсистемы СУ, а также имитируются процессы оперативного управления её применением на этапе реализации плана. При этом наряду с традиционными способами управления, связанными с управлением резервами, коррекцией планов и перепланированием, имитируются процессы управления структурами СУ КФС. В рассматриваемых имитационных моделях процесс функционирования СУ КФС описан детерминировано, поэтому в указанной ситуации отсутствует необходимость в проведении многократных машинных экспериментов. Имитационный уровень описания процесса функционирования КФС и соответствующей СО на этапе применения вызван сложной структурой взаимосвязи технологий управления различными объектами в СУ КФС, нестационарностью воздействия внешней среды.

Анализ существующих методов и алгоритмов оценки устойчивости планов применения сложных организационно-технических систем показывает, что в задачах синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС указанная оценка должна проводиться на основе многокритериального подхода. В этом случае для окончательного выбора варианта плана из множества допустимых необходимо при указанном подходе (так же, как это делалось на предыдущем этапе, см. пункт 3.3.4) либо провести предварительную скаляризацию (свёртку) показателей качества планирования и построение соответствующей обобщённой функции, оценивающей эффективность применения СУ  $J_{об}$ , либо в интерактивном режиме осуществлять поиск устойчивого плана в области Парето. Анализ показывает, что в последнем случае целесообразно использовать полярные диаграммы Кивиата, позволяющие в наглядной форме задавать и анализировать как компоненты вектора состояния СУ КФС  $x(t)$ , так и значения компонент вектора показателей, оценивающих потенциальную эффективность (целевые возможности) СУ КФС  $\mathbf{J} = \|J_1, J_2, \dots, J_{I_M}\|^T$ .

На рисунках 33, 34 для примера приведены варианты задания диаграмм Кивиата, которые построены соответственно в фазовом пространстве для динамических моделей синтеза технологий и комплексных планов функционирования вида (3.1) и в пространстве показателей, оценивающих эффективность функционирования СУ КФС. При этом для простоты изображения на рисунках 33, 34 приведена только часть компонент векторов  $\mathbf{x}, \mathbf{J}$ .

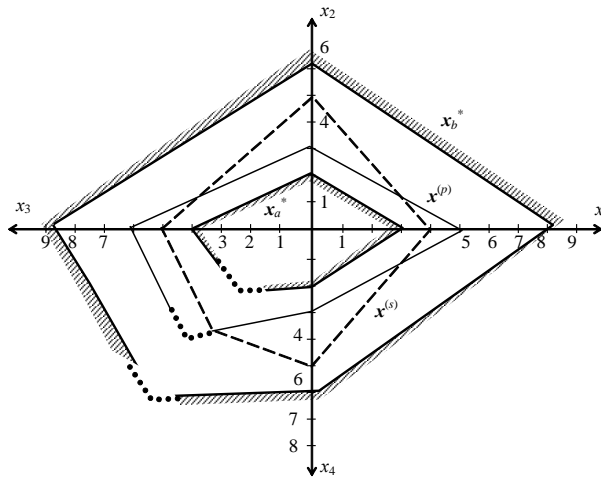


Рисунок 33. Диаграмма Кивиата компонент вектора состояния СУ КФС

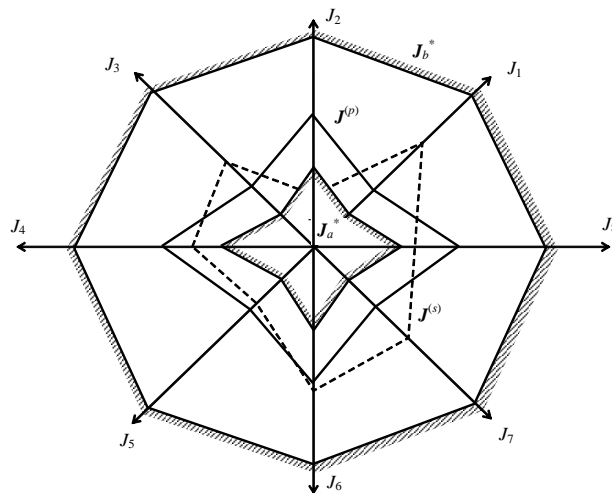


Рисунок 34. Диаграмма Кивиата компонент вектора показателей целевых возможностей СУ КФС

Каждая  $x_r^{(c)}$ -я компонента (на рисунке приведены компоненты вектора состояния  $x^{(c)}$  модели  $M_c$ ) в данном случае равняется числу КФС, находящихся в  $S_r$  макросостоянии

(  $S^{(\gamma)} = \{S_r^{(\gamma)}\}$  – множество макросостояний системы КФС на уровне  $\gamma$ ). На рисунках 33, 34 приняты следующие обозначения:

$$\mathbf{x}^{(n)}(t_f) = \left\| x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \dots, x_k^{(n)} \right\|_{t=t_f}^T \text{ – вектор состояния динамической системы (2.49) – (2.52) в}$$

момент времени  $t = t_f$ , полученный в результате программного управления (комплексного планирования функционирования) СУ КФС;

$$\mathbf{x}^{(H)}(t_f) = \left\| x_1^{(H)}, x_2^{(H)}, \dots, x_k^{(H)} \right\|_{t=t_f}^T \text{ – вектор состояния динамической системы (2.49) – (2.52)}$$

в момент времени, полученный в результате имитации условий реализации плана;

$$\mathbf{x}_a^*(t_f) = \left\| x_{a1}^*, \dots, x_{ak}^* \right\|_{t=t_f}^T, \quad \mathbf{x}_b^*(t_f) = \left\| x_{b1}^*, \dots, x_{bk}^* \right\|_{t=t_f}^T \text{ – векторы, задающие допустимые}$$

границы изменения  $\mathbf{x}^{(H)}(t_f)$ ,  $\mathbf{x}^{(H)}(t_f)$ ;

$$\mathbf{J}_{\tilde{n}}^{(H)} = \left\| J_{\tilde{n}1}^{(H)}, \dots, J_{\tilde{n}l_M}^{(H)} \right\|_{t=t_f}^T \text{ – вектор показателей потенциальной эффективности применения}$$

СУ КФС (показателей ЦВ), полученный в результате синтеза технологий и комплексных планов функционирования ( $\tilde{n} = 1, \dots, H$ );

$$\mathbf{J}_{\tilde{n}}^{(H)} = \left\| J_{\tilde{n}1}^{(H)}, \dots, J_{\tilde{n}l_M}^{(H)} \right\|_{t=t_f}^T \text{ – вектор показателей ЦВ СУ КФС, полученный в результате}$$

имитации условий реализации плана ( $\tilde{n} = 1, \dots, H$ );

$$\mathbf{J}_a^* = \left\| J_{a1}^*, \dots, J_{al_M}^* \right\|_{t=t_f}^T, \quad \mathbf{J}_b^* = \left\| J_{b1}^*, \dots, J_{bl_M}^* \right\|_{t=t_f}^T \text{ – векторы, задающие допустимые границы}$$

изменения  $\mathbf{J}^{(H)}(t_f)$ ,  $\mathbf{J}^{(H)}(t_f)$ .

С учётом принятых обозначений алгоритм оценивания устойчивости планов применения СУ КФС при первом варианте задания ИД будет включать в себя следующие основные шаги.

Шаг 1. Пусть имеется  $\mathbf{x}_{\tilde{n}}^{(H)}(t_f)$ , ( $\tilde{n} = 1, \dots, H$ ),  $H$  – вариантов планов применения СУ КФС, удовлетворяющих заданным граничным (требуемым) значениям

$$\mathbf{x}_{\tilde{n}}^{(H)}(t_f) = \mathbf{x}_{\tilde{n}}^{(H)TP} \tag{3.31}$$

В этом случае в пространстве состояний динамической системы вида (2.49) – (2.52) для каждого варианта реализации плана  $\mathbf{x}_{\tilde{n}}^{(H)}(t)$ , полученного в результате имитации условий реализации плана, осуществляется проверка условий следующего вида

$$x_{ak}^* \leq x_{\tilde{n}k}^{(H)}(t_f) \leq x_{bk}^*, \tag{3.32}$$

$$\left| \mathbf{x}_{ik}^{(II)}(t_f) - \mathbf{x}_{ik}^{(I)}(t_f) \right| < \varepsilon_1^{(II)} \quad (3.33)$$

$\forall k \in \{1, \dots, n_{об}\}$ ,  $\varepsilon_1^{(II)}$  - заданная константа.

Планы, для которых указанные условия не выполняются дальнейшему анализу и оцениванию устойчивости не подвергаются. На диаграмме Кивиата, построенной в пространстве состояний, вектору  $\mathbf{x}^{(II)}(t_f)$  соответствует штрихпунктирная линия. Кроме того, на рисунке 33 заштрихованным областям соответствуют области неустойчивости планов применения СУ КФС. Таким образом в результате первого шага получаем множество  $\tilde{H}_g^{(1)} = \frac{\tilde{H}}{\bar{H}^{(1)}}$ , где  $\tilde{H}_g^{(1)} = \tilde{H} = \{1, \dots, H\}$ ,  $\bar{H}^{(1)}$  – множество номеров планов, для которых не выполняются условия (3.32), (3.33).

Шаг 2. Для каждого  $x_{\tilde{h}}^{(II)}(t)$ ,  $\tilde{h} \in \tilde{H}_g^{(1)}$  проводится проверка условий

$$J_{a1}^* \leq J_{\tilde{h}1}^* \leq J_{b1}^* \quad (3.34)$$

$$\left\| J_{\tilde{h}1}^{(II)} - J_{\tilde{h}1}^{(I)} \right\|_{t=t_f} < \varepsilon_2^{(II)} \quad (3.35)$$

где  $\varepsilon_2^{(II)}$  - заданная величина,  $i = 1, \dots, I_M$ .

В том случае, если для какого-либо плана  $\mathbf{x}_{\tilde{h}}^{(II)}(t)$  указанные условия не выполняются, то данный план считается неустойчивым. По результатам второго шага формируется множество  $\tilde{H}_g^{(1)} / \bar{H}^{(2)}$ , где  $\bar{H}^{(2)}$  – множество номеров планов, для которых не выполнены условия (3.34) – (3.35).

Шаг 3. Если в результате предыдущих шагов получено конечное множество планов, удовлетворяющих условиям (3.34) – (3.35), то окончательный выбор плана осуществляется либо с помощью ЛПР в интерактивном режиме, либо путём скаляризации векторных показателей  $\mathbf{J}_{\tilde{h}}^{(II)}$ ,  $\mathbf{J}_{\tilde{h}}^{(I)}$  и введения соответствующих метрик в пространстве критериальных функций вида  $\rho(\mathbf{J}_{об\tilde{h}}^{(II)}, \mathbf{J}_{об\tilde{h}}^{(I)})$ , где  $\mathbf{J}_{об\tilde{h}}^{(II)}$ ,  $\mathbf{J}_{об\tilde{h}}^{(I)}$  - обобщённые функции эффективности применения СУ КФС. В последнем случае наиболее устойчивый план может быть найден в результате решения следующей оптимизационной задачи

$$\rho(J_{об\tilde{h}}^{(II)}, J_{об\tilde{h}}^{(I)}) \rightarrow \min,$$

где  $\tilde{h} \in \tilde{H}_g^{(2)}$ .

При задании стохастических ИД (вариант ИД №2) так же, как и при задании ИД №1 для каждого полученного плана  $\mathbf{x}_n^{(II)}(t)$  имитируются варианты целенаправленного воздействия внешней среды на элементы и подсистемы СУ КФС, а также имитируются процессы оперативного управления в СУ КФС на этапе применения. Однако, в этом случае с максимальной полнотой воссоздаются все факторы неопределенности, связанные с действиями внешней среды. При этом для получения статистически значимых характеристик устойчивости планов применения СУ КФС необходимо проведение многократных машинных экспериментов. В целях сокращения времени реализации указанных экспериментов предлагается в рамках создаваемой ИС и соответствующего СПМО использовать разработанные к настоящему времени высокоэффективные методы понижения дисперсии результатов моделирования [155].

Согласно исследованиям, изложенным в [156], для стохастических МД в качестве основного показателя, с помощью которого оценивается устойчивость комплексных планов, целесообразно принять статистическую оценку вероятности выполнения целевой задачи, стоящей перед СУ КФС на интервале планирования  $\sigma = (t_0, t_f]$ :

$$\tilde{P} \left( \left\| \hat{\mathbf{x}}_n^{(II)}(t_f) - \mathbf{x}_n^{(II)}(t_f) \right\| < \varepsilon_3^{(II)} \right),$$

где  $\hat{\mathbf{x}}_n^{(II)}(t_f)$  – случайный вектор, характеризующий состояние выполнения целевых задач СУ КФС в конце интервала планирования в случае стохастических целенаправленных воздействий внешней среды на  $\mathbf{x}_n^{(II)}(t_f)$ .

В этом случае в соответствии с принципом допустимой гарантии [157] условие устойчивости планов применения СУ КФС может быть записано в следующем виде

$$\tilde{P} \left\{ \left\| \hat{\mathbf{x}}_n^{(II)}(t_f) - \mathbf{x}_n^{(II)}(t_f) \right\| < \varepsilon_3^{(II)} \right\} \geq P_{TP}^{(1)} \quad (3.36)$$

$$\tilde{P} \left\{ \left| \hat{J}_{n1}^{(II)} - J_{n1}^{(II)} \right| < \varepsilon_{4i}^{(II)} \right\} \geq P_{TPi}^{(2)} \quad (3.37)$$

где  $P_{TP}^{(1)}$ ,  $P_{TPi}^{(2)}$ ,  $\varepsilon_3^{(II)}$ ,  $\varepsilon_{4i}^{(II)}$  – заданные величины.

При проведении комплексного планирования возможны ситуации, при которых ещё до решения задачи планирования может заранее задаваться необходимый уровень устойчивости планов в виде следующих условий [56]:

$$P\{\hat{Z}_n \geq z_\alpha\} = \alpha, \quad (3.38)$$

где  $z_\alpha, \alpha$  – заданные величины,  $\hat{z}_{\tilde{n}} = \rho(\hat{\mathbf{x}}_{\tilde{n}}^{(II)}(t_f), \mathbf{x}_{\tilde{n}}^{(II)}(t_f))$  – функция случайного вектора, позволяющая оценить величину отклонения возмущённой фазовой траектории (её  $\tilde{n}$ -го варианта)  $\hat{\mathbf{x}}_{\tilde{n}}^{(II)}(t_f)$  от плановой траектории  $\mathbf{x}_{\tilde{n}}^{(II)}(t_f)$  в конце интервала планирования. Из соотношения (3.38) следует, что

$$z_\alpha = \mathfrak{R}_{\hat{\varphi}_{\tilde{n}}}^{-1}(1 - \alpha), \quad (3.39)$$

где  $\mathfrak{R}_{\hat{\varphi}_{\tilde{n}}}^{-1}(1 - \alpha)$  – обратная функция к функции распределения  $\mathfrak{R}_{\hat{\varphi}_{\tilde{n}}}(z_{\tilde{n}})$  при значении аргумента, равного  $(1 - \alpha)$  (квантиль распределения  $\mathfrak{R}_{\hat{\varphi}_{\tilde{n}}}(z_{\tilde{n}})$ ).

Тогда при оценке и выборе устойчивых к возмущающим воздействиям планов применения СУ КФС необходимо наиболее пригодную альтернативу выбирать исходя из условия

$$z_\alpha(\mathbf{u}_{\tilde{n}}(t)) \geq z_{TP}, \quad (3.40)$$

где  $z_{TP}$  – допустимый уровень гарантированного (с вероятностью  $\alpha$ ) результата, связанного с отклонением  $\hat{\mathbf{x}}_{\tilde{n}}^{(II)}(t_f)$  от  $\mathbf{x}_{\tilde{n}}^{(II)}(t_f)$ .

Наряду с вышеперечисленными показателями устойчивость комплексных планов СУ КФС можно косвенно оценить, используя следующую целевую функцию [140].

$$M(\mathbf{J}_{обн}^{(II)} - \mathbf{J}_{потерь\tilde{n}}^{(II)}) \quad (3.41)$$

где  $M$  – математическое ожидание оценочной функции  $(\mathbf{J}_{обн}^{(II)} - \mathbf{J}_{потерь\tilde{n}}^{(II)})$ ,  $\mathbf{J}_{обн}^{(II)}$  – обобщенный показатель ЦВ СУ КФС, полученный в результате свертки  $\mathbf{J}_{\tilde{n}}^{(II)} = \left\| J_{1\tilde{n}}^{(II)}, \dots, J_{I_{M\tilde{n}}}^{(II)} \right\|^T$ ;  $\mathbf{J}_{потерь\tilde{n}}^{(II)}$  – показатель, с помощью которого оцениваются потери, образуемые на этапе имитации функционирования СУ КФС и обусловленные влиянием возмущающих воздействий на  $\mathbf{x}_{\tilde{n}}^{(II)}(t)$  и необходимостью выбора регулирующих воздействий (дополнительным расходом ресурсов СУ КФС), направленных на устранение указанных возмущений. В этом случае среди альтернативных планов применения СУ КФС  $\langle \mathbf{x}_{\tilde{n}}^{(II)}(t), \mathbf{u}_{\tilde{n}}^{(II)}(t) \rangle$ ,  $\tilde{n} = 1, \dots, H$  удовлетворяющих условиям (3.36), (3.37), в качестве наилучшего плана (с точки зрения устойчивости к



возмущающим воздействиям) следует выбрать тот план, у которого показатель (3.41) принимает максимальное значение.

Наряду с показателем (3.41) в качестве косвенных показателей оценки устойчивости планов могут быть приняты [56]: вероятность того, что к некоторому моменту времени план не придётся корректировать; математическое ожидание момента времени, когда возникает необходимость коррекции плана; математическое ожидание числа коррекций плана на некотором временном промежутке.

Следует отметить, что в том случае, когда компоненты вектора  $\mathbf{x}_n^{(IT)}(t_f)$  являются нечёткими переменными с заданными функциями принадлежности по аналогии с вышеизложенным могут быть предложены соответствующие показатели устойчивости планов [56].

При интервальном задании ИД (вариант 3) будем согласно [141] предполагать, что область допустимых возмущающих воздействий  $\Xi(\mathbf{x}(t), t)$ , будет описываться следующими соотношениями:

$$\xi_j^{(1)}(t) \leq \xi_j(t) \leq \xi_j^{(2)}(t), j = 1, \dots, m, \quad (3.42)$$

где  $\xi_j^{(1)}$ ,  $\xi_j^{(2)}$  – соответственно заданные векторные функции, определяющие минимальные и максимальные значения возмущающих воздействий, которые могут появиться на этапе реализации каждого фиксированного плана применения КФС ( $\mathbf{u}_i(t)$ ,  $t \in (T_0, T_f]$ ,  $i = 1, \dots, n$ ) в рамках того или иного сценария воздействия внешней среды на КФС ( $\xi_j(t)$ ,  $t \in (T_0, T_f]$ ,  $j = 1, \dots, m$ ). Пусть задано некоторое начальное состояние КФС  $\mathbf{x}(T_0)$  и рассматривается некоторый фиксированный план её функционирования  $\mathbf{u}_i(t)$ . Тогда указанным векторам и области возмущающих воздействий (3.42) для фиксированного сценария  $\xi_j(t)$  соответствует область (множество) возможных значений фазовых переменных модели (3.26), т.е. множество различных фазовых траекторий.

Назовём эту область (множество) областью (множеством) достижимости динамической системы (КФС) вида (3.26) под воздействием возмущений и обозначим её следующим образом:

$$D_x^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, \mathbf{u}_i) \quad (3.43)$$

Множеству  $D_x^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, \mathbf{u}_i)$  в пространстве состояний соответствует множество точек (область) в пространстве значений показателей (см. рис. 35), оценивающих эффективность и устойчивость функционирования КФС, которое мы обозначим как

$$D_j^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, \mathbf{u}_i) \quad (3.44)$$

Для удобства и наглядности дальнейшего изложения рассмотрим только два компонента векторного показателя (3.27), которые соответствуют показателям результативности ( $J_1$ ) и ресурсоёмкости ( $J_2$ ) процесса функционирования КФС.

На рисунке 35 показана область достижимости (3.44) для сокращённого вектора показателей эффективности и устойчивости функционирования КФС вида

$$J' = \|J_1, J_2\|^T. \quad (3.45)$$

Пусть заданы допустимые границы изменений значений частных показателей результативности и ресурсоёмкости процесса функционирования КФС в виде следующих соотношений

$$J_{a1} \leq J_1 \leq J_{b1}, \quad (3.46)$$

$$J_{a2} \leq J_2 \leq J_{b2}, \quad (3.47)$$

определяющих в пространстве показателей некоторую область  $P_J$  (см. рисунок 36).

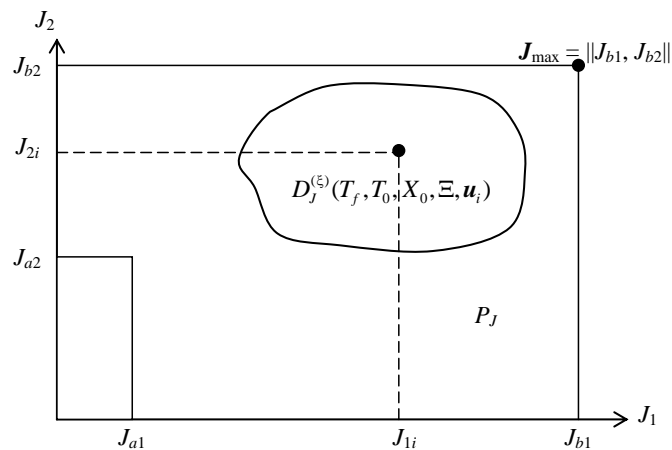


Рисунок 35. Область достижимости динамической системы для сокращённого вектора показателей эффективности и устойчивости

В работах [52, 65, 72, 74, 86] показано, что если для некоторого фиксированного плана  $u_i(t)$ , ( $i = 1, \dots, n$ ), подверженного влиянию возмущающих воздействий  $\xi_j(t)$  вида (3.42) выполняются условия

$$D_J^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, u_i) \subset P_J, \quad (3.48)$$

то программа управления  $u_i(t)$  (план функционирования КФС) устойчива к воздействию возмущений  $\xi_j(t)$ . Другими словами, возможные отклонения значений показателей качества функционирования КФС вида  $J_1, J_2$ , вызванные возмущениями  $\xi_j(t)$ , являются допустимыми.

Таким образом, для того, чтобы оценить устойчивость  $u_i(t)$  плана работы КФС к воздействию тех или иных возмущений  $\xi_j(t)$ , в случае их интервального задания, необходимо научиться строить соответствующие этим возмущениям области достижимости (ОД).

Исследования показывают, что точное построение ОД является чрезвычайно трудной задачей и в практических приложениях обычно ограничиваются аппроксимацией ОД с требуемой точностью [86]. В качестве примеров можно привести подходы к построению аппроксимации ОД, базирующиеся на решении соответствующих задач оптимального управления, на построении различных классов эллипсоидов [86] и т.п. Остановимся более подробно на первом подходе к решению задач аппроксимации ОД.

В этом случае построение множества вида (3.44) основано на решении некоторой совокупности задач оптимального программного управления КФС следующего вида:

$$J_g = \mathbf{c}^T \mathbf{J} \rightarrow \min_{\xi_i \in \Xi}, \quad (3.49)$$

где  $\mathbf{c} = \|c_1, c_2\|^T$  – заданный вектор, удовлетворяющий условиям нормировки

$$\|\mathbf{c}\| = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} = 1$$

а  $\mathbf{J} = \|J_1, J_2\|$  – вектор частных показателей качества функционирования КФС.

Особенностью задачи (3.49) является то, что при её решении осуществляется как бы «оптимизация» программы возмущающих воздействий  $\xi_j(t)$  при заданной программе управлений  $u_i(t)$  (заданном плане работы КФС). Но в данном случае интерпретация конкретных значений вектора  $\xi_j(t)$  нас не интересует. В рамках решения задачи оценивания устойчивости планов функционирования КФС цель решения задачи (3.49) состоит в отыскании некоторой точки  $\mathbf{J}^* = \|J_1^*, J_2^*\|^T$ , лежащей на границе множества (3.44) и некоторой прямой вида

$$c_1 J_1^* + c_2 J_2^* = 0,$$

касательной к данному множеству и проходящей через точку  $\mathbf{J}^*$ . Определив множество точек  $\mathbf{J}_\gamma^*$  и соответствующие касательные прямые для некоторых вариантов варьирования компонент вектора  $\mathbf{c}_\gamma$ ,  $\gamma = 1, \dots, \Gamma$  ( $\Gamma$  – число вариантов варьирования коэффициентов  $\mathbf{c}_\gamma$ ), можно получить внешнюю аппроксимацию множества (3.44), которую мы обозначим следующим образом:

$$\overline{\overline{D}}_J^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, \mathbf{u}_i) \quad (3.50)$$

Данная аппроксимация ОД представляет собой геометрическую фигуру, заключённую между прямыми, задаваемыми выражениями вида  $\mathbf{c}_\gamma^T \mathbf{J}^*$ ,  $\gamma = 1, \dots, \Gamma$ .

Рассмотрим случай, когда  $\Gamma = 4$ , а векторы  $\mathbf{c}_\gamma$  имеют вид

$$\mathbf{c}_1 = \|0, 1\|^T; \mathbf{c}_2 = \|0, -1\|^T; \mathbf{c}_3 = \|1, 0\|^T; \mathbf{c}_4 = \|-1, 0\|^T \quad (3.51)$$

и удовлетворяют условиям нормировки. В этом случае для аппроксимации ОД необходимо решить следующие четыре задачи оптимального программного управления вида (3.52):

$$J'_1 = J_2 \rightarrow \min_{\xi_j \in \Xi}; \quad J'_2 = -J_2 \rightarrow \min_{\xi_j \in \Xi}; \quad J'_3 = J_1 \rightarrow \min_{\xi_j \in \Xi}; \quad J'_4 = -J_1 \rightarrow \min_{\xi_j \in \Xi}. \quad (3.52)$$

Решение данных задач можно осуществить широко известными комбинированными методами поиска оптимальных программных управлений динамической системы вида (3.26). В результате решения задач (3.52) получаются координаты точек  $J_1^*$ ,  $J_2^*$ ,  $J_3^*$ ,  $J_4^*$ , позволяющие с учётом (3.51) построить внешнюю аппроксимацию множества достижимости (3.44), которая будет представлять собой область, образованную в результате пересечения четырёх прямых, касательных к множеству (3.44). На рисунке 36 показаны точки  $J_\gamma^*$ ,  $\gamma = 1, \dots, 4$  и соответствующие прямые. В этом случае можно гарантировать, что в рамках принятых допущений, возмущения  $\xi_j(t)$  не «выведут» показатели качества функционирования КФС за пределы области вида (3.50).

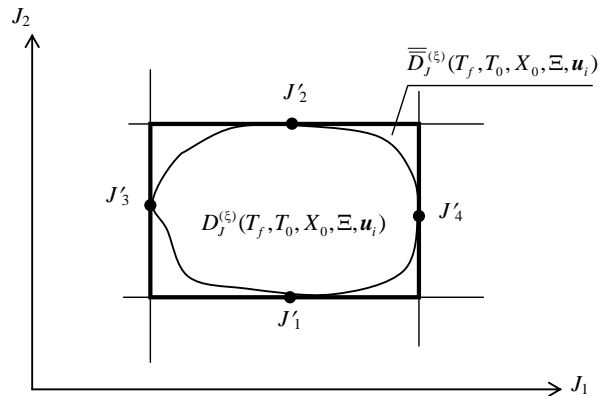


Рисунок 36. Внешняя аппроксимация множества достижимости динамической системы

Решение задач (3.52) и аппроксимация соответствующих ОД должны осуществляться для каждой из программ (планов) функционирования КФС  $u_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) для каждого фиксированного сценария возмущающих воздействий  $\xi_j(t)$  ( $j = 1, \dots, m$ ).

На рисунке 37 показаны наиболее характерные случаи взаимного расположения областей  $P_J$  и  $\overline{D}_j^{(\xi)}$  для различных программ управления КФС. При этом можно утверждать следующее:

- в случае (а) возможные отклонения значений показателей качества функционирования КФС (показателей эффективности и устойчивости КФС), вызванные возмущениями, являются допустимыми, а соответствующая программ управления КФС устойчива к воздействию возмущений;

- в случае (b) отклонение значений показателей качества функционирования КФС, вызванные возмущениями, недопустимы, а соответствующая программа управления – неустойчива к воздействию этих возмущений;
- в случае (c) программа управления КФС неустойчива к воздействию возмущений, причём эти возмущения в большей степени влияют на показатель результативности функционирования КФС  $J_1$ ;
- в случае (d) программа управления КФС неустойчива к воздействию возмущений, причём эти возмущения в большей степени влияют на показатель результативности функционирования КФС  $J_2$ .

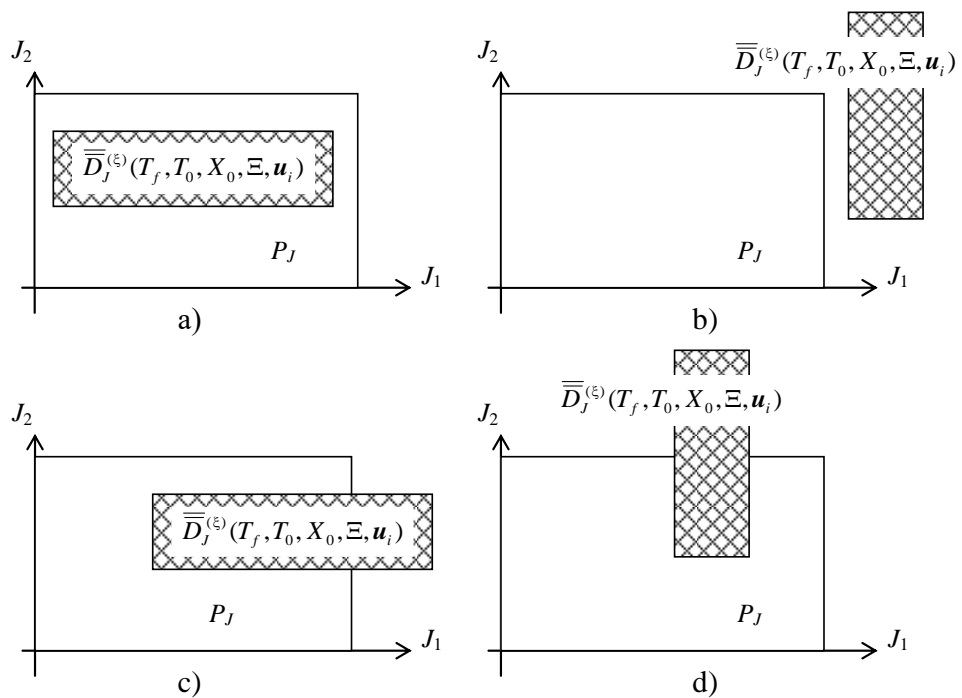


Рисунок 37. Наиболее характерные случаи взаимного расположения областей достижимости и недопустимых значений показателей качества

Окончательный выбор наиболее устойчивых программ управления КФС (планов применения КФС) в этом случае целесообразно проводить, исходя из следующего условия

$$S_i(\mathbf{u}_i(t)) = \min_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} S_j(\mathbf{u}_i(t)), \quad (3.53)$$

где  $S_i(\mathbf{u}_i(t))$  – площадь пересечения областей  $\bar{D}_J^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, \mathbf{u}_i)$  и  $P_J$ ;  $n$  – общее количество анализируемых планов применения КФС;  $m$  – общее количество сценариев возмущающих воздействий на этапе реализации планов функционирования КФС.

Можно показать, что поиск наиболее устойчивого плана функционирования КФС в соответствии с выражением (3.53) является, по сути, реализацией одного из основополагающих

принципов многокритериального выбора в условиях неопределённости, а именно принципа гарантированного результата.

Завершается рассматриваемый этап синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС анализом необходимости проведения параметрической и структурной адаптации СПМО [158]. Подробно содержание указанных процедур изложено в работах [158, 159, 160]. Сделаем в заключение данного параграфа еще два замечания.

*Замечание 1.* Анализ возможных способов описания процессов функционирования СУ КФС на этапе реализации плана показал, что модели УСД КФС имитационного уровня целесообразно строить на основе комбинированного использования разработанных к настоящему времени унифицированных формальных схем, гибко настраиваемых на заданные предметные области. Этим достигаются малые затраты денежных средств и трудозатраты на создание, отладку, эксплуатацию, сопровождение и развитие соответствующего программного обеспечения, повышается его качество, надёжность, мобильность и унифицированность.

Анализ показывает, что при разработке моделей  $M_0$ ,  $M_\emptyset$ ,  $M_p$ ,  $M_e$ ,  $M_n$ ,  $M_k$  на имитационном уровне их описания следует ориентироваться на конструкции, предложенные в рамках агрегативного подхода [161].

*Замечание 2.* Наряду со сложными имитационными моделями процесса реализации планов, о которых говорилось выше, можно в условиях дефицита времени (на этапе оперативного планирования) использовать упрощённые аналитические и имитационные модели, описывающие в агрегированном виде особенности процесса реализации синтеза технологий и комплексных планов функционирования. Из анализа материалов, изложенных в параграфе, следует, что в основе моделей синтеза технологий и комплексных планов функционирования лежит формальная схема, задающая альтернативный системный граф с перестраиваемой структурой. Поэтому, создавая модели класса  $M_{II}$ , можно наряду с чисто динамическими и квазидинамическими имитационными моделями широко использовать статические модели с неопределённостью: вероятностные (статистические) и нечёткие сетевые модели.

### 3.3.6. Этап анализа и интерпретации результатов синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС

На данном этапе проводится интерпретация результатов синтеза технологий и комплексных планов функционирования, их согласование с внешними организациями, формирование и доведение полученного плана работы СУ КФС до каждого элемента и подсистемы СУ, где проводится их дальнейшая детализация и конкретизация. Так, например, по

результатам синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС в автоматизированные системы обмена данными (АСОД) поступает следующая информация:

- номера абонентов  $\langle i, j \rangle$  ( $i, j \in M$  – множество АПО), участвующих в обмене данными на интервале планирования;
- последовательность и типы передаваемых потоков данных; номера направлений обмена потоками данных;
- объёмы передаваемых потоков данных, их приоритетность;
- директивные сроки передачи заданных типов потоков данных для каждой пары абонентов СУ КФС;
- уточнённые величины интенсивностей передачи данных, пропускных способностей каждого элемента, каждой подсистемы АСОД, направлений обмена данными;
- упорядоченные варианты программ управления структурами АСОД на интервале планирования;
- заданные значения показателей качества и надёжности обмена потоками данных в АСОД, полученные в результате решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС.

Для вычислительных средств (ВСр), входящих в состав технического обеспечения СУ КФС, результаты синтеза технологий и комплексных планов функционирования формируются в следующем виде:

- упорядоченные варианты распределения решаемых на интервале планирования задач по ВСр, находящимся на различных иерархических уровнях СУ КФС;
- технология решения задач на ВСр;
- состав и структура СПМО СУ КФС, предназначенного для решения задач управления АПО;
- времена поступления потоков данных, допустимые временные интервалы, на которых планируется решение задач;
- приоритетность каждой задачи;
- упорядоченные варианты расписаний (программ) работы ВСр;
- упорядоченные варианты программ управления структурами ВСр на каждом из уровней СУ КФС;
- заданные значения показателей надёжности и качества решения задач на ВСр.

Полученные результаты синтеза технологий и комплексных планов функционирования далее должны использоваться в АСОД и информационно-вычислительных средств СУ КФС уже

для детального планирования работы своих собственных элементов и подсистем, для разработки программ управления их структурами, потоками данных и т.п.

Примеры вариантов задания результатов планирования для других подсистем СУ КФС (РТС, ПО и т.п.) приведены в работах [56, 119, 126].

В заключение данного параграфа рассмотрим основные особенности решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС при полностью децентрализованном (автономном) и региональном режимах работы СУ. При автономном варианте функционирования элементов СУ КФС детерминированная задача синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС сводится к задаче оптимального выбора в соответствующей бескоалиционной дифференциальной игре с непротивоположными интересами. При региональном варианте функционирования СУ формально задача планирования сводится к задаче оптимального выбора в коалиционной дифференциальной игре с непротивоположными интересами. Остановимся на основных этапах решения данных задач.

При исследовании задач бескоалиционного выбора будем предполагать, что рассмотренные во второй главе диссертации модели синтеза технологий и комплексных планов функционирования  $M_1, M_2, M_3$  можно привести к следующему виду:

$$\dot{x}_\mu = f_\mu(x_\mu, u_\mu, t), \quad (3.54)$$

$$u_\mu(t) \in Q(x_\mu), \quad (3.55)$$

$$x_\mu(t_0) = x_{\mu 0}; x_\mu(t_f) \in \mathbb{R}^{n_{об\mu}}, \quad (3.56)$$

$$J_{об\mu} = J_{об\mu}(x_1(t_f), x_1(t_f), \dots, x_m(t_f)) \quad (3.57)$$

где  $\mu = 1, \dots, m$ ;  $\mu$  – заданный номер подсистемы (КФС), осуществляющей автоматизированное взаимодействие с рассматриваемым классом КФС. Анализ построенных во 2 главе логико-динамических моделей УСД КФС показывает, что указанное преобразование можно произвести, учитывая ряд технических и технологических ограничений при задании терминального функционала (3.57).

В этом случае алгоритм поиска равновесных программных управлений дифференциальной игры  $B_1, B_2, \dots, B_m$  "лиц" (подсистем, КФС) включает в себя следующие три основных шага [162].



Шаг 1. Построение для каждой подсистемы  $B_1, B_2, \dots, B_m$  множеств достижимости  $D(t_f, t_0, \mathbf{x}_\mu(t_0))$ , соответствующих моменту окончания интервала планирования, используя методы и алгоритмы, предложенные в параграфах 3.1-3.2.

Шаг 2. Отыскание в пространстве состояний равновесной точки  $\mathbf{x}_1^{(pe)}, \mathbf{x}_2^{(pe)}, \dots, \mathbf{x}_m^{(pe)}$  системы функций  $\{J_{об}(\mathbf{x}_1(t_f), \mathbf{x}_2(t_f), \dots, \mathbf{x}_m(t_f))\}$ , определённых на декартовом произведении  $D(t_f, t_0, \mathbf{x}_1(t_0)) \times D(t_f, t_0, \mathbf{x}_2(t_0)) \times \dots \times D(t_f, t_0, \mathbf{x}_m(t_0))$ . В этом случае для поиска равновесных точек (точек Нэша) может использоваться итеративный алгоритм Брауна-Робинсона и его модификации [163, 164].

Шаг 3. Построение программных управлений  $\mathbf{u}_\mu(t), t \in (t_0, t_f]$ , переводящих каждую из динамических систем (3.54) – (3.57) из начального состояния (3.56) в конечное состояние  $\mathbf{x}_\mu(t_f) = \mathbf{x}_\mu^{(pe)}$ . Данная задача далее должна решаться в соответствии с вышеизложенным алгоритмом поиска комплексного плана проведения операций и управления структурами СУ КФС (см. пункты 3.3.2-3.3.6), но уже применительно к  $B_\mu$  подсистеме.

При региональном планировании отдельные  $B_\mu$  подсистемы (СУ КФС) могут объединяться в группы (коалиции) для повышения уровня своих Ц и ИТВ, улучшения качества проведения ОВ с КФС. В этом случае каждый АПО  $B_\mu$  может стать членом одной из коалиций  $\mathfrak{a} \subseteq \mathfrak{Z}(M) = 2^m$ , где  $\mathfrak{Z}(M)$  – множество всех подмножеств, образованных из СУ КФС, и вступить только в одну коалицию.

Таким образом, все множество КФС  $M = \{1, \dots, m\}$  разбивается на следующие подмножества

$$\mathfrak{a}_\rho, \rho = 1, \dots, \mathfrak{R}; \mathfrak{a}_\rho \cap \mathfrak{a}_{\rho'} = \emptyset, \bigcup_{\rho=1}^{\mathfrak{R}} \mathfrak{a}_\rho = \mathfrak{Z}(M), \mathfrak{a} = \{\mathfrak{a}_1, \dots, \mathfrak{a}_\rho\}$$

соответствующие каждой из коалиций (групп КФС, объединенных в подсистему). Множество  $\mathfrak{a}$ , представляющее из себя вариант разбиения множества  $M$  на подмножества, называется коалиционной структурой.

Задача синтеза технологий и комплексных планов функционирования в указанной ситуации может рассматриваться как задача поиска равновесных программных управлений в дифференциальной игре  $\mathfrak{R}$  «лиц» (коалиций, регионов). Основное её отличие от задачи (3.54) – (3.57) состоит в необходимости исследования вопросов целесообразности образования той или иной коалиции, обоснования и анализа принимаемых гипотез об информированности каждой из подсистем о действиях других подсистем, входящих в коалицию.

В этом случае можно выделить три характерных случая взаимодействия коалиций.

*Вариант а.* Если подсистемам, составляющим коалицию  $\mathcal{A}_\rho$ , неизвестна в целом коалиционная структура  $\mathcal{A}$ , либо способы действия других коалиций  $\mathcal{A}_{\rho'}$ , ( $\rho, \rho' = 1, \dots, \mathcal{R}$  где), входящих в коалиционную структуру  $\mathcal{A}$ , то оптимальное программное управление следует искать руководствуясь принципом гарантированного результата:

$$J_{об\mathcal{A}_\rho}(\mathbf{u}_{\mathcal{A}_\rho}, \mathbf{u}_{M \setminus \mathcal{A}_\rho}) \rightarrow \min_{\mathbf{u}_{\mathcal{A}_\rho}} \max_{\mathbf{u}_{M \setminus \mathcal{A}_\rho}} \quad (3.58)$$

где  $\mathbf{u}_{\mathcal{A}_\rho}$  – вектор управляющих воздействий  $\mathcal{A}_\rho$  коалиции,  $\mathbf{u}_{M \setminus \mathcal{A}_\rho}$  – вектор управляющих воздействий, не входящих в коалицию  $\mathcal{A}_\rho$  КФС,  $\rho = 1, \dots, \mathcal{R}$ ;  $M$  – общее число КФС.

Интерпретация предлагаемого принципа применительно к вопросам, рассматриваемым при синтезе технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС, состоит в следующем. При поиске оптимальных программ управления элементами и подсистемами коалиции  $\mathcal{A}_\rho$  предполагается, что на интервале времени  $(t_0, t_f]$  возможен выход из строя элементов и подсистем, входящих в коалицию  $\mathcal{A}_\rho$ . В этом случае для коалиции  $\mathcal{A}_\rho$  ранее составленная программа работы коалиции  $\mathcal{A}_\rho$ , (которую в указанной ситуации также необходимо выполнять) может рассматриваться как возмущающее воздействие, затрудняющее реализацию собственной программы управления. Поэтому, составляя комплексный план работы коалиции  $\mathcal{A}_\rho$ , следует предусматривать варианты реконфигурации её структур на случай появления дополнительной информационной нагрузки. В этом случае поиск  $\mathbf{u}_{\mathcal{A}_\rho}(t)$ , как показывает анализ, сводится к многократной реализации процедур решения задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования для различных коалиций, дополненных алгоритмом проведения реконфигурации структур коалиции  $\mathcal{A}_\rho$  ( $\rho = 1, \dots, \mathcal{R}$ ). Необходимо подчеркнуть, что принятая при постановке задачи (3.58) гипотеза противодействия коалиции  $M \setminus \mathcal{A}_\rho$  по отношению к коалиции  $\mathcal{A}_\rho$  является довольно «жесткой» и на практике в большинстве случаев не оправдывается. Для этого, как показывает анализ, необходимо, во-первых, чтобы коалиция  $\mathcal{A}_\rho$  затрагивала интересы всех остальных "игроков" (подсистем), входящих в множество  $M$ , и, во-вторых, необходимо, чтобы все игроки были согласны объединиться в коалицию  $M \setminus \mathcal{A}_\rho$  и были созданы условия для возникновения данной коалиции. Однако данные предпосылки в редких случаях могут одновременно выполняться. Поэтому число возможных

коалиционных структур в выражении (3.58), рассматриваемых при решении задач регионального планирования, является, как правило, небольшим.

*Вариант  $\beta$* . Если подсистемам, составляющим коалицию  $\mathfrak{A}_\rho$ , известна коалиционная структура  $\mathfrak{A}$ , то возможны следующие подходы к решению задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования.

Фиксируя варианты состава коалиции, решаются задачи (3.54) – (3.57) для  $\mu = \rho, \rho=1, \dots, \mathfrak{R}$ . Если равновесных программ управлений  $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(t)$  несколько, то целесообразно применить в этом случае метод доминирования риска Харсани-Нэша [162]. В указанной ситуации решаются следующие оптимизационные задачи [162]:

$$J_{об} = \prod_{\rho=1}^{\mathfrak{R}} \left( J_{об_{\mathfrak{A}_\rho}} \left( \mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(\cdot) \right) - J_{об_{\mathfrak{A}_\rho}} \left( \mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}(\cdot) \right) \right) \left( \mathbf{u}_{M \setminus \mathfrak{A}_\rho} \right) \rightarrow \min_{\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho} \in Q(\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho})} \quad (3.59)$$

при дополнительном ограничении

$$J_{об_{\mathfrak{A}_\rho}} \left( \mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(\cdot) \right) - J_{об_{\mathfrak{A}_\rho}} \left( \mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}(\cdot) \right) \geq 0 \quad (3.60)$$

где  $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(t)$  – программное управление, полученное в результате решения задачи (3.54) – (3.57) при  $\mu = \rho, \rho=1, \dots, \mathfrak{R}$ ;  $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}(t)$  – программные управления, принадлежащие области Парето  $Q^{(np)}(\mathbf{x}_\mathfrak{A})$ . Таким образом, осуществляется поиск таких комплексных планов применения коалиций  $\mathfrak{A}_\rho$  ( $\rho=1, \dots, \mathfrak{R}$ ), для которых паретовские решения  $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}(t)$  максимально приближаются к ранее полученным равновесным решениям  $\mathbf{u}_{\mathfrak{A}_\rho}^{(pe)}(t)$ .

*Вариант  $\gamma$* . Если коалиционная структура  $\mathfrak{A}$ , в рамках которой образуется коалиция  $\mathfrak{A}_\rho$ , точно не известна, но известен конечный набор допустимых структур  $\mathfrak{A} \in \mathfrak{N}$ , в которые может входить коалиция  $\mathfrak{A}_\rho$ , то *вариант  $\beta$*  дополняется анализом целесообразности образования данной коалиции на множестве  $\mathfrak{N}$ . Выигрыш от вхождения КФС  $B_\mu$  в коалиции  $\mathfrak{A}_\rho$  ( $\rho=1, \dots, \mathfrak{R}$ ) и образования данных коалиций оценивается исходя из анализа величин обобщенных показателей качества планирования  $J_{об_\mu}, J_{об_{\mathfrak{A}_\rho}}$ , для различных вариантов разбиения множества  $M$  на соответствующие коалиционные структуры. Следует подчеркнуть, что в рассматриваемом случае так же, как и для *варианта  $\alpha$*  реально существующие пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с процессом функционирования СУ КФС, позволяют существенно уменьшить мощность множества допустимых коалиционных

структур ( $card\mathcal{S}, card\mathcal{a}$ ) и, тем самым, сократить затраты времени на поиск допустимого варианта взаимосвязи элементов, входящих в коалицию  $\mathcal{a}_\rho$ .

При решении всех вышеизложенных задач децентрализованного и регионального планирования работы элементов и подсистем СУ КФС необходимо каждый раз обосновывать выбор принципов оптимальности, положенных в основу принятых способов применения указанных систем управления, доказывать устойчивость указанных принципов оптимальности с учётом временных и технологических ограничений, накладываемых в целом на процесс планирования.

Завершая рассмотрение этапов решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования СУ КФС, ещё раз следует подчеркнуть, что окончательный выбор принципов, способов, методов, алгоритмов и программ управления элементами и подсистемами СУ КФС с учётом конкретных условий обстановки осуществляет ЛПР, взаимодействуя в интерактивном режиме работы со СПМО синтеза технологий и комплексных планов функционирования.

Конкретизация перечисленных этапов обобщенной процедуры решения проблемы оптимального синтеза технологий и программ УСД КФС будет проведена далее в 5 главе диссертации на примерах, связанных с реализацией космических и производственных технологий, а также технологий, ориентированных на решения задач управления территориями.

### 3.4. Выводы

1. Анализ основных особенностей моделей управления КФС показал, что при решении поставленных задач планирования целесообразно использовать необходимые условия оптимальности, полученные на основе метода локальных сечений Болтянского В.Г. В этом случае, в отличие от ранее существовавших подходов, удается еще до процедуры оптимизации найти в явном виде множители Лагранжа, с помощью которых учитываются основные технические и технологические ограничения в моделях планирования. В указанной ситуации получен новый научный результат, состоящий в том, что, используя разработанные в диссертации методы и алгоритмы, можно исходную задачу управления КФС, имеющую по своей «природе» сугубо дискретный характер, всегда преобразовать в задачу неклассического вариационного исчисления, которую, в свою очередь, с помощью принципа максимума удастся свести к нелинейной краевой задаче. Другими словами, происходит преобразование (редукции) задач выбора в дискретных пространствах к задачам выбора в конечномерных пространствах, что существенно упрощает в дальнейшем процедуры поиска оптимальных решений.

2. Разработаны новые модели и алгоритмы учета прерываний в нестационарных задачах теории расписаний большой размерности, к которым сводятся детерминированные задачи управления КФС. Данные задачи относятся к классу NP-трудных задач в сильном смысле.
3. Разработаны алгоритмы построения и аппроксимации областей достижимости в задачах управления КФС, с помощью которых проводится количественная оценка показателей целевых и информационно-технологических возможностей (Ц и ИТВ) КФС, предложены варианты графического представления областей достижимости.
4. Разработано четыре комбинированных метода и алгоритма выбора оптимальных программных управлений элементами и подсистемами КФС: метод последовательных приближений в задачах поиска оптимальных управлений в сочетании с методом Ньютона; методов последовательных приближений в сочетании с методом штрафных функционалов; метод последовательных приближений в сочетании с обобщенным субградиентным методом; метод последовательных приближений в сочетании с методов «ветвей и границ». Проведены оценки временной и ёмкостной сложности разработанных алгоритмов, которые имеют полиномиальный характер, выявлены параметры, от которых в наибольшей степени зависит скорость сходимости алгоритмов.
5. Проведенные исследования и их анализ показали, что учёт факторов неопределенности при решении задачи синтеза планов должен поэтапно включать в себя: адаптацию параметров и структуры моделей, алгоритмов управления КФС к прошлому и текущему состоянию объектов управления, управляющих подсистем и внешней среды; имитацию условий реализации плана с учетом различных вариантов организации оперативного управления элементами и подсистемами КФС в конкретных ситуациях; структурную и параметрическую адаптацию плана, моделей, алгоритмов, программ, входящих в состав специального программно-математического обеспечения управления в КФС к прогнозируемым на имитационных моделях состояниям объекта управления, управляющей подсистемы и среды.
6. Предложен и обоснован состав показателей, оценивающих целевые и информационно-технологические возможности (Ц и ИТВ) КФС при различных вариантах задания исходных данных (ИД) (детерминированные, стохастические, нечеткие, интервально заданные ИД). Задача оценки Ц и ИТВ КФС в этом случае сводится к задачам оценки управляемости динамических систем, описывающих процессы функционирования КФС, построению и аппроксимации соответствующих множеств достижимости.

7. Показано, что предварительный расчет множеств достижимости в задачах проактивного управления КФС позволяет существенно сократить затраты времени на подготовку и принятия решений по управлению КФС. Разработанный в рамках диссертационных исследований программный комплекс оценки показателей Ц и ИТВ КФС позволяет повысить оперативность, качество и надёжность принимаемых решений при функционировании промышленного интернета в несколько раз.
8. Разработан новый подход к оценке показателей Ц и ИТВ КФС, который позволяет проводить анализ разрешимости сформулированных задач управления КФС в зависимости от состава и структуры исходных данных (ИД), интервала планирования, от состава и структуры пространственно-временных, технических и технологических ограничений.
9. Предложена многоэтапная процедура решения задач управления КФС, включающая в себя следующие основные шаги: подготовка к решению задач управления; оценка и анализ целевых и информационно-технологических возможностей КФС, формирование допустимых планов применения её основных элементов и подсистем; оптимизация управления КФС; оценка устойчивости управления КФС; анализ и интерпретация результатов решения задач управления КФС. Главная особенность приведенной процедуры состоит в том, что решение всех перечисленных задач на каждом из шагов осуществляется на единой методологической и модельной основе. Принятая в качестве базовой концепция состояния динамических моделей управления КФС позволяет при таком подходе сравнительно легко проводить согласование результатов планирования как на концептуальном, так и на алгоритмическом, программном, информационном уровнях описания.
10. Разработаны алгоритмы, позволяющие вычислять динамические приоритеты выполняемых в КФС целевых и технологических операций. данные формулы позволяют (по сравнению с ранее существующими методиками) при распределении ресурсов КФС учитывать не только структуру технологии управления КФС, но и параметры, используемые в моделях программного управления каналами, потоками, ресурсами, движением, структурами в КФС, учитывать отношения предпочтения, задаваемые показателями качества планирования. Используя указанные динамические приоритеты, можно оперативно проводить согласование работы основных элементов и подсистем КФС как на этапе планирования, так и на этапе оперативного управления информационными процессами в промышленном интернете.

## **4. Разработка архитектуры, инструментальных средств и программного обеспечения синтеза технологий и комплексных планов функционирования КФС**

### **4.1. Многокритериальное оценивание, анализ и выбор базовой архитектуры информационной платформы**

Перед тем как представить результаты реализации процедуры многокритериального оценивания, анализа и выбора базовой архитектуры информационной платформы, на которой целесообразно реализовать разработанное специальное модельно-алгоритмическое, программное и информационное обеспечение, описанное во 2, 3, 5 главах диссертации, кратко проанализируем содержание наиболее распространённых подходов к построению архитектур программ и программных комплексов [165] среди которых целесообразно выделить, в первую очередь, следующие архитектуры:

- монолитная архитектура;
- модульная архитектура;
- компонентная архитектура;
- клиент-серверная архитектура;
- сервис-ориентированная архитектура.

Приложения с монолитной архитектурой [166, 167] просты в реализации, управлении и развёртывании, обеспечивают высокую согласованность программного кода, явное управление вычислительным процессом и единый контроль ошибок. Данный тип архитектуры целесообразно использовать для небольших информационных систем, локализованных на одном вычислительном ресурсе.

Для более сложных программных комплексов применяется модульная архитектура [168]. Лежащая в её основе декомпозиция приложения упрощает процесс разработки, обслуживания и последующей модернизации программного обеспечения. Развитие модульной архитектуры привело к появлению понятия «плагин» – независимо компилируемый программный модуль, динамически подключаемый к основной программе и предназначенный для расширения её функциональности. Аналогичный подход используется в компонентной архитектуре [169], которая позволяет строить более сложные информационные системы на основе использования отлаженных «строительных блоков» программного кода. Основная идея компонентного подхода – повторное использование кода. В рамках этой архитектуры предъявляются повышенные требования к универсальности подключаемых модулей. Итогом развития компонентной

архитектуры стало появление программных библиотек с широким набором универсальных функций. Компонентная архитектура, как и монолитная, предназначена для построения локализованных программных комплексов.

Основы сетевого взаимодействия модулей программного обеспечения были заложены в клиент-серверной архитектуре [170]. В узком смысле в качестве компонентов этой архитектуры рассматриваются пользовательский клиент, реализующий основную логику работы, и серверная часть, представленная СУБД или файл-сервером. В широком смысле, клиент-серверная архитектура описывает любое взаимодействие двух и более распределённых программных модулей. Однако наиболее полно такое взаимодействие воплощено в идеологии сервис-ориентированной архитектуры (СОА).

Сервис-ориентированная архитектура (Service Oriented Architecture) реализует модульный подход к разработке программного обеспечения, основанный на использовании распределённых, слабо связанных заменяемых компонентов, оснащённых стандартизированными интерфейсами для взаимодействия по стандартизированным протоколам [171]. Данный подход используется для построения сложных распределённых информационных систем на базе интеграции веб-сервисов. При этом интеграция осуществляется на уровне протоколов, без понимания обеими взаимодействующими сторонами внутреннего устройства другой стороны. Это обеспечивает так называемую слабое «зацепление» модулей (веб-сервисов). Согласно стандарту ISO/IEC/IEEE 24765, термин «зацепление» (от английского слова «coupling») характеризует степень взаимозависимости между программными модулями, силу взаимосвязей между модулями, а также меру того, насколько взаимозависимы разные подпрограммы или модули. Использование сервисов позволяет объединять разнородные вычислительные модули в единое комплексное приложение, функционирующее на множестве различных аппаратных средств (серверах).

Сервис-ориентированная архитектура на сегодняшний день может быть представлена как в «классическом» виде, так и в формате микросервисов. При этом, «классический» сервис-ориентированный подход уже закрепился в определённой нише корпоративных и научных информационных систем, а микросервисная архитектура в последнее время стремительно набирает популярность в коммерческих приложениях [172-175].

Повышение удобства разработки и эксплуатации микросервисов повлекли за собой отказ от некоторых базовых возможностей, присутствующих изначально в «классической» сервис-ориентированной архитектуре. В частности, интеграция на уровне протоколов взаимодействия в СОА, или так называемое «разделение контракта», позволяет сервису и его потребителям развиваться отдельно, но сохранять согласованное описание интерфейса взаимодействия.



Микросервисная архитектура не поддерживает разделение контрактов, хотя это является одной из главных возможностей сервис-ориентированной архитектуры.

Решение сформулированной в параграфе 1.6 проблемы с использованием методов, приведённых в параграфе 3.2, было реализовано диссертантом в аналитико-имитационном программном комплексе (АИПК) синтеза технологии и программ проактивного управления киберфизическими системами. Данный комплекс построен на основе собственных разработок автора в период с 2003 – 2009 годы [176, 177, 178].

На начальном этапе проектирования АИПК был обоснован и осуществлён синтез его архитектуры на основе процедуры многокритериального выбора. Суть данной процедуры подробно описана в [179] и состоит в совместном использовании методов вербального анализа решений (простые и сложные опорные ситуации опроса) и методов преобразования качественных показателей в количественные показатели, основанных на совместном применении математического аппарата теории нечетких множеств, отношений и мер, а также теории планирования эксперимента.

Процедура предполагает на первом шаге своей реализации обоснование набора показателей, по которым проводится оценивание и выбор конкретной архитектуры АИПК. К таким показателям на основе выполненного в ходе диссертационных исследований анализа были отнесены:

*Показатель модульности.* Аналитико-имитационный программный комплекс уже по своей сути состоит из множества компонент, которые должны согласовано взаимодействовать, реализуя концепцию комплексного моделирования, при этом обеспечивая высокий уровень читаемости и сопровождаемости кода. Оценивание модульности осуществляется на основе понятий «связности» и «зацепления», используемых в стандарте ISO/IEC/IEEE 24765 и описанных в [180]. Связность можно оценить по балльной системе от 1 для случая программных библиотек, в которых функции в модулях объединены просто тематически, до 5 для веб-сервисов, где определённая задача решается полностью за счёт внутренних функций. Аналогично с оцениванием зацепления – высший бал ставится в том случае, если модули могут функционировать независимо друг от друга.

*Показатель допустимой гетерогенности.* Для каждого компонента выбирается наиболее подходящее средство его реализации. Кроме того, в силу требований к открытости программного комплекса допускается встраивание в него программных решений сторонних разработчиков. Указанные свойства комплекса предполагают функционирование его компонент в различных, иногда не совместимых программных средах. Показатель формируется как сумма частных

показателей, характеризующих допустимые варианты реализации приложения для ряда популярных языков программирования.

*Показатель производительности.* Наличие трудоёмких задач и необходимость их оперативного решения требуют высокой эффективности вычислений. Численно данный показатель оценивается временем решения тестовой математической задачи одной и той же реализацией программного кода, но организованной с помощью различных архитектур.

*Показатель многопользовательского режима.* Междисциплинарность, присущая моделированию сложных технических систем, которыми являются КФС, может потребовать привлечения ряда экспертов и исследователей для совместной работы. В данном случае программный комплекс должен предоставлять удобные средства многопользовательской работы. Показатель является балльным, с самым низким значением для однопользовательского режима до самого высокого для архитектурно-неограниченного числа пользователей.

*Показатель масштабируемости.* Архитектура должна позволять оперативно увеличивать общую производительность программного комплекса при возрастании нагрузки на него. При этом, в случае отсутствия нагрузки, программный комплекс не должен потреблять большое количество вычислительных мощностей. Для получения численной оценки показателя рассматривается тестовая инфраструктура из трёх серверов, на одном из которых установлен центральный модуль системы. Оценивается суммарное время решения тысячи тестовых математических задач всем аппаратно-программным комплексом.

Используя перечисленные выше показатели, был выполнен многокритериальный выбор архитектуры программного комплекса из множества известных типов.

Суть применяемой процедуры многокритериального выбора заключается в следующем. Пусть множество архитектур построения программных комплексов оценивается набором вышеперечисленных показателей качества  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ , каждый из которых представляет собой лингвистическую переменную. При этом лингвистические переменные  $F_i =$  «Модульность, Гетерогенность, Производительность, Многопользовательский режим, Масштабируемость» могут принимать значения из множества простых и составных термов  $T(F_i) = \{\text{«низкая»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средняя»}, \text{«выше среднего»}, \text{«высокая»}\}$ . Для качественной интерпретации результирующего показателя, оценивающего обобщенное качество той или иной архитектуры, как и в [181] используется лингвистическая переменная «Эффективность», которая может принимать значения  $T(F_{res}) = \{\text{«плохая»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средняя»}, \text{«выше среднего»}, \text{«хорошая»}\}$ . В самом общем виде знания ЛПР о взаимосвязи частных показателей качества

$F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$  с результирующим показателем  $F_{res}$  можно представить продукционными моделями вида:

$P_j$ : «IF  $F_1 = A_{1j}$  and  $F_2 = A_{2j}$  and ... and  $F_m = A_{mj}$ , THEN  $F_{res} = A_{jres}$ », где  $A_{ij} \in T(F_i)$ ,  $A_{jres} \in T(F_{res})$  являются термами соответствующих лингвистических переменных. В качестве общей шкалы по отношению ко всем значениям показателей используется биполярная шкала  $[-1, 0, +1]$ , а термы  $A_{ij}$ ,  $A_{jres}$  можно задать с помощью нечетких чисел (L-R) типа (рисунок 38 из [181]).

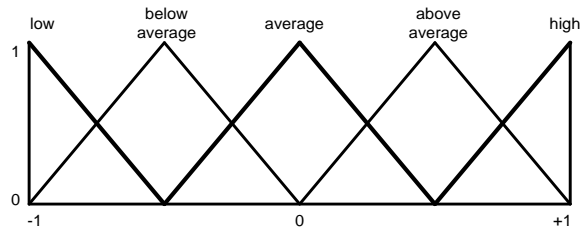


Рисунок 38. Термы лингвистической переменной в шкале  $[-1, +1]$

Крайние («минимальные» и «максимальные») значения лингвистической переменной  $F_i$  шкалы маркированы «-1» и «+1», а для построения результирующего показателя  $F_{res}$ , согласно положениям теории планирования эксперимента, сформирован ортогональный план экспертного опроса, элементами которого являются крайние маркированные значения частных показателей эффективности  $\{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ . Вся методика многокритериального принятия решений при выборе архитектуры АИПК, подробно изложена в [181].

Для решения задачи обоснованного выбора архитектуры выполним ряд шагов [181]:

**Шаг 1.** Формирование множества лингвистических шкал для каждого из частных показателей и результирующего показателя качества сопоставляемых архитектур программных комплексов. Перевод частных показателей в шкалу  $[-1, +1]$ .

**Шаг 2.** Построение ортогонального плана опроса экспертов и проведение экспертного опроса (ответы на вопросы, содержащиеся в продукционных правилах).

**Шаг 3.** Построение результирующего показателя качества сопоставимых архитектур.

Главное достоинство используемой методики заключается в процедуре получения ответов экспертов на вопросы, содержащиеся в продукционных правилах. Так, например, при числе частных показателей качества более 5 количество задаваемых вопросов становится более 32, что, как правило, приводит к противоречивости высказываний экспертов в виду особенностей человеческого мышления. Для разрешения возникшего затруднения в данной методике предлагается проведение сокращённого экспертного опроса. Продукционные правила, в которых все показатели качества кроме одного принимают «низкие» или «высокие» значения, называют простыми правилами опроса эксперта или простыми опорными ситуациями. Количество таких

ситуаций соответствует количеству частных показателей эффективности. Составные правила (сложные опорные ситуации) представляют с помощью простых опорных ситуаций с помощью продукционных правил специального вида. Вычисление оценок результирующего показателя в сложных опорных ситуациях предлагается осуществлять путем построения конструктивной параметрической  $\lambda$ -нечеткой меры Сугено [183-184] на конечном множестве простых опорных ситуаций. Мера Сугено отражает оценку результирующего показателя в сложном правиле. Полученные оценки сложных правил используются для проверки высказываний ЛПР на непротиворечивость. Так, например, если при ответе на сложное правило относительный показатель, полученный на основе меры Сугено, будет больше заданной величины ошибки, то считается, что эксперт дал неверный ответ. Выявленные противоречия предъявляются ЛПР для их анализа и устранения. Описание подробностей приведённой выше процедуры дан в [181].

После проведения необходимых исследований была сформирована итоговая таблица с нормированными значениями частных показателей качества архитектур построения программных комплексов (см. таблицу 3).

Таблица 3 – Значения частных показателей качества

Нормированные значения частных показателей качества	Модульность	Гетерогенность	Производительность	Многопользовательский режим	Масштабируемость
Архитектуры построения программных комплексов					
Монолитная архитектура ( <i>mon</i> )	0,2	0,1	1,0	0,1	0,1
Модульная архитектура ( <i>mod</i> )	0,4	0,1	1,0	0,1	0,1
Компонентная архитектура ( <i>com</i> )	0,6	0,3	0,9	0,1	0,1
Клиент-серверная архитектура ( <i>csa</i> )	0,8	0,8	0,4	0,5	0,4
Сервис-ориентированная архитектура ( <i>soa</i> )	1,0	1,0	0,3	1,0	1,0

Для вычисления значений интегрального показателя функциональных возможностей по ранее предложенной методике необходимо заполнить матрицу экспертного опроса в крайних значениях ( $-1_{F_i}$  – «низкий»,  $+1_{F_i}$  – «высокий») показателей  $F_i$  (Модульность, Гетерогенность, Производительность, Многопользовательский режим, Масштабируемость). Обобщённые оценки экспертов для простых опорных ситуаций представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты опроса эксперта на простые правила

Правило	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_{res}$
1	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	0,2
2	Низкая	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая	0,3
3	Низкая	Низкая	Высокая	Низкая	Низкая	0,3
4	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая	Низкая	0,8
5	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая	0,6

Для определения оценок результирующего показателя в сложных опорных ситуациях с учетом мнений эксперта в простых опорных ситуациях произведем вычисление параметра  $-1 < \lambda^* < \infty$  нечеткой меры Сугено, решив уравнение

$$\frac{(1 + 0,2\lambda)(1 + 0,3\lambda)(1 + 0,3\lambda)(1 + 0,8\lambda)(1 + 0,6\lambda) - 1}{\lambda} = 1.$$

Далее с учётом  $\lambda = -0,9596$  вычисляются экспертные оценки результирующего показателя в сложных опорных ситуациях и результирующий показатель эффективности архитектуры программного комплекса согласно предложенной методики. Вычисленные значения результирующего показателя эффективности архитектуры будут равны:  $F_{res}(mon) = 0,711$ ,  $F_{res}(mod) = 0,754$ ,  $F_{res}(com) = 0,813$ ,  $F_{res}(csa) = 0,891$ ,  $F_{res}(soa) = 0,931$ .

Таким образом, в результате опроса экспертов и реализации предложенной процедуры многокритериального оценивания был сделан обоснованный выбор в пользу сервис-ориентированной архитектуры. Однако следует отметить, что это не означает абсолютного объективного превосходства сервис-ориентированной архитектуры над другими вариантами. Полученные численные оценки частных показателей, характеризующих качество вариантов альтернативных архитектур, а также обобщённый показатель их эффективности позволяют в дальнейшем ситуационно и обоснованно переходить к другим архитектурам информационной платформы для решения соответствующих классов прикладных задач в промышленном интернете.

Предложенную процедуру многокритериального выбора архитектуры информационной платформы можно ещё раз применить при получении более детальной информации как по возможным компонентам аппаратно-программного комплекса, так и показателям, с помощью которых проводится оценивание их качества. В этом случае мы получим более детальное описание как архитектуры, так и соответствующих особенностей её реализации. В приложении 4 приведены примеры графического представления возможных вариантов детализации архитектуры информационной платформы, выбор которой был проведён в данном параграфе. Данные примеры взяты из [186].

#### **4.2. Состав и структура разработанного аналитико-имитационного программного комплекса синтеза технологии управления киберфизической системой**

Выбранная сервис-ориентированная архитектура АИПК позволяет организовать работу ряда её компонент. Основными из них являются:

1. Аналитический модуль одновременного синтеза технологий и программ (комплексных планов) управления информационными процессами в КФС.
2. Аналитический модуль учёта факторов неопределённости, предназначенный для оценивания робастности и устойчивости планов функционирования КФС на основе построения областей достижимости.
3. Имитационный модуль синтеза технических характеристик узлов КФС.

Кроме того, программный комплекс содержит ряд вспомогательных компонент, обеспечивающих его работу в качестве открытой системы, а также в составе прикладных решений (например, в составе АСУ промышленным предприятием). Некоторые из них могут быть использованы для одновременного решения задач синтеза технологии и программ управления киберфизическими системами в различных предметных областях. Кратко остановимся на функциях данных вспомогательных компонент:

1. Модуль регистрации сервисов и маршрутизации запросов.

В отличие от информационных потоков в промышленном интернете в исследовательском АИПК большее значение имеют потоки событий и реакции системы на них. При проектировании и реализации предлагаемого программного комплекса обеспечивается принцип слабой связанности компонент. Компоненты (сервисы) должны взаимодействовать между собой путём отправки асинхронных сообщений, имеющих название и заданный набор параметров. Сообщения должны использоваться как для информирования программного комплекса об изменении состояний его компонент, так и в качестве запросов на реализацию вычислительных сценариев. Преимущественно события должны адресоваться общей шине без указания конкретного узла или сервиса. Узлы и сервисы, в свою очередь, «прослушивают» общую шину на предмет относящихся к ним событий. Результатом реакции на событие может быть следующее событие, которое аналогично направляется в общую шину.

Таким образом, модуль регистрации сервисов и маршрутизации запросов позволяет:

- хранить актуальную информацию о действующих в системе сервисах, реализующих вычислительные алгоритмы;
- осуществлять перенаправление внутренних и внешних запросов требуемым сервисам;
- исполнять заданные сценарии взаимодействия сервисов при решении задач.

## 2. Модуль формирования пользовательского интерфейса.

Модуль, формирующий пользовательский интерфейс, (пользовательское приложение) программно отделён от серверной части и их взаимодействие сведено к обмену короткими сообщениями. Это позволяет исходный код модуля передавать пользовательскому терминалу не более одного раза, во время первого старта или обновления приложения. Все вспомогательные манипуляции в пользовательском интерфейсе выполняются внутри приложения без обращения к серверу. Длительные вычислительные операции не блокируют интерфейс, кроме ситуации, в которой это оправдано логикой его работы.

## 3. Модуль асинхронного обмена сообщениями.

Функционирование программного комплекса сопряжено с регулярным выполнением длительных ресурсоёмких операций. Чтобы исключить сбой в работе приложения, вызванный временной недоступностью серверной части приложения или конкретного вычислительного модуля, обмен сообщениями пользовательского приложения с серверным приложением реализован асинхронно.

Модуль асинхронного обмена сообщениями обеспечивает доведение информационных сообщений до пользователей при наступлении определённых событий, таких как, например, прохождение этапов длительной расчётной процедуры.

## 4. Транзакционный модуль.

Модуль обеспечивает транзакционный контроль исполнения запросов пользователя на серверной части программного комплекса с целью гарантированного доведения результата запроса до пользователя в условиях возможного отказа некоторых компонентов программного комплекса. В данном случае под транзакционностью понимается свойство системы выполнять несколько действий как одну общую операцию, которая имеет смысл и может быть завершена только полностью. Задача транзакционного модуля – с помощью заданного сценария предпринять попытки завершить транзакцию и, в случае неудачи, выполнить запланированные действия по предотвращению каскадного распространения ошибки. Для отдельных транзакций, в ходе которых происходит изменение данных, должны быть созданы сценарии отката изменений в случае сбоя одной из операций внутри транзакции.

## 5. Модуль контроля параллельных вычислений.

В большинстве случаев решение задач планирования и имитационного моделирования требуют значительного времени выполнения. Существенно снизить время выполнения макроопераций возможно за счёт рациональной организации вычислительных сценариев. Для этих целей задействуется модуль распараллеливания вычислений не только на уровне реализации отдельных сервисов, но и на уровне общей шины. Реализация распараллеливания вычислительных операций основывается на механизме очереди сообщений.

#### 6. Модуль автоматического масштабирования.

Разработанный программный комплекс допускает масштабирование с минимальными затратами на перепрограммирование за счёт возможности одновременной работы ряда идентичных сервисов для равномерного распределения нагрузки на вычислительные узлы. Модуль также обеспечивает ввод новых экземпляров сервисов в эксплуатацию по мере необходимости.

#### 7. Модуль защиты информации.

Модуль защиты информации должен обеспечивать шифрование канала связи и защиту от типовых атак, таких как отказ в обслуживании. Часть функций защиты информации реализована стандартными механизмами используемых протоколов, другая часть – собственными программными решениями. Кроме того, Модуль защиты информации выполняет проверку валидности входящего сообщения (по размеру, структуре, содержимому) и препятствует записи данных без проверки валидности.

#### 8. Модуль мониторинга работоспособности системы.

С целью мониторинга работоспособности программного комплекса был разработан модуль, автоматически выполняющий самодиагностику и первичные меры восстановления системы. Модуль реализует следующие функции:

- мониторинг состояния сервисов – простой запрос-ответ;
- корректность работы сервиса – периодическое сравнение результатов расчётов тестового задания с эталоном;
- мониторинг очередей сообщений – компонент подсистемы автоматического масштабирования (запуска дополнительных экземпляров сервисов);
- мониторинг времени выполнения макро-операций, позволяющий определить загруженность и работоспособность системы в целом.

#### 9. Модуль автоматизированного обновления.

Одна из особенностей исследовательского АИПК – регулярная корректировка методов и алгоритмов решения прикладных задач. В этих условиях значительно повышаются требования к скорости модификации программного комплекса и сохранению его работоспособности в переходном состоянии. Обеспечение указанных требований реализовано в модуле автоматизированного обновления за счёт:

- слабой связности сервисов и возможности вносить изменения в программную реализацию точно, только в задействованный сервис без обновления всей системы целиком;



- упрощённой структурно-функциональной реконфигурации программного комплекса с использованием языков программирования сверхвысокого уровня, в том числе, визуальных;
- поддержки обратной совместимости с предыдущими версиями сервисов.

#### 10. Модуль непрерывных расчётов.

В разработанном модуле реализованы принципы проактивности и адаптивности, заключающиеся в постоянном фоновом решении заданных прикладных задач. Сбор исходных данных, моделирование и доведение результатов расчётов модуль осуществляет в автоматическом режиме. Данный модуль актуален при необходимости выявления определённых зависимостей результатов вычислений от поступающих исходных данных.

#### 11. Геоинформационный модуль.

Входящий в состав АИПК геоинформационный модуль предназначен для визуализации исходных данных и результатов расчётов, имеющих географическую привязку. В нём реализованы следующие функции:

- предварительная интеграция разнородных данных об объектах на территории из произвольных форматов хранения на этапе формирования базового наполнения системы;
- оперативная интеграция данных из территориально-распределённых источников по стандартным протоколам;
- представление данных на интерактивной карте;
- отображение динамически изменяющихся и многовариантных данных;
- отображение результатов решения пространственных и аналитических задач;
- управление геопривязанными событиями в соответствии с регламентированными процедурами на основе технологии краудсорсинга.

Среди всех перечисленных компонент аналитический модуль одновременного синтеза технологии и программ управления информационными процессами в КФС является центральным, поэтому ниже приводится подробное описание его разработки [182].

Объектно-ориентированная спецификация выполнена на языке моделирования UML (Unified Modeling Language), сохраняющим на данный момент позицию стандарта де-факто объектно-ориентированного проектирования. На рисунке 39 приведена диаграмма базовых классов разработанного вычислительного модуля.

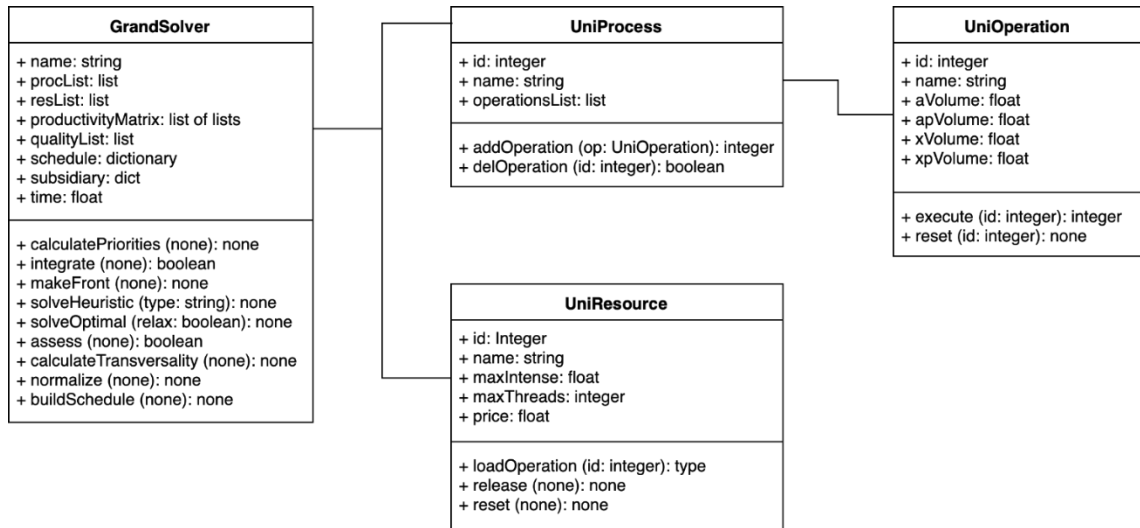


Рисунок 39. Диаграмма классов разработанного вычислительного модуля.

С целью повышения удобства использования разработанного модуля синтеза технологии и программ управления КФС и предоставления к нему удалённого доступа сторонних исследователей, а также возможности встраивания прототипа в процесс управления распределённой киберфизической системой, были предъявлены следующие внутренние требования к разработке соответствующих программных модулей:

1. Код программы должен легко читаться и модифицироваться сторонними разработчиками.
2. Наличие готовых реализаций поиска решения различных задач математического программирования (таких, например, как, задачи линейного программирования, задачи о назначениях и других).
3. Организация вычислительной части программного модуля в виде открытой системы, то есть в доступном для удалённого человеко-машинного и межмашинного использования виде.
4. Интерфейс прототипа должен быть дружелюбным для пользователя и не требовать от него навыков программирования.
5. Необходимо наличие встроенных средств визуализации результатов решения задач.
6. Исходные модели и результаты моделирования должны храниться в открытом виде и готовы для использования в приложениях сторонних исследователей.

Соблюдение первого из указанных пунктов требовало обоснованного подхода к выбору языка программирования для создания разработанного прототипа. Вопрос программной реализации научных исследований с каждым годом приобретает всё большую актуальность. К сожалению, подавляющее большинство исследователей всё ещё не занимаются программированием самостоятельно, поэтому множество достижений остаются «на бумаге» и не

получают должного развития. В лучшем случае привлекаются специалисты-разработчики, но и этот путь приводит к значительному увеличению временного интервала от возникновения идеи у исследователя до её программной реализации разработчиком, что не может не сказаться отрицательно на результатах исследований.

Существует множество языков программирования, и каждый из них ориентирован на удовлетворение определённых потребностей в создании программных комплексов и информационных систем. Так, научные вычисления требуют совместного выполнения нескольких типов расчётных задач. Для того, чтобы каждый раз заново не программировать базовые алгоритмы, целесообразно использовать готовые программные библиотеки с широким набором готовых «решателей». Кроме того, язык должен обеспечивать возможность взаимодействия с исследователем посредством графического интерфейса, предоставлять технологии отображения научной графики сложного вида.

Все перечисленные выше особенности удачно сочетаются в языке программирования Python [187]. Сложилось мнение, что Python является одним из самых простых языков для изучения, а также является одной из лучших сред программирования для научных целей [188, 189]. Кроме того, Python – это кроссплатформенный пакет программного обеспечения с открытым исходным кодом, который распространяется под лицензией «Python Software Foundation License». Программы, написанные на нем, не несут скрытых затрат на лицензирование.

Основным доводом в пользу выбора языка программирования Python для создания центрального вычислительного модуля явилось наличие множества пакетов (программных библиотек), которые позволяют выполнять многие общие задачи программирования в десятках строк кода, а не в сотнях или тысячах, как в других языках. Это позволило сосредоточить усилия на научной части работы, а не на её технической реализации.

Так, например, при реализации предложенного в п. 3.2 алгоритма поиска оптимальных управляющих воздействий, основанного на принципе максимума Л.С. Понтрягина, в каждый момент времени, принадлежащий заданному интервалу планирования, для максимизации функции Гамильтона проводится параллельное решение задач оптимизации нескольких классов, в том числе и задач оптимизации, в которых целевая функция и ограничения являются линейными (так называемые задачи линейного программирования). Для этой цели доступен широкий спектр библиотек языка Python. Так как размерность задач на этапе проведения исследований не велика, а требование к времени их решения строго не предъявляются, то выбрать конкретную реализацию «решателя» можно исходя из простоты задания исходных данных и интерпретации результата. В рассматриваемом случае решения задач линейного

программирования предлагается использовать симплекс-метод и метод ветвей и границ (в последнем случае для учета управляющих воздействий, принимающих целочисленные решения), реализованные в открытом программном комплексе GLPK (GNU Linear Programming Kit) [190]. Поскольку GLPK реализован на языке ANSI C и доступен в виде исполняемых файлов, то необходимо воспользоваться python-библиотекой, предоставляющей удобный интерфейс к его функциям. Для этой цели хорошо подходит библиотека PuLP [191]. Ниже на листинге 1 представлен пример формирования исходных данных, запуск поиска решения и вывод результата для некоторой задачи линейного программирования, написанный на языке Python с использованием библиотеки PuLP.

Листинг 1 – Пример постановки и решения задачи линейного программирования на языке Python

```
# Импорт библиотеки PuLP:
from pulp import *

# Объявление неотрицательных переменных:
x1 = pulp.LpVariable("x1", lowBound = 0)
x2 = pulp.LpVariable("x2", lowBound = 0)

# Формулирование задачи (максимизация или минимизация):
problem = pulp.LpProblem('example', pulp.LpMaximize)

# Задание целевой функции:
problem += a*x1 + b*x2, "Целевая функция"

# Задание ограничений:
problem += c*x1+ d*x2 <= 10000, "Неравенство"
problem += x1 == e*x2, "Равенство"

# Запуск поиска решения:
problem.solve()

# Вывод результата:
for variable in problem.variables():
    print (variable.name, "=", variable.varValue)
```

Как видно из приведённого примера, постановка и решение задачи линейного программирования с помощью PuLP требует всего нескольких строк кода.

Последнее время всё большее распространение получает библиотека SciPy [192]. Но, во-первых, в конкретном случае решения задачи линейного программирования в разработанном аналитическом модуле она не даёт видимых преимуществ, а, во-вторых, при дальнейшем усложнении решаемых задач возможен простой переход на SciPy без существенной переработки кода.

На рисунке 40 приведена диаграмма контекста центрального модуля (в терминологии модели «С4», предназначенной для визуализации архитектуры системы [193]).

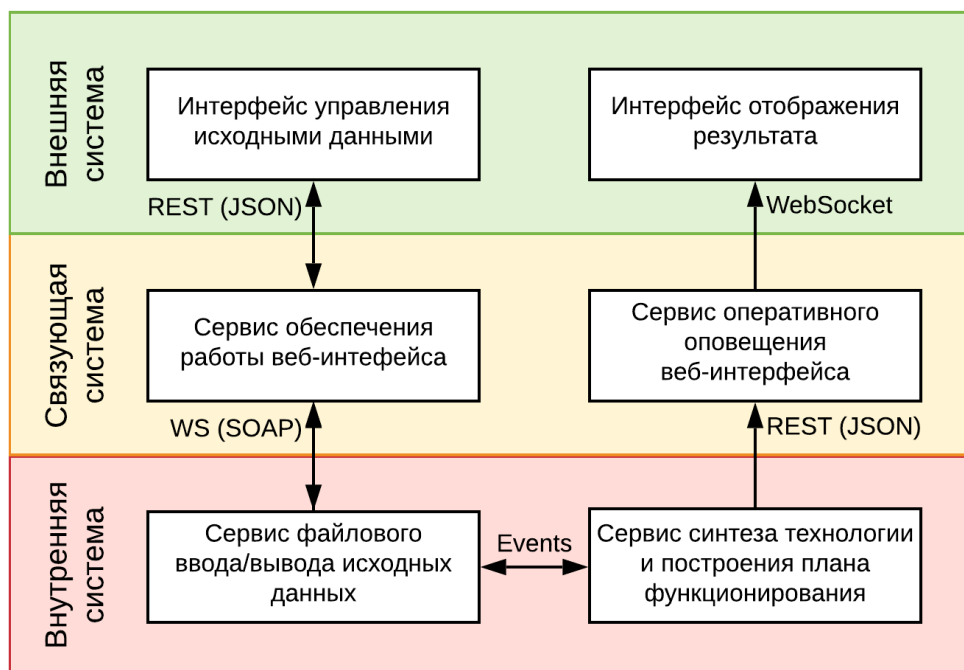


Рисунок 40. Диаграмма контекста центрального модуля

Вычислительный модуль задействует три уровня АИПК. На внешнем уровне находится пользовательский интерфейс, построенный в виде веб-приложения. На внутреннем уровне реализован сам расчётный модуль, а также вспомогательный модуль работы с исходными данными. Средний (связующий) уровень представлен сервером приложений, обеспечивающим работу веб-приложения, а также сервером обмена сообщениями в форматах JSON с использованием транспортных протоколов HTTP и WebSocket.

Веб-приложение традиционно создаётся с использованием трёх языков:

- язык гипертекстовой разметки HTML [194];
- язык каскадных таблиц стилей CSS [195];
- язык программирования JavaScript (реализация языка ECMA-262) [196].

Ежегодно появляется несколько программных платформ, фреймворков и библиотек, позволяющих структурировать, ускорить и упростить разработку веб-приложений. В последние годы в тройку самых востребованных решений входят Angular [197], React [198], Vue [199]. Для целей реализации интерфейса прототипа исследовательского приложения за основу был взят

React, так как является JavaScript библиотекой, в отличие от полноценного Angular. React предоставляет высокую скорость работы интерфейса, что становится важным при отслеживании статуса вычислительного процесса в режиме реального времени. Недостаток во встроенных компонентах пользовательского интерфейса компенсируется подключением только самых необходимых элементов из фреймворка Ionic React [200].

Оформление стилей CSS также в последнее время используется не на прямую, а через специальные препроцессоры, позволяющие использовать упрощённый синтаксис, транслируемый в стандартный язык каскадных таблиц стилей. Среди них: Sass, SCSS, Less, Stylus и PostCSS. Так, для создания описываемого прототипа был использован препроцессор SCSS (Sassy Cascading Style Sheets), позволивший простыми конструкциями сформировать набор стилей для пользовательского интерфейса. В масштабах простого исследовательского интерфейса проведение глубокого сравнительного анализа препроцессоров нецелесообразно.

Важной частью пользовательского интерфейса исследовательского прототипа является графическое представление вычислительного процесса и результатов вычислений. Несмотря на большое множество библиотек построения графиков, лучшее отношение наглядности и управляемости к трудозатратам демонстрирует библиотека ECharts.js [201].

На связующем уровне используется сервисная шина АИПК. Промежуточное программное обеспечение задействует каналы связи с веб-интерфейсом и расчётным модулем, используя технологии REST, W3C Webservices, WebSocket и форматы SOAP, WSDL, JSON для управления работой всего приложения. При решении практических задач связующий уровень может быть представлен неким промышленным решением класса ESB (Enterprise Service Bus), таким как Zato, OpenESB, WSO2 или Mule. Выбор конкретного решения обуславливается особенностями решаемой практической задачи [202].

На внутреннем уровне описанный ранее расчётный модуль, функционирующий в виде веб-сервиса, дополнен модулем работы с исходными данными. Для достижения высокого уровня открытости разработанного АИПК все исходные данные хранятся в файлах в формате XML. Описание формата файла представлено в Листинге 2 и более подробно в Приложении 2.

## Листинг 2 – Фрагмент файла XML с исходными данными и пояснениями

<process>	описание технологического процесса
<id>1</id>	идентификатор
<operation>	описание операции
<id>3</id>	идентификатор
<name>Первичные вычисления</name>	читаемое название
<volume>7.0</volume>	предельное время выполнения
<stream>6.0</stream>	объём потока данных
</operation>	...
</process>	

Работа с центральным аналитическим модулем подразумевает ввод большого количества исходных данных о вычислительных процессах, операциях и ресурсах, что вынуждает применять средства автоматизации моделирования, в частности, средства описания процессов функционирования сложных объектов.

Для удовлетворения указанной потребности рассматривались многочисленные инструментальные средства и среды автоматизации моделирования, среди которых следует указать GPSS, AnyLogic, BPsim, PowerSim, Simplex, Modul Vision, Triad.Net, CERT, ESimL, Simulab, NetStar, Pilgrim, МОСТ, КОГНИТРОН и т. д. [203]. Несмотря на то, что указанные средства имеют множество собственных подходов к описанию функционирования сложных технических систем, целесообразно для этих целей воспользоваться одним из принятых стандартов или широко распространённой нотацией.

Одной из первых формальных моделей, предназначенных для спецификации моделей процессов, использовалась модель сети Петри. Слабые выразительные возможности и средства для представления операционной семантики этой модели привели к тому, что на практике эта модель применяется, в основном, в качестве основы для других языков. [204].

Группа стандартов IDEF (Integrated DEFinition) насчитывает 15 отдельных направлений, но наибольшее распространение в своё время получили только IDEF0 (функциональное моделирование), IDEF1 (моделирование информационных потоков) и IDEF3 (документирование технологических процессов). К настоящему моменту данный стандарт не получил развития, применение этих стандартов на практике сводится к минимуму.

Широко распространённые диаграммы UML, в свою очередь, больше ориентированы на описание архитектуры программного обеспечения и поддержку объектно-ориентированного подхода, чем на описание технологических процессов.

Среди отечественных разработок упоминается, в основном, графоаналитический подход «Узел-Функция-Объект» на основе работ Г. П. Мельникова [205]. Данный подход больше ориентирован на описание потоков событий и не имеет средств формализации потоков ресурсов, динамики процессов.

Стандарт eEPC (Extended Event Driven Process Chain, расширенная нотация описания цепочки процесса, управляемого событиями) хорошо подходит для описания ресурсных потоков и потоков событий, но неудобен для описания технологических процессов, в которых используется большое количество разных ресурсов и средств.

Нотация BPMN (Business Process Model and Notation, нотация и модель бизнес-процессов), как и eEPC, предназначена для описания диаграмм бизнес-процессов, понятных как техническим специалистам, так и бизнес-пользователям, но с точки зрения комплексного моделирования производственных процессов представляет больший интерес. Разработкой нотации BPMN занималась международная организация Object Management Group (OMG), являющаяся одной из ведущих организаций в области стандартизации процессов проектирования и разработки информационных систем и их программной реализации. Среди преимуществ BPMN отмечаются следующие: множество используемых примитивов объединяет в себе достоинства других нотаций и позволяет хорошо представлять модели распределенных процессов; предоставляет широкие возможности для формального представления компонент сложных процессов [206, 207]. Для целей применения в исследовательском прототипе СПМО важно, что вместе с графической нотацией BPMN стандартизирует и описание процессов в формате XML.

Таким образом, язык BPMN является удобным, но 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. Применение сторонних программных решений для редактирования BPMN нотаций позволяет автоматизировать процесс ввода исходных данных в прототип СПМО, в частности, описания процессов функционирования киберфизических систем.

К сожалению, встроенных возможностей языка BPMN недостаточно для полноценного описания всех концептов, используемых в предлагаемых в диссертации логико-динамических моделях. Однако нотация BPMN 2.0 в пунктах 7.6 «BPMN Extensibility» и 8.2.3 «Extensibility» предоставляет возможности её расширения до требуемого уровня (см. таблицу 5) [205].



Таблица 5 – Соответствие элементов аналитической модели производственных процессов предприятия и нотаций BPMN концептуальной модели

Концепт аналитической модели	Концепт BPMN	Имеющиеся в BPMN сведения	Расширенные сведения для аналитической модели
Операция	Task	Идентификатор, название, используемые ресурсы	Целевой объём данных в операции, максимальные сроки реализации
Ресурс	Resource	Идентификатор, название, запасы, стоимость разового использования, стоимость поминутного использования	Производительность
Цель	–	–	Значения переменных состояния в конечный момент времени
Поток	Sequence Flows / Message Flows	Идентификатор, название, источник, приёмник	Максимальная скорость потока
Структура	Pool	Идентификатор, название, состав ресурсов, календарная доступность	Суммарная производительность

Предложенное в диссертации расширение нотации реализовано с помощью специального элемента `<extensionElements>`. С его использованием можно дополнить базовые элементы нотации BPMN требуемыми параметрами из логико-динамических моделей. Так, например, в листинге 3 показан концепт «операция» («Task») с новыми параметрами `stream` (величина объёма данных) и `volume` (максимальный срок реализации операции).

Листинг 3 – Пример расширения нотации BPMN

```
<task id="_7" name="Первичная обработка">
  <extensionElements>
    <ltsm:props stream="10" volume="7" />
  </extensionElements>
  ...
</task>
```

Ниже в листинге 4 приведён фрагмент файла BPMN в формате XML, описывающего некоторый процесс функционирования киберфизической системы.

## Листинг 4 – Фрагмент описания процесса функционирования КФС в BPMN

<pre> &lt;?xml version="1.0"&gt; &lt;definitions xmlns="http://www.omg.org/spec/BPMN " &gt;   &lt;process id="PROCESS_1"&gt;     &lt;task id="op_1" name="Первичная обработка"&gt;       &lt;extensionElements&gt;         &lt;ltsm:props name="volume" value="20"/&gt;         &lt;ltsm:props name="stream" value="5"/&gt;       &lt;/extensionElements&gt;        &lt;incoming&gt;_57&lt;/incoming&gt;       &lt;outgoing&gt;_12&lt;/outgoing&gt;        &lt;performer id="op_1_RES_1"&gt;         &lt;resourceRef&gt;RS_1&lt;/resourceRef&gt;       &lt;/performer&gt;     &lt;/task&gt;     ...     &lt;resource id="RS_1" name="Граничный шлюз"&gt;       &lt;extensionElements&gt;         &lt;ltsm:props name="threads" value="1"/&gt;         &lt;ltsm:props name="productivity" value="5"/&gt;         &lt;ltsm:props name="price" value="30"/&gt;       &lt;/extensionElements&gt;     &lt;/resource&gt;     ...   &lt;/definitions&gt; </pre>	<p>описание процесса</p> <p>описание операции</p> <p>расширение параметров</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- максимальный срок реализации</li> <li>- объём данных</li> </ul> <p>дуги графа связности</p> <p>элементы матрицы производительности ресурсов для заданной операции</p> <p>описание ресурсов</p> <p>расширение параметров ресурсов</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- параллельные потоки</li> <li>- суммарная производительности</li> <li>- стоимость использования</li> </ul>
--	---

Как видно из сравнения листингов 3 и 4, формат файла исходных данных центрального вычислительного модуля, сформированный в полном соответствии с требованиями разработанных (см. 2 главу диссертации) логико-динамических моделей, и формат расширенного BPMN файла могут быть однозначно трансформированы друг в друга. Это означает, что задача автоматизации формирования исходных данных успешно решена с использованием стороннего программного обеспечения, позволяющего пользователю графически задавать исходные данные в стандартизированном виде, а также использовать уже готовые описания процессов в формате BPMN, дополняя их необходимыми атрибутами. Переход от формата BPMN к внутреннему формату АИПК осуществляется с помощью разработанного диссертантом сервиса ввода/вывода исходных данных (см. рисунок 40).

После проведения требуемых расчётов возникает необходимость передать результаты не только в пользовательский интерфейс, но и во внешние системы в машиночитаемом виде. Для этих целей АИПК формирует выходные файлы двух распространённых форматов: XML (см. листинг 5) и JSON (см. листинг 6).

## Листинг 5 – Фрагмент выходного файла в формате XML

```

<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<dynamicmodel>
  <name>IIoT</name>
  <duration>121</duration>
  <cluster>
    <resource>
      <id>RS_1</id>
      <name>Шлюз</name>
      <capacity>1</capacity>
      <power>1.0</power>
      <price>6.0</price>
      <runtime>41</runtime>
    </resource>
    ...
  </cluster>
  <coefficients>
    <cost>0.5</cost>
    <time>0.5</time>
  </coefficients>
  <process>
    <operation>
      <id>_3</id>
      <name>S1</name>
      <volume>100</volume>
      <stream>30</stream>
      <start>120.0</start>
      <stop>270.0</stop>
      <resource>RS_1</ resource>
      <intensity>1.0</intensity>
    </operation>
    ...
  </process>
</dynamicmodel>

```

Благодаря современным технологиям построения приложений удалось автоматизировать ввод исходных данных и реализацию процессов моделирования функционирования киберфизических систем, достичь высокого уровня наглядности выполнения сложной вычислительной процедуры и открытости разработанной системы, что способствует глубокому пониманию процессов, происходящих внутри математической модели, и повышению обоснованности и целенаправленности дальнейших исследований.

Листинг 6 – Фрагмент выходного файла в формате JSON

```

{
  "name": "IIoT Schedule",
  "duration": 121.0,
  "coefficients": {
    "cost": 0.5,
    "time": 0.5
  },
  "resources": [
    {
      "id": "RS_1",
      "name": "Шлюз",
      "capacity": 1,
      "power": 1.0,
      "price": 6.0,
      "runtime": 41.0
    },
    ...
  ],

  "operations": [
    {
      "id": "_3",
      "name": "S1",
      "volume": 100.0,
      "stream": 30.0,
      "start": 30.0,
      "stop": 59.0,
      "resource": "RS_1",
      "intensity": 1.0
    }
  ]
  ...
}

```

Второй разработанный в рамках выполненных диссертационных исследований аналитический программный модуль предназначен для оценивания робастности планов функционирования КФС в условиях воздействия на них интервально заданных возмущающих воздействий. Для этого были построены и исследованы аппроксимированные области достижимости соответствующих логико-динамических моделей, описывающих поведение КФС в пространствах возмущающих функций и показателей качества функционирования данных систем. Аналогично центральному вычислительному модулю, рассмотренному выше, основным языком реализации данного модуля является Python. Сам модуль выполнен в виде веб-сервиса по стандартам W3C Web Services с разделяемым контрактом и использованием протокола SOAP. Для получения множества точек области достижимости, согласно алгоритму, изложенному в п. 3.3.5 данной диссертационной работы, используются преимущества сервис-ориентированной архитектуры, а именно масштабирование сервисов (создание множества копий вычислительного

модуля) и распараллеливание задач путём распределения их по копиям сервиса. Таким образом удаётся при приемлемых временных затратах найти необходимое количество точек, лежащих на границе аппроксимированной области достижимости логико-динамических моделей в пространстве показателей качества поведения КФС. Совместное применение двух указанных аналитических сервисов позволяет получить наиболее нечувствительную к возмущающим воздействиям (робастную) технологию и план функционирования (программу проактивного управления информационными процессами) КФС.

Третий из разработанных в диссертации основных программных модулей АИПК – имитационный модуль, с помощью которого решаются задачи анализа и синтеза технических характеристик узлов КФС. Первый режим работы данного модуля – имитация реализации синтезированного центральным модулем плана функционирования КФС в условиях случайных возмущений. В результате реализации данного режима работы может быть получена количественная оценка показателя робастности технологии и соответствующего плана управления информационными процессами в КФС. Второй режим работы – итерационная процедура оптимизации функционала (2.109) посредством варьирования значений правых частей ограничений, накладываемых на процесс функционирования КФС и описываемых с помощью векторных функций  $q^{(1)}$  и  $q^{(2)}$ , (см. формулу 2.108).

Для первого режима работы используется программное решение на базе Python-фреймворка для имитационного моделирования – SimPy. Основное назначение данного режима – проверка геометрического способа оценивания робастности технологии и плана управления информационными процессами в КФС, и в дополнение к нему оценивание устойчивости указанного плана на основе имитационных экспериментов.

Второй режим работы основывается на проведённых ранее исследованиях по созданию комбинированного метода оптимизации параметров сложной технической системы [208].

Основная идея упомянутого метода заключается в варьировании значений параметров, входящих в правую часть ограничений вида (2.44, 2.45) и задающих величины максимальных значений интенсивностей выполнения операции в потоковых логико-динамических моделях, что соответствует изменению характеристик вычислительных и телекоммуникационных ресурсов. Для реализации данного подхода используется следующая двухэтапная итерационная процедура.

Этап 1. Оптимизация процесса выполнения операций и распределения ресурсов КФС используя её аналитико-имитационную (стохастическую) модель:

$$f(q_0(\zeta^{(\nu)}, \mathbf{p}_\nu)) \rightarrow \min_{\mathbf{p}_\nu \in \Omega}, \quad (4.61)$$

где  $q_0(\cdot)$  – аналитико-имитационное описание взаимосвязи оптимизируемых параметров модели планирования,  $\Omega$  – множество допустимых значений параметров, характеризующих вычислительные и телекоммуникационные ресурсы КФС,  $\nu$  – номер итерации. Стохастическая составляющая данной модели позволяет имитировать различные классы возмущающих воздействий, оказывающих свое влияние на КФС.

Этап 2. Динамическое планирование операций и распределение ресурсов с фиксированным вектором параметров ресурсов  $\mathbf{p}_\nu$ , полученном на предыдущем этапе:

$$f(q_0(\zeta^{(\nu+1)}, \mathbf{p}_\nu)) \rightarrow \min_{\zeta^{(\nu+1)} \in Z}, \quad (4.62)$$

где  $Z$  – множество допустимых значений приоритетов.

Для начала работы рассматриваемой итерационной процедуры на нулевой итерации ( $\nu = 0$ ) необходимо задать вектор начальных значений приоритетов ( $\zeta^{(\nu)} = \zeta^{(0)}$ ) операций, выполняемых в КФС. Его можно сформировать явно, используя значения сопряжённых переменных, полученные в результате оптимизации процессов функционирования КФС на основе реализации принципа максимума Л.С. Понтрягина (см. 3, а также 5 главы диссертации). Итерационный процесс поиска оптимального плана функционирования КФС заканчивается в одном из следующих случаев: достижение заданного уровня разности значений обобщенных функционалов (свертки частных показателей качества функционирования КФС) на двух последовательных итерациях:

$$\left| f(q_0(\zeta^{(\nu+1)}, \mathbf{p}_{\nu+1})) - f(q_0(\zeta^{(\nu)}, \mathbf{p}_\nu)) \right| < \tilde{\epsilon}, \quad (4.63)$$

где  $\tilde{\epsilon}$  – известная величина; либо, если стабильная сходимость не наблюдается, используется эвристическое правило выхода из итерационной процедуры. При этом проверка условия (4.5) проводится только начиная с первой итерации, так как  $\mathbf{p}_0$  в начале рассматриваемой итерационной процедуры не определён. При этом проверка условия (4.5) проводится только начиная с первой итерации, так как значения компонент вектора  $\mathbf{p}_0$  в начале рассматриваемой итерационной процедуры не определены.

В предложенной двухэтапной процедуре на первом этапе можно воспользоваться, например, случайным варьированием характеристик КФС, а также варьированием характеристик ресурсов, попадающих под определение «узких мест» системы по результатам проведения моделирования или имитации. При этом для оптимизации вектора параметров  $\mathbf{p}$  целесообразно использовать комбинацию метода глобального поиска (метод  $\Psi$ -преобразования [209]) и метода численной оптимизации без расчёта производных (метод основных осей Брента [210]). Использование только этого метода при оптимизации функционала приводит к большим погрешностям. Поэтому в [210] предлагается его дополнить методом локальной оптимизации. Главный недостаток алгоритмической реализации метода локальной оптимизации заключается в необходимости задания начального приближения, которое должно быть рассчитано для каждой задачи отдельно. Однако первое приближение уже имеется в результате оптимизации функционала (4.3) с использованием метода  $\Psi$ -преобразований.

С использованием разработанного вычислительного модуля была проведена серия экспериментов, ориентированная на подтверждение возможности параметрического синтеза структуры промышленного интернета. За основу была принята упрощённая абстрактная модель туманных вычислений с одним вычислительным узлом на каждом уровне туманных вычислений и каналами связи между уровнями. Предполагалось, что информационный процесс состоит из этапов сбора данных, их обработки, классификации ситуации, формирования управляющего воздействия, реализации управления. При этом все операции, кроме сбора данных и реализации управления, могут выполняться на любом уровне промышленного интернета. Варьированию подвергались два обобщённых параметра: суммарная производительность вычислительных ресурсов и суммарная пропускная способность каналов связи. Одна условная единица производительности представляет собой 10% дополнительной реальной производительности вычислительных устройств. То есть, например, 5 условных единиц производительности соответствует увеличению реальной производительности оборудования на 50%. Аналогично принимаются и условные единицы пропускной способности каналов связи. Обобщённый показатель качества является безразмерной величиной и приобретает актуальность только при сравнении его значений при разных исходных данных. В обобщённый показатель входит два частных показателя: затраченное время на выполнения всего информационного процесса и его стоимость в широком смысле (с учетом энергетических и финансовых затрат).

Для построения графика, представленного на рисунке 41 (а) и (б), было проведено 100 экспериментов, в которых параметры производительности и пропускной способности системы варьировались от 1 до 10 условных единиц. Числовые результаты экспериментов приведены в таблице 6.

Анализ полученных числовых результатов позволяет сделать вывод о 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 в реальных несбалансированных системах возможно обоснованно определить некоторые минимально необходимые значения характеристик системы, дальнейшее улучшение которых будет нецелесообразно. На основании этих значений может быть проведено «выравнивание» характеристик системы, что, в конечном итоге, может существенно сократить её стоимость без потери качества функционирования.

В таблице 6 зелёным цветом отмечены те области значений показателя качества её функционирования, в которых имеется влияние на него характеристик системы. Жёлтым – области, в которых улучшение характеристик системы не влияет на значения указанного показателя качества. Синим цветом отмечены минимальные значения характеристик системы, необходимые для достижения заданного уровня качества её функционирования.

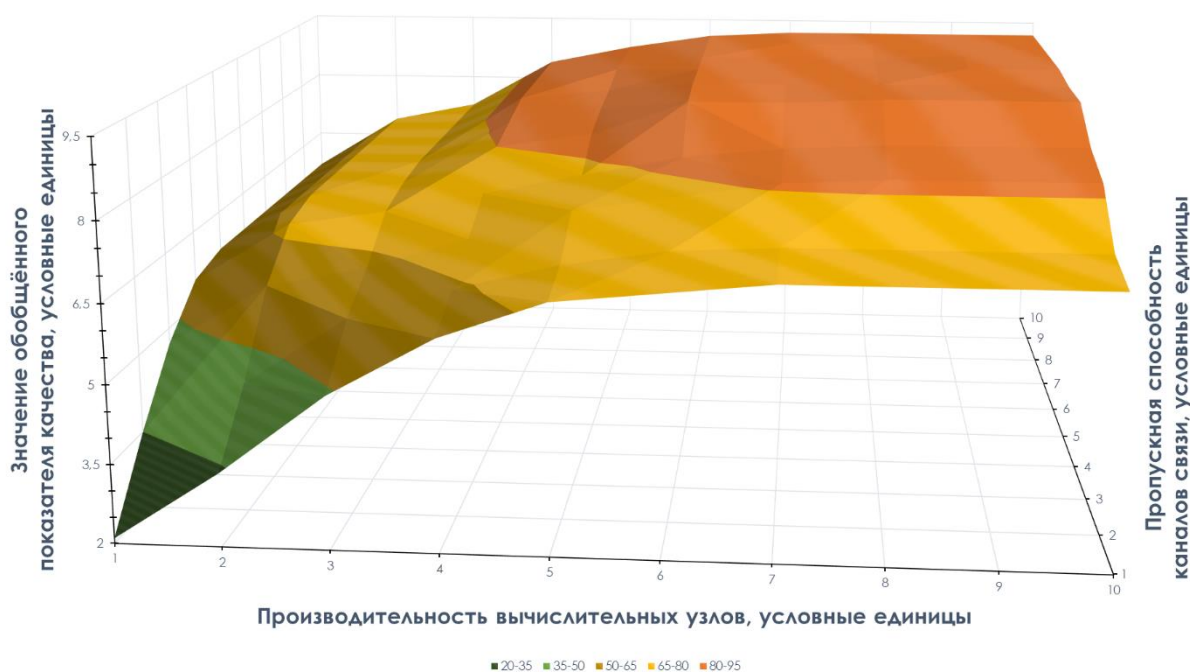


Рисунок 41 (а). График результатов параметрического синтеза системы



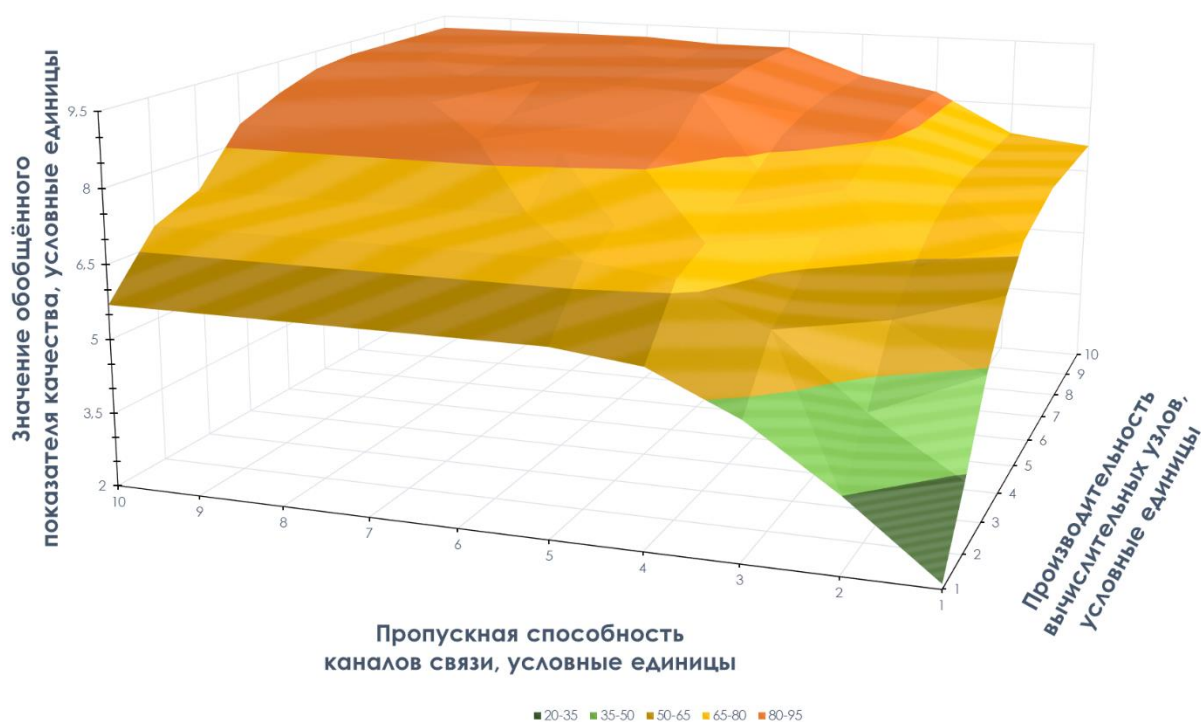


Рисунок 41 (б). График результатов параметрического синтеза системы

Таблица 6 – Числовые результаты параметрического синтеза системы

Пропускная способность каналов связи, у.е.	Производительность ресурсов, у.е.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	21	34	49	60	67	69	71	71	71	71
2	35	45	58	64	69	72	73	73	73	73
3	47	59	63	69	75	78	81	82	82	82
4	55	67	70	74	78	82	84	85	85	85
5	57	69	72	80	83	90	90	91	91	91
6	57	69	73	82	85	91	91	91	91	91
7	57	69	73	84	86	91	91	91	92	92
8	57	69	73	84	88	91	91	91	92	92
9	57	69	73	84	88	91	92	92	92	92
10	57	69	73	84	88	91	92	92	92	92

Таким образом, в результате выполнения описанной выше двухэтапной процедуры становится возможным осуществлять не только синтез технологии и плана функционирования КФС, но и синтез её технических параметров с учетом различных сценариев реализации возмущающих воздействий на указанные системы на этапе реализации программы проактивного управления ими. Однако стоит отметить, что на момент написания данной работы программная

реализация процедур решения задач синтеза технических параметров КФС является экспериментальной и требует дополнительных исследований и отладки.

Реализация вспомогательных модулей носит технический характер и не требует применения уникальных методик. Одной из особенностей включения перечисленных выше вспомогательных модулей в состав АИПК является приведение их к единому стандарту для использования в сервис-ориентированной архитектуре. Для преодоления проблем значительной гетерогенности модулей, различных языков их написания, множества форматов входных и выходных файлов был реализован механизм «программных обёрток». Данный способ позволяет, с одной стороны, учесть все особенности взаимодействия программного модуля с внешним миром, а с другой стороны, привести программный интерфейс взаимодействия с ним к стандарту W3C Web Services для беспрепятственного использования в сервис-ориентированной архитектуре.

#### **4.3. Разработка новых и модификация существующих инструментальных средств автоматизации решения задач синтеза технологий и программ управления КФС**

Важным направлением выполненных диссертационных исследований является направление, связанное с её практической реализацией. Важно учесть, что внедрение предлагаемого АИПК в существующие и перспективные киберфизические системы не должно требовать внесения значительных изменений в логику их построения, иначе затраты на конфигурирование и реконфигурацию КФС и перепроектирование превзойдут ожидаемый положительный эффект от их реализации. То есть, СПМО синтеза технологий и программ управления КФС должно встроиться в принятую архитектуру туманных вычислений в промышленном интернете вещей, дополнив собой существующие механизмы управления. Для этого необходимо, прежде всего, провести анализ существующих подходов к построению промышленного интернета вещей и определить допустимое место размещения АИПК и технологию управления сетевыми сервисами, реализующими требуемые вычислительные операции.

Для решения указанной задачи требуется отобразить основные концепты, описанные в п. 1.3 настоящей работы, на множество элементов типовой архитектуры туманных вычислений в промышленном интернете вещей.

Введенный ранее концепт «Ресурс» предлагается отображать на вычислительные устройства, представленные пятью вариантами: сенсоры и исполнители (в данном контексте – технические устройства для воздействия на физический мир, «актуаторы»), встроенные системы, туманные вычислительные устройства, граничные серверы, облачные центры обработки данных.

Говоря об этих элементах предложенной концептуальной модели промышленного интернета, а именно, о сенсорах и исполнителях, обеспечивающих связь информационной системы и физического мира, необходимо, прежде всего, отметить, что для выполнения сложных вычислительных задач эти устройства практически не пригодны из-за низкой производительности и, зачастую, автономного электропитания. Их основная задача – перевести параметры физического мира в данные или выполнить воздействие на физический мир с заданными параметрами.

Встроенные системы являются ближайшими устройствами (по территориальному расположению) к сенсорам и исполнителям, но они обладают несколько большими вычислительными мощностями. Вследствие этого такие устройства уже способны выполнять часть необходимых вычислений. Кроме того, встроенные системы имеют широкие коммуникационные возможности как по способам взаимодействия с вычислительной сетью, так и по пропускной способности. Аналогично сенсорам и исполнителям электропитание подобных систем может быть автономным.

Туманные вычислительные устройства на базе шлюзов и микро-ЦОД можно отнести к производительным устройствам с постоянным электропитанием, относительно надёжным хранением данных и быстрым откликом из-за близкого расположения к источникам данных.

Более ресурсоёмкие вычисления целесообразно выполнять на граничных серверах – высокопроизводительных вычислительных машинах на границе вычислительной сети предприятия.

Хранение больших объёмов данных и самые высоконагруженные вычислительные операции должны производиться в узлах облачных вычислений. Следует учитывать удалённость данных узлов и существенные задержки в передаче данных.

В том случае, если в рассматриваемой архитектуре аппаратно-программных средств, образующих инфокоммуникационную среду промышленного интернета, происходит деградация, то предложенное на содержательном уровне распределение задач и функции может поменяться.

Предложенный также ранее в 1 главе диссертации концепт «Операция» реализуется в виде программного кода, выполняющего требуемые вычислительные действия. Кроме решения прикладной задачи программный код обеспечивает сетевое взаимодействие с другими узлами для обмена данными посредством программного интерфейса в стиле REST с использованием коммуникации в формате JSON или за счёт технологии W3C веб-сервисов с коммуникацией в формате SOAP [211], реализуя, тем самым, подход «устройство как сервис» [212].

Исполнение указанного программного кода на различных узлах сети требует установки и настройки ряда вспомогательных приложений и программных библиотек. Учитывая требования современных киберфизических систем к ограниченности ресурсов конечных устройств и оперативности развёртывания и запуска сервисов, очевидным решением на сегодняшний день является использование технологии контейнерной виртуализации, то есть метод, при котором ядро операционной системы поддерживает несколько изолированных экземпляров системного окружения для запуска приложений. Эта технология наиболее полно и удобно реализована в платформе Docker [213]. Таким образом, прикладной программный код размещается вместе с исполняющей программной средой в образе виртуальной машины контейнерного типа (docker image). В таком виде программный код готов к запуску на любом узле киберфизической системы, имеющем средства контейнерной виртуализации и достаточные аппаратные ресурсы. Все образы хранятся в одном или нескольких реестрах и могут быть свободно переданы на требуемый аппаратный узел для запуска (см. рисунок 42).



Рисунок 42. Реализация синтезированной технологии на базе контейнерной виртуализации

В предложенном виде процесс управления вычислительными операциями на программном уровне сводится к размещению необходимого программного обеспечения на выбранном устройстве, его запуску, снабжению исходными данными, контролю исполнения и действиям с полученным результатом. Технически управление контейнерами должна осуществлять подсистема, в задачи которой входит: развёртывание контейнеров на физических узлах, запуск и остановка контейнеров, обеспечение их непрерывной доступности, масштабирование (запуск копий контейнеров для распределения нагрузки) и перемещение контейнеров между узлами. Несмотря на то, что у платформы Docker имеется собственное решение Swarm, более функциональным является открытое программное обеспечение Kubernetes.

Подсистемы управления контейнерами успешно решают задачу поддержания работоспособности всех компонент информационной системы. Но современные киберфизические системы от простых локальных вычислительных устройств с датчиками и исполнительными устройствами развились в большие и сложные гетерогенные территориально-распределённые программно-аппаратные комплексы, активно взаимодействующие с физическим миром. Такой облик управляемого объекта требует создания совершенно новых управляющих подсистем. В терминологии туманных вычислений роль управляющей подсистемы играет связующее программное обеспечение (middleware). В его задачи входит управление сетью и взаимодействием сервисов, диспетчеризация и контроль выполнения задач, обеспечение информационной безопасности и т.д.

Однако промежуточное программное обеспечение в большинстве случаев не затрагивает вопросы оркестровки веб-сервисов (другие часто встречающиеся их названия – бизнес-логика, поток данных). То есть, концепт «информационный процесс» отсутствует в связующем программном обеспечении. В данном случае под логикой работы приложения будем понимать последовательность работы вычислительных модулей (выполнения вычислительных операций), приводящую к требуемому результату. В общем случае, главный модуль определяет, какую вычислительную операцию необходимо выполнить и размещает данный запрос в связующем программном обеспечении. Далее, связующее программное обеспечение самостоятельно производит выбор конкретного вычислительного устройства исходя из текущего состояния киберфизической системы и заложенных алгоритмов диспетчеризации. После выбора исполняющего устройства задействуется механизм контейнерной виртуализации, устройство, при необходимости, снабжается требуемым программным обеспечением в виде образа, по которому создаётся контейнер, готовый реализовать заданную вычислительную операцию.

Проведённый анализ результатов имитационного моделирования процесса реализации указанного обобщённого алгоритма показал, что он имеет существенные недостатки при практическом применении. Прежде всего, они связаны с необходимостью передачи образа сервиса и запуска контейнера для каждой операции, что вносит недопустимые задержки в общий вычислительный процесс. Избежать этого можно, если заранее передать образы сервисов на все доступные узлы промышленного интернета. Очевидно, что такое решение приведёт к нехватке места в ограниченной памяти устройств для хранения образов. Указанные проблемы в настоящее время решаются эвристическими методами диспетчеризации выполнения вычислительных операций. То есть, для связующего программного обеспечения все задачи во входном массиве (требующие выполнения) зачастую являются равнозначными и решение о назначении их на вычислительные ресурсы принимается только на основании текущей загруженности ресурсов,

их равномерного использования, технических и стоимостных характеристик, наличия требуемого программного обеспечения (его образа) на узле и т.д. При этом уровень бизнес-логики предприятия оказывается разобщён с уровнем связующего программного обеспечения. Следствием такого подхода является локальное улучшение качества выполнения вычислительных операций без учёта всего информационного процесса в целом. Устранение указанного недостатка связующего программного обеспечения достигается путём внедрения в систему управления киберфизическими системами разработанного АИПК.

На основе проведённого анализа различных вариантов построения КФС, а также проекций концептов логико-динамической модели на элементы инфраструктуры можно сформировать обобщённый образ современной киберфизической системы с туманной архитектурой (см. рисунок 43).

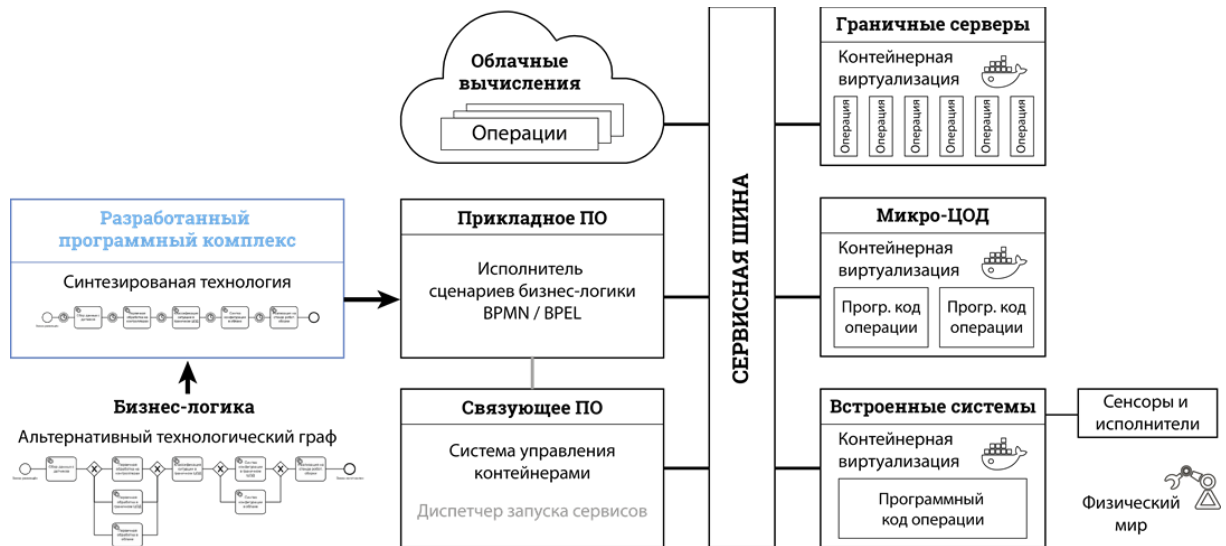


Рисунок 43. Обобщённый образ современной киберфизической системы с туманной архитектурой

Предложенный в настоящей работе подход на основе динамической интерпретации информационных процессов позволяет наилучшим образом с точки зрения заданных критериев качества функционирования всей системы организовать выполнение вычислительных операций в промышленном интернете на основе туманных вычислений. Для применения указанного подхода необходимо, чтобы дополненное связующее программное обеспечение реализовывало следующие основные функции:

1. Синтез технологии реализации вычислительного процесса на основе альтернативного графа операций.
2. Синтез расписаний работы вычислительных операций в привязке к узлам туманных вычислений.
3. Устойчивая реализация построенных расписаний путём событийно-временного управления выполнением вычислительных операций на узлах сети.

Отправной точкой для начала управления киберфизической системой является альтернативный граф операций. Как неоднократно упоминалось выше, промышленный интернет имеет важную особенность с точки зрения решения рассматриваемой задачи, а именно частичную или полную упорядоченность вычислительных операций, входящих в состав информационного процесса предприятия. Туманные вычисления, в свою очередь, позволяют достичь поставленной цели множеством различных способов. Таким образом, оператор, эксперт или технолог должен сформировать граф, содержащий все возможные способы достижения цели (способы реализации информационного процесса, обеспечивающего соответствующую реализацию производственного процесса). Из-за избыточности связей в промышленном интернете, а также множестве различного оборудования, целесообразно для автоматизации ввода исходных данных воспользоваться разработанным для АИПК программным модулем работы с нотацией BPMN. Пример альтернативного графа в нотации BPMN приведён на рисунке 44.

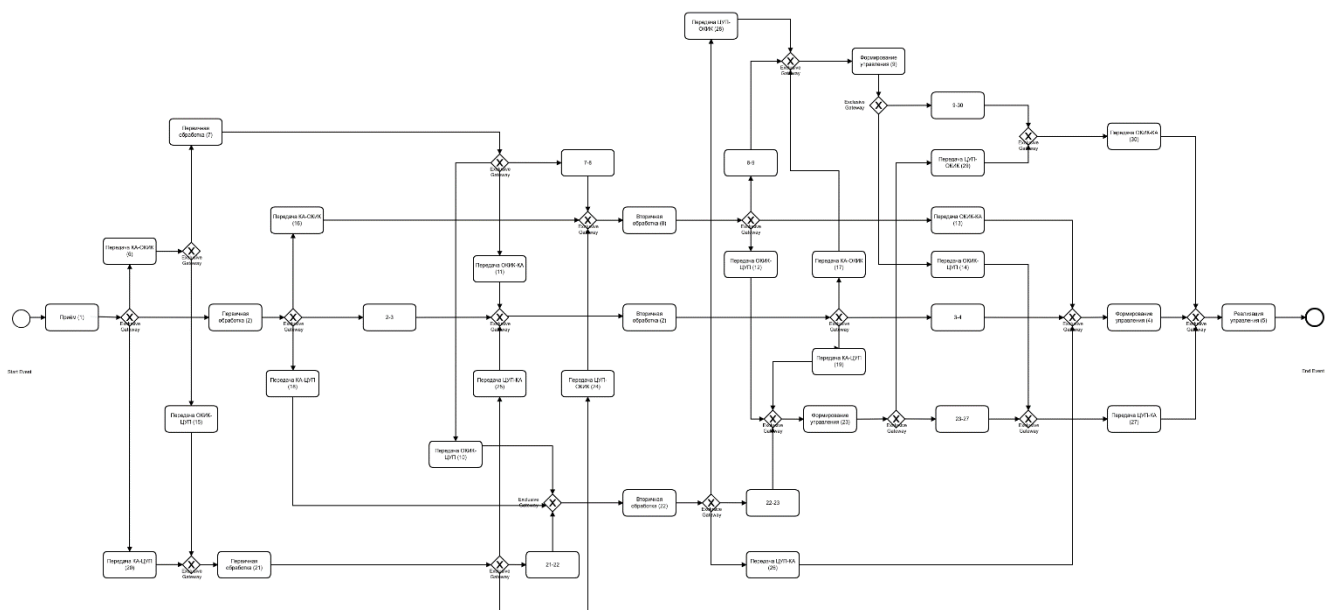


Рисунок 44. Схематичный пример альтернативного графа информационного процесса

Дополнительным источником исходных данных для АИПК служит подсистема управления контейнерной виртуализации, которая предоставляет сведения о доступном оборудовании и его характеристиках.

Имея все необходимые исходные данные, можно на первом шаге предлагаемой процедуры с использованием АИПК осуществить синтез технологии управления киберфизической системой. При этом также формируются соответствующие планы функционирования и распределения ресурсов КФС. Все Парето-оптимальные планы передаются модулю учёта факторов неопределённости для выявления наиболее робастного и устойчивого из них по отношению к заданным сценариям реализации возмущающих воздействий. В результате работы расчётных модулей АИПК формируется наиболее робастный (устойчивый) план функционирования КФС, оптимальный по заданным показателям качества. На следующем шаге требуется реализовать данный план на имеющейся инфраструктуре туманных вычислений.

Как уже было описано выше, за логику работы КФС в промышленном интернете отвечает некий «главный модуль», способы реализации которого отдаются на усмотрение разработчика КФС. Главный недостаток указанного подхода заключается в том, что вся логика работы приложения тесно интегрирована с деталями его технической реализации. Так, технологу (специалисту по управлению производственными процессами) требуются глубокие познания в программировании для проверки и коррекции логики приложения, разработчик же информационной технологии и соответствующего программно-математического обеспечения может случайно или умышленно исказить логику их реализации в угоду некоторым локальным техническим решений. Для преодоления перечисленных и схожих проблем необходимо разделить уровень логики приложения и уровень её технической реализации.

В период стремительного развития веб-сервисов и сервис-ориентированной архитектуры на базе стандартов W3C Web Services предпринимался ряд попыток стандартизации языка описания последовательности вызовов веб-сервисов. Среди них наибольшее внимание могут заслуживать следующие языки.

Язык XLANG, разработанный Microsoft, предназначен для описания последовательных, параллельных и многовариантных потоков работ для BizTalkServer. WSFL (Web Services Flow Language корпорации Microsoft) определяет обмен данными, модель потока и выражение каждого шага потока в виде конкретных операций. WSFL позволяет решать задачи рекурсивной композиции, располагает средствами обработки исключительных ситуаций, но не поддерживает транзакции. Стандарт ebXML, разработанный Центром ООН по содействию торговле и электронному бизнесу (UN/CEFACT), включает схему спецификаций бизнес-процессов Business



Process Specification Schema (BPSS). Протокол BPSS позволяет определять коммуникационные протоколы между веб-сервисами.

Аналогичные разработки велись компанией Hewlett-Packard. В марте 2002 года был разработан стандарт моделирования последовательности взаимодействий веб-сервисов, реализованный в виде языка Web Services Conversation Language (WSCL).

В мае 2003 года Microsoft, IBM, Siebel, BEA Systems и SAP совместно разработали первую версию спецификации языка Business Process Execution Language for Web-Services (BPEL4WS или WS-BPEL) [214]. Указанная спецификация описывает язык, позволяющий моделировать поведение веб-сервисов при взаимодействии бизнес-процессов. Используемый в спецификации данного языка механизм может координировать действия процесса и компенсировать возникающие ошибки. Спецификация поддерживает как структурные действия для управления потоком работ бизнес-процесса в целом, так и базовые действия, которые включают взаимодействия с внешними веб-сервисами. Структурные действия определяют последовательность вызова веб-сервисов, а также поддерживают выполнение циклов и динамическое ветвление. По существу, они составляют основную логику программирования в BPEL. Переменные используются для управления долговременным хранением данных в ходе обработки запросов веб-сервисов.

Основу BPEL составляют три ключевые свойства: асинхронность, координация потоков и управление исключительными ситуациями. За счет разделения запросов на обслуживание и соответствующих им откликов асинхронность повышает масштабируемость и помогает избежать узких мест при выполнении приложения. Координация потоков позволяет взаимодействовать с разнородными синхронными и асинхронными сервисами, а управление исключительными ситуациями обеспечивает работу транзакций благодаря так называемым компенсационным механизмам.

BPEL предоставляет следующие основные языковые конструкции:

- `<invoke>` – вызвать сервис;
- `<receive>` – остановить выполнение программы и ждать вызова от сервиса;
- `<reply>` – ответить на поступивший ранее вызов от удаленного сервиса;
- `<assign>` – присвоить значение переменной, может использоваться выражение на языке XPath, JavaScript, XQuery;
- `<sequence>` – выполнить последовательно;
- `<flow>` – выполнить параллельно;
- `<while>` – выполнить в цикле;

- <pick> – ждать возникновения события: вызова от удаленного сервиса либо срабатывания таймера;
- <scope> – сгруппировать действия;
- <compensate> – выполнить действия при возникновении какой-либо ошибки;
- <switch> – выполнить ветвление в соответствии с логическим условием.

Из приведённого списка видно, что даже перечисленные конструкции позволяют описать достаточно сложную бизнес-логику.

Благодаря множеству удачных решений и качественной программной поддержке языка BPEL долгое время оставался единственным эффективным языком для описания логики работы приложений, основанных на распределённых веб-сервисах. Главным средством исполнения сценариев на языке BPEL является свободно распространяемое программное обеспечение Apache ODE (Orchestration Director Engine). С августа 2019 года проект интерпретатора данного языка официально закрыт, но само приложение и документация останутся доступными.

На смену BPEL пришёл известный и ранее стандарт BPMN (Business Process Model and Notation), но с существенными дополнениями во второй версии. Так, новые разделы стандарта «Process Execution Conformance» («Соответствие требованиям исполнения процесса») и «BPMN Execution Semantics» («Семантика исполнения BPMN») предусматривают необходимый набор элементов для записи исполняемого процесса. Таким образом, BPMN 2.0 удовлетворяет нуждам как проектировщиков бизнес-процессов (технологов), так и разработчиков.

Программное исполнение BPMN 2.0 поддерживается в ряде программных комплексов, среди которых можно отметить свободно распространяемое решение Zeebe – механизм управления потоками данных для оркестровки микросервисов. Недостатком данного решения с точки зрения открытости и соблюдения стандартов является использование собственного протокола обмена данными между приложением и микросервисами.

В целом, основные преимущества применения перечисленных стандартов описания бизнес-процессов для управления вычислительными операциями в промышленном интернете заключаются в том, что рассматриваемое описание логики процесса:

- создаётся с помощью графических редакторов и может быть скорректировано аналитиком или технологом без участия разработчика;
- выносится из программного кода и отделяется от технических деталей его реализации;
- сосредоточено в одном месте информационной системы, а не разбросано по различным подсистемам.

Итак, проведённые исследования стандартов описания логики работы приложения и поддерживающего их существующего программного обеспечения показали, что и на входе, и на выходе АИПК целесообразно использовать один и тот же стандарт BPMN версии 2.0. В этом случае в рамках разработанного в диссертации АИПК происходит преобразование входной расширенной графической нотации BPMN, содержащей альтернативный граф операций в КФС, к выходному XML документу BPMN, содержащему конкретную выбранную технологию и дополненному элементами, позволяющими выполнять запуск конкретных сервисов на основе событийного подхода.

Первый этап преобразования выполняется после синтеза конкретной технологии функционирования КФС из множества альтернатив и заключается в удалении недействующих ветвей альтернативного графа. Второй этап – преобразование расписания функционирования в BPMN нотацию. Для этого перед каждой операцией автоматически формируется элемент для ожидания события таймера, в свойствах которого указывается требуемое время её запуска.

На рисунке 45 приведён пример входного файла BPMN с альтернативным графом, а на рисунке 46 – пример автоматически сгенерированного АИПК выходного исполняемого файла BPMN.

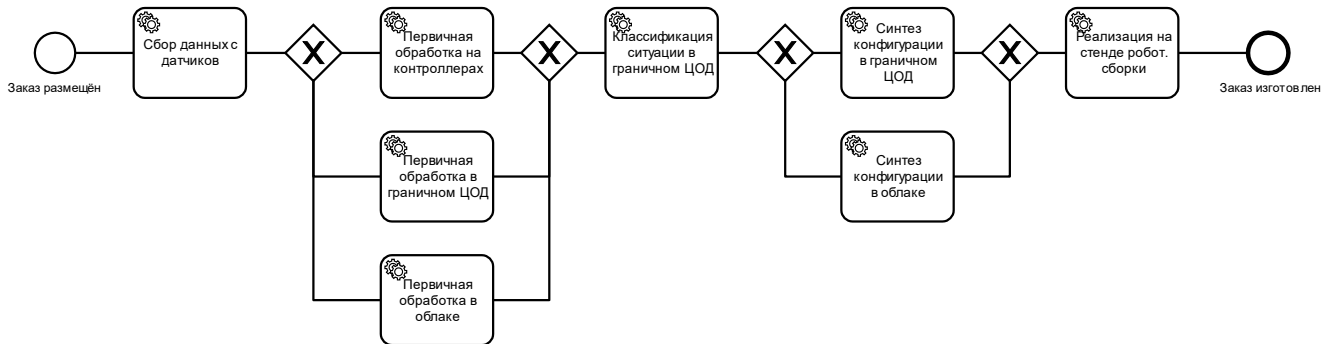


Рисунок 45. Исходный файл BPMN с альтернативным графом работ



Рисунок 46. Автоматически сгенерированный исполняемый файл BPMN

На листинге 7 приведён фрагмент этого же файла в виде XML.

## Листинг 7 – Фрагмент синтезированного исполняемого файла BPMN.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<bpmn:definitions xmlns:bpmn="http://www.omg.org/spec/BPMN/20100524/MODEL">
  <bpmn:process id="Process_1d0i7x7" isExecutable="true">
    <bpmn:startEvent id="StartEvent_1" name="Заказ размещён">
      <bpmn:outgoing>SequenceFlow_041xi8l</bpmn:outgoing>
    </bpmn:startEvent>
    <bpmn:sequenceFlow id="SequenceFlow_4" sourceRef="SE_1" targetRef="ICE_0jkoaj1" />
    <bpmn:serviceTask id="ServiceTask_1mayl2e" name="Сбор данных с датчиков">
      <bpmn:extensionElements>
        <bzeebe:taskDefinition type="data-collection" />
      </bpmn:extensionElements>
      <bpmn:incoming>SequenceFlow_0ipvbtx</bpmn:incoming>
      <bpmn:outgoing>SequenceFlow_0baiqka</bpmn:outgoing>
    </bpmn:serviceTask>
    ...
    <bpmn:intermediateCatchEvent id="IntermediateCatchEvent_0jkoaj1">
      <bpmn:incoming>SequenceFlow_041xi8l</bpmn:incoming>
      <bpmn:outgoing>SequenceFlow_0ipvbtx</bpmn:outgoing>
      <bpmn:timerEventDefinition>
        <bpmn:timeDuration>30</bpmn:timeDuration>
      </bpmn:timerEventDefinition>
    </bpmn:intermediateCatchEvent>
    ...
  </bpmn:process>
</bpmn:definitions>

```

В листинге 7 выделены строки, отвечающие за исполнение внешних веб-сервисов с соблюдением расписания. Данный пример основан на реализации посредством интерпретатора языка BPMN 2.0 – Zeebe. В данном случае расширение «taskDefinition» со значением параметра «type», равным «data-collection», говорит исполнительному механизму о необходимости запуска внешнего сервиса, маркированного ярлыком «data-collection». А элемент «intermediateCatchEvent» типа «timerEventDefinition» откладывает вызов сервиса на время, указанное в параметре «timeDuration».

Совокупность приведённых выше технических приёмов позволяет внедрить разработанный АИПК в существующие КФС в промышленном интернете с туманной архитектурой на уровень связующего программного обеспечения. При этом максимально задействуются существующие стандартизированные технологии, призванные упростить взаимодействие технолога и разработчика.

В то же время следует признать, что на данном этапе развития сервис-ориентированной архитектуры существующие методы оркестровки веб-сервисов перестают соответствовать современному уровню развития в смежных технологиях, таких как контейнерная виртуализация, непрерывные процессы интеграции и внедрения, системы мониторинга и обеспечения работоспособности микросервисов и т.д. Предпринимаются попытки создать новые упрощённые способы записи информационных процессов, развить «интеллектуальность» связующего

программного обеспечения. Можно ожидать, что в ближайшие годы концепция разделения логики работы приложения и её технической реализации получит новое развитие на программном уровне. Но пока не разработано новых стандартов и реализаций, целесообразно использовать существующие программные решения, поддерживающие данный подход, вместо создания частных решений, тесно вплетающих бизнес-логику во множество нюансов её технического исполнения.

#### 4.4. Выводы

1. Проведено количественное оценивание, анализ и выбор базовой архитектуры, создаваемой в рамках диссертационной работы информационной платформы на основе использования комбинированного метода многокритериального принятия решений, в основе которого лежат продукционные модели предпочтений ЛПР для описания простых и сложных опорных ситуаций опроса. При этом обработка сведений, получаемых в ходе данного опроса, проводилась с использованием нечетко-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. В качестве частных показателей качества рассматриваемой архитектуры использовались показатели модульности, допустимой гетерогенности, производительности, многопользовательского режима и масштабируемости. В итоге была обоснованно выбрана сервис-ориентированная архитектура создаваемой в рамках диссертационной работы информационной платформы. Кроме того, благодаря использованному подходу в основу разработанного программного комплекса были положены интеллектуальные информационные технологии, наилучшим образом соответствующие тому перечню прикладных задач, которые планируются решать с использованием данной платформы.

2. Спроектированы и успешно реализованы основные вычислительные компоненты создаваемого программного комплекса, а именно: модуль одновременного синтеза технологии управления КФС, аналитический модуль учёта факторов неопределённости, имитационный модуль синтеза технических характеристик узлов КФС. Выбранные технологии реализации модулей на основе языка программирования Python и ряда других математических библиотек позволили, с одной стороны, использовать при исследовании различных классов прикладных задач современные инструментальные программные средства, обеспечивающие эффективную реализацию разработанных алгоритмов проактивного управления КФС, а, с другой стороны, сосредоточить усилия на научной части работы, а не на технической стороне её реализации.

3. 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.

4. Проведён анализ существующих стандартов описания моделей процессов (бизнес-процессов, бизнес-логики). Определены два стандарта, допустимые к применению в современных информационных условиях – BPEL и BPMN. Предложенное расширение стандарта BPMN новыми сущностями, соответствующими концепциям логико-динамической модели, а также соответствующие разработанные программные модули, предоставляют возможность, находясь в рамках существующих технических стандартов, произвести отдельное конструктивное описание функциональной структуры промышленного интернета и 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.

5. Одиннадцать вспомогательных модулей, разработанных и интегрированных в основной программный комплекс, позволяют рассматривать его как прикладное программное решение, не только способное выполнять исследовательские функции, но и быть встроенным в работу промышленного интернета с туманной архитектурой какого-либо действующего предприятия.

6. С использованием имитационного модуля разработанного программного комплекса продемонстрированы перспективные возможности параметрического синтеза модели туманных вычислений. При этом в примере варьирования значения производительности ресурсов определены диапазоны чувствительности тестовой модели операций в промышленном интернете к их параметрам.

7. Описанным во второй главе диссертации концептам предложенной логико-динамической модели поставлены в соответствие реальные технологические решения, присутствующие в настоящее время в промышленном интернете: контейнерная виртуализация, связующее программное обеспечение, «устройство как сервис». Такое проецирование позволило обоснованно определить место предлагаемого программного комплекса в общей структуре промышленного интернета.

## **5. Математическое и программное обеспечение решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования сложных объектов**

В данной главе диссертации с единых методологических и методических позиций рассматривается разработка и реализация моделей, методов, алгоритмов и программ одновременного решения задач синтеза технологий и планов управления процессами создания и применения сложных технических объектов в динамически изменяющейся обстановке. Под сложными техническими объектами применительно к параграфам 5.1 – 5.3 понимаются объекты, входящие в состав судостроительного предприятия (например, производимые изделия, используемые ресурсы, материальные, энергетические ресурсы), а в рамках параграфа 5.4 под указанными объектами понимаются орбитальные космические и наземные средства.

Таким образом, в данной главе иллюстрируется реализация главного достоинства разработанного во второй и третьей главах модельно-алгоритмического обеспечения управления КФС, которое состоит в том, что с его помощью можно единообразно (с использованием одних и тех же математических структур) формально описать как задачи комплексного моделирования процессов управления КФС, так и задачи планирования их действий, коррекции планов (перепланирования), а также задачи оперативного управления и мониторинга их состояния, обеспечив тем самым корректную межмодельную координацию за счёт использования единого языка описания рассматриваемых процессов с использованием их логико-динамического описания.

### **5.1. Решение задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования судостроительного предприятия**

В качестве основных объектов формализации и автоматизации процессов комплексного моделирования и планирования будут рассматриваться судостроительное предприятие (ССП) и соответствующие производственные процессы (ПрП), состоящие из основных производственных процессов (технологических процессов – (ТП)) и вспомогательных производственных процессов (ВПП).

При этом под судостроительной верфью понимают промышленное предприятие, располагающее средствами производства (средствами труда и предметами труда) и рабочей силой, способными создавать судостроительную продукцию [215].

Судостроительное предприятие состоит из основных и вспомогательных цехов (производств), в которых реализуют, соответственно, основную и вспомогательную части производственного процесса (см. рисунок 47).

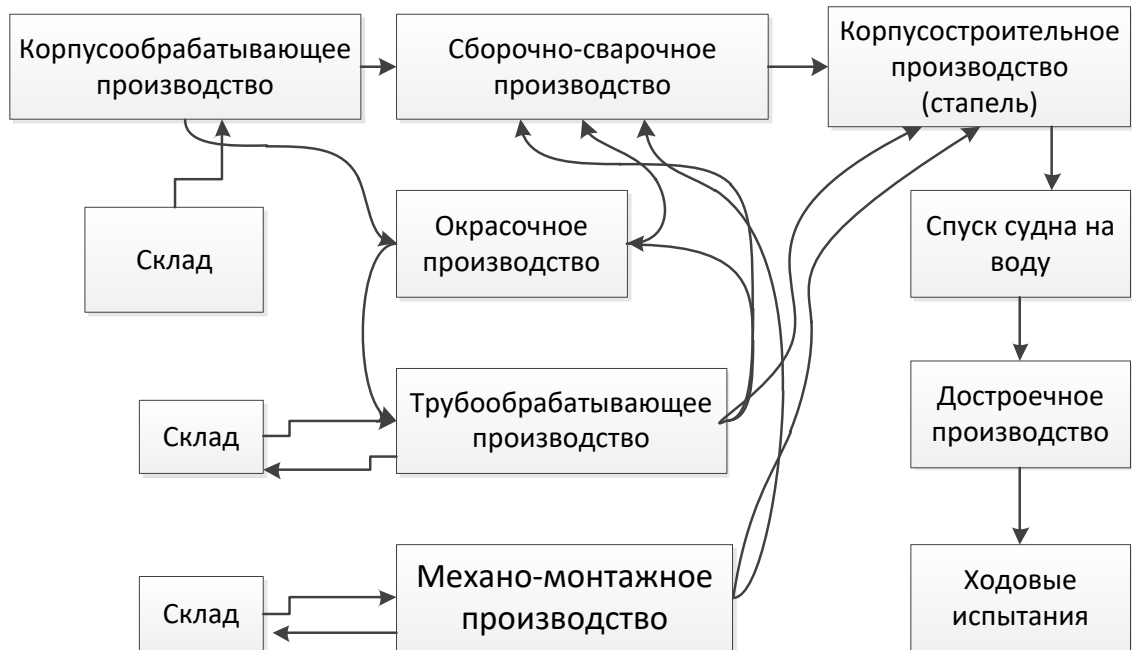


Рисунок 47. Обобщенная производственная структура типового судостроительного предприятия

В состав судостроительного предприятия также входят инженерные службы (конструкторские, технологические, метрологические), службы управления предприятием (планово-диспетчерская, экономические, автоматизации управления и др.) и обслуживания (административно-хозяйственные подразделения) [216, 218]. Формирование видов судостроительного производства производят по общности применяемых методов изготовления изделий. Общий производственный процесс постройки металлического судна состоит из 11 видов судостроительного производства. Их перечень и краткая характеристика входящих в них работ приведены в таблице 7.

Под *производственным циклом* (ПЦ) далее будем понимать период пребывания предметов труда в производственном процессе от начала изготовления до выпуска готовой продукции, т.е. время производства за исключением времени нахождения предметов труда в производственных запасах (на складах, в пути и т.п.).



На рисунке 48, взятом из работы [216], в качестве примера приведена схема взаимосвязи технологий и оборудования, участвующих в изготовлении изделий и реализуемые в рамках корпусообрабатывающего и сборочно-сварочного производств, составляющих основу ССП.

Основу производственного цикла составляет *рабочий период*, т.е. время, в течение которого живой труд (работника) непосредственно воздействует на предмет труда для получения готового продукта. Заметим, что это понятие по своей сути совпадает с данным ранее определением основного производственного (технологического) процесса. Отличие в том, что в определении рабочего периода подчеркнуто, что технологический процесс осуществляют в ходе труда работника.

Основным элементом технологического процесса на ССП является технологическая операция (ТехО), под которой будем понимать законченную часть технологического процесса, выполняемую на одном рабочем месте неизменными исполнителями. В свою очередь, ТехО включает в себя технологические и вспомогательные переходы.

Под *процессом труда* в дальнейшем будем понимать совокупность действий, направленных на целесообразное изменение предметов труда. Технологический и трудовой процессы при воздействии на предмет труда неотделимы друг от друга. Их измеряют затратами труда, т.е. длительностью действий работников. Применительно к технологическому процессу затраты труда измеряют произведением числа основных производственных рабочих на суммарное время их работы. Показатель, характеризующий затраты труда основных производственных рабочих на производство продукции, называют её *технологической трудоемкостью*  $T_T = \text{Ч}_{\text{ор}} t$ , где  $\text{Ч}_{\text{ор}}$  – численность основных производственных рабочих;  $t$  – время их работы.

Таблица 7 – Виды судостроительного производства

Вид производства	Содержание производственного процесса
Корпусообрабатывающее	Изготовление деталей корпуса, начиная от получения и складирования материала до комплектации и складирования готовых деталей
Сборочно-сварочное	Сборка и сварка узлов, секций и блоков секций корпуса судна с их насыщением
Корпусостроительное	Формирование корпуса судна на построечном месте до спуска на воду, включая изготовление блоков судна
Трубообрабатывающее	Изготовление труб, определение конфигурации и предварительный монтаж судовых трубопроводов на судне
Механомонтажное	Сборка агрегатов в цехе, монтаж главных и вспомогательных механизмов, устройств, теплообменных аппаратов, валопроводов, тяжеловесного оборудования, окончательный монтаж и испытание трубопроводов
Электромонтажное	Монтаж кабельных сетей, установка, включение, регулировка и сдача электрооборудования, систем автоматики и специальной техники

Производство изделий корпусодостроечной номенклатуры	Изготовление в цехах судостроительного завода изделий корпусодостроечной номенклатуры
Производство по монтажу слесарно-корпусного насыщения, изготовлению и монтажу труб судовой вентиляции	Монтаж обрешетников, каркасов для формирования помещений, других металлических конструкций (доизоляционных и послеизоляционных), креплений дельных вещей, бытового оборудования и мебели, изготовление и монтаж труб судовой вентиляции
Производство и монтаж изделий отделки и оборудования судовых помещений	Изготовление в цехах судостроительного завода неметаллических и композитных деталей, узлов, предназначенных для оборудования судовых помещений; изготовление и подготовка в цеховых условиях элементов отделки судовых помещений, монтаж деталей и изделий, предназначенных для отделки и оборудования судовых помещений
Производство по изготовлению и монтажу изоляции и лакокрасочным покрытиям	Подготовка поверхности конструкций, изготовление и монтаж изоляции, нанесение антикоррозионных и декоративных покрытий
Производство по испытаниям и сдаче судов	Испытания и сдача судов

При строительстве металлических судов на ССП под длительностью производственного цикла понимают время от момента запуска металла в обработку до передачи готового судна заказчику. В зависимости от сложности судна длительность производственного цикла исчисляется месяцами, а при постройке уникальных судов и военных кораблей превышает год и даже несколько лет. В связи с этим производственный цикл строительства судна разделяют на пять периодов: заготовительный, блочный, стапельный, достроечный и сдаточный.

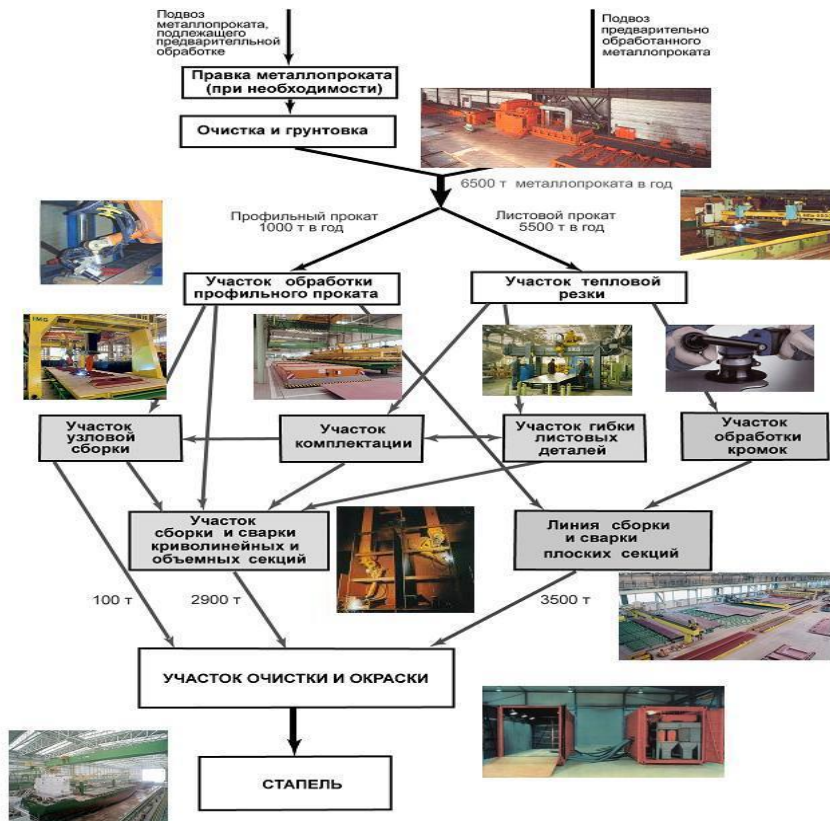


Рисунок 48. Схема функциональных связей корпусообработывающего и сборочно-сварочного производства

*Заготовительный период* – часть производственного цикла постройки судна, включающая время работ, выполняемых от начала обработки металла до начала сборки секций и блоков секций корпуса. При секционном способе формирования корпуса судна, когда отсутствует блочный период, конечным событием заготовительного периода будет начало формирования корпуса судна на построечном месте. В течение заготовительного периода изготавливают детали, узлы и секции корпуса, трубы, элементы системы, устройств, оборудования судовых помещений и т.п. При способе формирования корпуса судна из блоков *блочный период* – часть производственного цикла, включающая время работ, выполняемых от начала сборки блоков секций до начала формирования корпуса судна на построечном месте. В готовых блоках устанавливают механизмы, участки трубопроводов и систем, элементы судовых устройств и др. *Стапельный период* – часть производственного цикла, включающая время работ, выполняемых от начала формирования корпуса на построечном месте до спуска судна на воду. За время стапельного периода формируют корпус судна, испытывают его на непроницаемость, монтируют главные и значительную часть вспомогательных механизмов, валопроводы, системы, устройства, изоляцию и т.п. *Достроечный период* – часть производственного цикла, включающая время работ, выполняемых после спуска судна на воду до начала швартовных испытаний. Во время достроечного периода заканчивают работы по монтажу механизмов, систем, устройств, систем вентиляции и кондиционирования, изоляции, производят работы по оборудованию и отделке судовых помещений. *Сдаточный период* – часть производственного цикла, включающая время работ, выполняемых от начал швартовных испытаний до сдачи готового судна заказчику. В течение сдаточного периода заканчивают работы по оборудованию и отделке судовых помещений, окончательной окраске судна, проводят швартовные и ходовые испытания.

В целом, создание судов на современных ССП, также как и развитие (реконструкция и модернизация) современных и перспективных ССП, как и любых других сложных организационно-технических систем (СОТС), представляет собой сложный многоэтапный процесс, характеризующийся значительными капиталовложениями, длительным сроком внедрения и реализации, а также существенной неопределенностью, связанной с возможными изменениями как целей проектирования и применения, так и воздействий различного рода возмущений внешней среды [215].

Анализ зарубежного и отечественного опыта создания и развития СОТС (к которым, в частности, относятся и различные виды существующих и перспективных ССП) показывает, что данные процессы достаточно продолжительны во времени и сопровождаются наряду с повышением эффективности функционирования ССП (за счет совершенствования процессов управления) расходом различных видов ресурсов (финансовых, материальных, информационных

и т.п.). При этом на практике (особенно в условиях рыночных отношений) имеет место экономическая неравномерность и неравнозначность различных программ выделения денежных средств на проектирование, разработку, эксплуатацию и совершенствование основных элементов и подсистем ССП [217]. В указанной ситуации каждому конкретному варианту создания и применения ССП соответствуют различные соотношения между эффектами и затратами, получаемыми в рамках данных систем в каждый момент времени.

Традиционно перечисленные задачи оценивания, анализа и выбора наиболее предпочтительных производственных планов рассматриваются с различной степенью детализации в рамках как объемного, так календарного планирования деятельности ССП [219]. При этом для конструктивного оценивания эффективности функционирования как существующей (либо модернизируемой) ССП, так собственно производственных процессов, связанных с созданием судов введена соответствующая система (множество) показателей эффективности, включающая:

- показатели результативности деятельности ССП (например, объем выполненных работ и произведенной продукции, показатель продвижения технической готовности судна, количество сданных заказчику судов, количество реконструированного оборудования, показатели производительности труда, показатели качества выполненных работ и произведенной продукции и т.п.);

- временные показатели функционирования ССП (сроки выполнения работ по созданию судов (время производства изделия), длительность производственного цикла, ритм и такт выпуска изделий, сроки проведения реконструкции ССП, время нахождения предметов труда в производственных запасах, длительность перерывов в производственном процессе, вызванные вспомогательными процессами, с режимом работы, межоперационные перерывы и т.п.). К показателям, характеризующим временной аспект существования ССП, можно также отнести показатели, характеризующие длительность реализационного периода ССП (время проектирования и создания) и периода полезной жизни предприятия (время эксплуатации, развития, конверсии и т.п.);

- показатели экономической эффективности и ресурсосберегаемости, среди которых можно, в первую очередь, выделить показатели полных затрат на создание и применение ССП на всех этапах жизненного цикла (капитальные затраты, эксплуатационные затраты, затраты на модернизацию и конверсию), время полной окупаемости системы, показатели расхода (сбережения) ресурсов всех видов, полноты использования на всех этапах жизненного цикла, показатели равномерности использования оборудования, показатели технологической трудоемкости строительства судна, показатели, отражающие временной аспект эффективности

процессов развития, тесно связаны с показателями экономической эффективности. Изменение длительности жизненного цикла (его сокращение или удлинение) влияет на суммарный расход ресурсов. Однако связь между этими группами показателей не является однозначной. В одних случаях удлинение различных этапов жизненного цикла приводит к увеличению расхода ресурсов (например, при длительной эксплуатации морально и физически устаревших подсистем ССП), в других может дать значительную экономию;

– показатели, характеризующие надежность, отказоустойчивость, живучесть, катастрофоустойчивость ССП на различных этапах его существования. К ним, в первую очередь, можно отнести показатели структурной и функциональной надежности, избыточности, показатели гибкости (адаптируемости) структур ССП, показатели сложности данных структур, показатели критичности отказов, показатели доступности технологического оборудования ССП (суммарное время простоев оборудования по любым причинам, показатели, оценивающие риски возникновения и развития аварий и катастроф, показатели, оценивающие последствия аварий и катастроф для конкретных производственных процессов (продолжительность, масштаб и объем ущерба), показатели, оценивающие, общие затраты времени и полноту выполненных операций, связанных с восстановлением работоспособности оборудования ССП, показатели, оценивающие, капитальные и эксплуатационные затраты на обеспечение требуемого уровня катастрофоустойчивости, затраты других видов ресурсов, показатели, оценивающие, степень критичности операций, выполняемых на ССП, значимость ресурсов и информации, используемой для обеспечения требуемого уровня катастрофоустойчивости.

– показатели эффективности управления жизненным циклом ССП. К указанным показателям могут быть отнесены показатели, характеризующие качество реализации основных функций управления развитием ССП (функций целеполагания, планирования, управления, контроля, анализа, координации), показатели, характеризующие оперативность (своевременность) и полноту реализации технологических циклов управления (ТЦУ) соответствующими элементами и подсистемами ССП.

Особенность современных ССП состоит в том, что они в условиях острой конкурентной борьбы за заказы на строительства судов вынуждены периодически проводить реконструкцию и модернизацию оборудования и технологий с целью повышения эффективности производственных процессов. В настоящее время указанная тенденция, связанная с проведением периодической модернизации ПрП, будет только усиливаться. При этом, говоря о научной стороне проблемы реконструкции и модернизации ССП, вызванной повсеместным и широкомасштабным внедрением киберфизических систем (КФС) и технологий промышленного Интернета, следует отметить, что проблема бесшовной модернизации ССП относится к

сложнейшей проблеме многоструктурного синтеза как облика ССП, так и соответствующих ПрП, с учетом динамически изменяющейся обстановки, складывающееся на предприятии и вокруг него. Решение рассматриваемой проблемы предполагает получение ответов на следующие основные вопросы:

- каким должно быть новое ССП;
- к какому сроку должна быть завершена реконструкция (модернизация) ССП;
- какова должна быть технология реконструкции (модернизации) ССП без остановки действующего производства;
- какой должен комплексный план реконструкции (модернизации) ССП;
- как должен быть организован мониторинг процесса реконструкции (модернизации) ССП, а также какие управленческие решения должны приниматься, чтобы обеспечить гарантированное выполнение комплексного плана реконструкции (модернизации) ССП без остановки действующего производства и текущих планов производства судов.

В современных условиях обоснованные и оперативные ответы на перечисленные вопросы можно найти только с использованием интегрированных систем поддержки принятия решений (ИСППР), которые входят в состав существующих и создаваемых автоматизированных систем управления судостроительным предприятием (АСУ ССП).

Важное место в данных ИСППР занимает соответствующее специальное программно-математическое и информационное обеспечение (СПМИО) комплексного моделирования (КМ) и управления сложными объектами (СЛО), о содержании, основных функциях и технологиях создания и применения которых подробно речь шла в 3-й главе диссертации.

Проведенный анализ показал, что предложенное в предыдущих главах специальное модельно-алгоритмическое, программное и информационное обеспечение может широко использоваться в направлении дальнейшей автоматизации и интеллектуализации производственной деятельности на современных и перспективных ССП с целью реализации соответствующих технологий промышленного интернета.

Важнейшую роль в автоматизации процессов управления производственной деятельности играют и будут играть соответствующие модели и полимодельные комплексы (ПМК), составляющие основное ядро (центральную подсистему) СПМИО.

На практике на различных этапах создания, эксплуатации и развития сложных систем (в нашем случае, ССП и соответствующих ТП) при моделировании и комплексном планировании их функционирования преследуются различные цели [220]. Так, например, на этапе обоснования, прогноза целей, стоящих при реконструкции (модернизации) ССП (этап выдачи технического

задания на разработку), моделирование и комплексное планирование функционирования данного объекта должно носить агрегированный (обобщенный) характер и позволять наиболее полно в компактной и наглядной форме представлять как заказчику, так и разработчику информацию о создаваемой системе.

Основная цель исследования и моделирования на данном этапе состоит в оценке и предварительном выборе наилучших вариантов структурного построения ССП (анализ и выбор организационной, технической, технологической структуры ССП, структуры СПМИО).

На этапе эксплуатации ССП моделирование и комплексное планирование его функционирования, прежде всего, состоит в проигрывании, оценивании и анализе возможных ситуаций, которые могут возникнуть в процессе функционирования ССП в различных условиях обстановки. Анализ указанных ситуаций позволяет лицам, принимающим решения (ЛПР), обоснованно подходить к выбору управляющих воздействий, выдаваемых на объект управления в условиях реального масштаба времени. На данном этапе функционирования ССП при моделировании и комплексном планировании процесса его функционирования накладывается жесткое ограничение на время между началом моделирования и получением конечных результатов.

Таким образом, следует строить модель, ориентированную на решение тех вопросов, на которые требуется найти ответ, а не стараться моделировать полностью всю реально существующую (или создаваемую) систему. При этом, приступая к комплексному моделированию и планированию функционирования ССП, каждый раз необходимо сопоставлять возможные затраты материальных средств и времени с теми конечными целями, которые ставятся при моделировании той или иной системы.

Цели комплексного моделирования и комплексного планирования функционирования ССП могут быть сформулированы как качественно, так и количественно. При качественном задании целей комплексного моделирования они обычно формулируются в виде вопросов, на которые надо ответить, гипотез, которые надо проверить, воздействий, которые надо оценить. При количественной формулировке цели моделирования вводится одна или несколько целевых функций, которые точно отображают наиболее существенные факторы, влияющие на достижение целей проводимых исследований. При моделировании сложных объектов (таких как ССП), как правило, выдвигается несколько целей, так как это необходимо для всестороннего и глубокого изучения реально существующих (либо создаваемых) систем. В этом случае для упрощения исследования цели моделирования делят на подцели (задачи), которые, в свою очередь, также декомпозируют и строят дерево целей и задач моделирования.

Так, например, в ряде работ в качестве целей комплексного моделирования и планирования функционирования ССП рассматривались [221-222]:

- обоснование выбора проектантом оптимальной организационно-технологической схемы производства;
- оценивание различных производственных технологий, используемых на ССП;
- уточнение схемы материальных потоков и загрузки оборудования;
- определение необходимого числа и номенклатуры используемого оборудования;
- проверка эффективности совместного функционирования сложного комплекса оборудования, расположенного в цехах ССП;
- проверка выполнимости производственных планов.

Рассматриваемая декомпозиция целей моделирования позволяет провести соответствующую декомпозицию моделей, отражающих различные аспекты структурного построения ССП, процессов её функционирования по уровням иерархии системы управления ССП, контурам управления и этапам управления ПрП. Попутно отметим, что все многообразие целей и задач комплексного моделирования и планирования можно поделить на две большие группы:

- задачи анализа;
- задачи синтеза (выбора).

Практика моделирования и планирования функционирования СЛО показывает, что, несмотря на то, что комплексное моделирование и планирование функционирования каждого конкретного СЛО преследует в каждом конкретном случае свои цели и задачи, все же можно выделить ряд типовых целей и задач комплексного моделирования, которые наиболее часто встречаются при исследовании сложных и больших систем. Среди них можно, прежде всего, выделить следующие цели и задачи комплексного моделирования:

- оценка поведения (процесса функционирования) системы по заданным критериям; получение информации, дополняющей результаты натурных испытаний реальной системы;
- сравнение различных альтернативных вариантов системы и сценариев её функционирования;
- выявление из большого числа факторов (экзогенных переменных), действующих на систему, наиболее существенных;
- проверка аналитических решений;



- предсказание узких мест и других трудностей, появляющихся в поведении системы при введении в нее новых элементов, при изучении новых ситуаций;
- выбор наилучших значений параметров (экзогенных переменных), при которых обеспечивается наилучший отклик всей системы в целом.

В первой главе диссертации уже подчеркивалось, что одна из основных особенностей функционирования СЛО (том числе и ССП, как подкласса СЛО) состоит в том, что на практике наблюдается её структурная динамика, вызываемая различными внешними, внутренними, объективными субъективными причинами и/или их комбинациями. В этих условиях для повышения (сохранения) уровня работоспособности и возможностей ССП, либо обеспечения наилучших условий функционирования при возможной деградации указанных систем необходимо осуществлять проактивное управление их структурами (в том числе управление реконfigurацией структур ССП).

При этом материальной основой, позволяющей реализовать на практике идеи и концепции проактивного управления структурной динамикой ССП, является имеющаяся на указанных предприятиях структурная избыточность, которую можно целенаправленно использовать. В качестве примера такой избыточности на рисунке 49 приведен фрагмент альтернативного графа, задающего многовариантную производственную технологию.

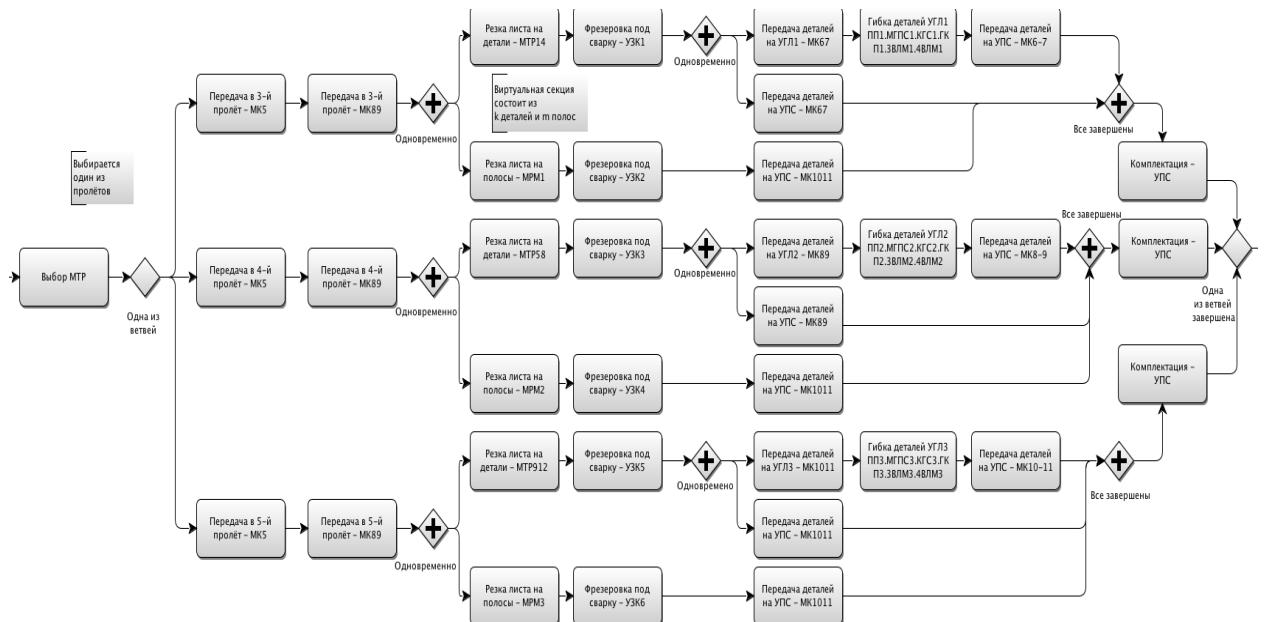


Рисунок 49. Фрагмент альтернативной производственной технологии функционирования корпусообрабатывающего и сборочно-сварочного производства

В этих условиях на ССП появляется возможность в динамически складывающихся условиях на основе данных и информации, поступающих от соответствующих киберфизических систем формировать и реализовывать гибкие ПрП.

Таким образом исследуемые в данной главе задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования судостроительного предприятия можно сформулировать как задачи проактивного управления ПрП ССП.

На содержательном уровне данные задачи (*задачи класса А*) 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 реконструкции, модернизации и технического перевооружения ССП в ходе судов, заданы интервал времени, на котором осуществляется управление структурной динамикой ССП и соответствующая система показателей качества указанного управления.

*Требуется найти* такую последовательность плановых и регулирующих воздействий на параметры, элементы, объекты, подсистемы структуры и в целом ССП, при которой для каждого заданного сценария изменения возмущающих воздействий на ССП обеспечивался оптимальный переход данной системы из текущего в требуемое многоструктурное макросостояние.

Данная задача относится к классу задач динамического многокритериального структурно-функционального синтеза ССП и построения расписания его работы.

Необходимо подчеркнуть, что в начале планового периода для таких СЛО как ССП не ясно хватит ли у него ресурсов на весь плановый период для достижения поставленных заказчиком целей (например, связанных с постройкой нескольких кораблей различных классов). Для этого должны предварительно решаться задачи оценивания и анализа производственного потенциала ССП (его мощностей) – *задачи класса Б*. В терминах задач оптимального управления СЛО данный класс задач относится к классу задач оценивания управляемости ССП. Если решение *задачи класса Б* существует, то имеет смысл приступить к решению *задачи класса А*. Если нет, то руководству ССП необходимо либо запросить у заказчика дополнительных производственных мощностей, взятых, например, у смежных предприятий, либо увеличить плановый период (что, по сути, равносильно выделению дополнительных ресурсов).

Ранее в 3 главе диссертации было показано, что перечисленные задачи класса А и Б могут быть успешно решены на основе разработанного ПМК, базирующегося на созданных логико-динамических моделях и соответствующих методах и алгоритмах динамической оптимизации. Продемонстрируем конструктивность предложенного модельно-алгоритмического обеспечения.

5.1.1. Математическое и программное обеспечение решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования судостроительного предприятия

Для конкретизации и решения рассматриваемой задачи на основе ранее представленного материала (см. 1-4 главы диссертации) проведем её математическое описание. С этой целью введем следующие множества:  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}; A_i \in A, i = 1, \dots, n$  множество создаваемых объектов (например, судов, либо стандартных судостроительных единиц (ССЕ), Имеется множество ресурсов ССП –  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}; B_j \in B, j = 1, \dots, m$ . Имеется множество операций, входящих в производственные процессы и относящиеся к каждому создаваемому объекту  $D^{(i)} = \{D_1^{(i)}, D_2^{(i)}, \dots, D_{S_i}^{(i)}\}; D_\mu^{(i)} \in D^{(i)}$

Для простоты описания предполагается, что в процессе судостроительного производства формируется только один вид материального потока (например, идет постоянная обработка металла – его очищение, изгиб, разрезание, сварка, покраска и т.п.). Его индекс в последующих моделях опущен. Производственные операции связаны друг с другом с использованием логических операций «и», «или», альтернативное «или» (см. рисунок 50). С помощью такого рода операций может быть задана альтернативная технология реализации производственных процессов (см. рисунок 49).

Заданы основные пространственно-временные  $\varepsilon_{ij}(t) \in \{0,1\}$ , технические  $\Theta_{i,jj}(t) \in \{0,1\}$  и технологические ограничения (см. ниже), задан интервал времени, в течение которого собирается судно  $T = (T_0, T_f)$ . Задана система показателей качества производственного плана (ПрП). Необходимо, во-первых, оценить производственный потенциал ССП на заданном интервале времени, и сформировать (оптимизировать) технологию и комплексный план функционирования ССП, а также оценить его робастность.

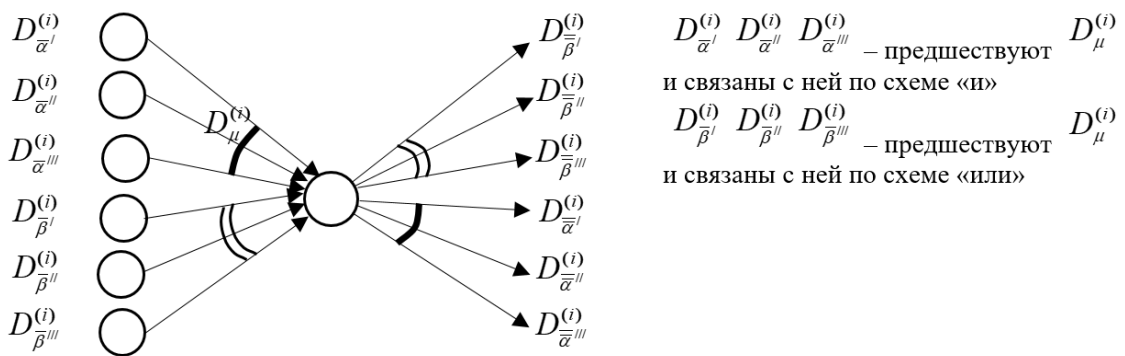


Рисунок 50. Варианты альтернативных дуг графа производственных операций

*Математические модели программного управления производственными процессами*

Перед записью конкретных моделей введем в рассмотрение, следующие переменные, индексы и константы:

$\mathbf{u}(t)$	– вектор оптимального управления;
$u_{ikj}^{(\Pi)}$	– потоковое управление;
$x_{ik}^{(O)}$	– переменная состояния операции $D_{\kappa}^{(i)}$ ;
$x_{ik}^{(\Pi)}$	– переменная состояния потока в операции $D_{\kappa}^{(i)}$ ;
$x_j^{(P)}$	– переменная состояния ресурса $M_j$ (время его работы);
$v, \omega^{(O)}, u^{(B,1)}, u^{(B,2)}, z, h, g, x^{(B,1)}, x^{(B,2)}$	– вспомогательные переменные;
$\sigma_{i\bar{\alpha}}^{(and)}; \sigma_{i\bar{\beta}}^{(or)}; \sigma_{i\bar{\beta}}^{(or)}; \sigma_{i\bar{\alpha}}^{(and)}; \sigma_{i\mu}^{(5,2)}; \sigma_{i\mu}^{(2,1)}$	– коэффициенты сопряжённой системы уравнений;
$\Psi(t)$	– вектор сопряжённых переменных;
(O), (Π), (P)	– индексы отношения к моделям: операций, потоков, ресурсов;
$a_{ik}^{(O)}, a_{ik}^{(\Pi)}$	– плановые значения переменных состояния операции $D_{\kappa}^{(i)}$ ;
$t_0, t_f$	– начальный и конечный моменты времени;
$c_{ikj}^{(\Pi)}$	– предельная интенсивность выполнения операции $D_{\kappa}^{(i)}$ на ресурсе $j$ ;
$\xi(t)$	– вектор возмущающих воздействий;
$\varepsilon(t), \Theta_{i\infty\lambda}(t)$	– заданные временные функции пространственно-временных ограничений.

*Модели программного управления производственными процессами (ПрΠ)*

$$\dot{x}_{i\mu}^{(o)} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) \Theta_{i\mu j}(t) (u_{i\mu j}^{(o)}(t) + w_{i\mu j}^{(o)}(t)) \quad (5.1)$$

$$\dot{x}_{i\mu}^{(n)} = \sum_{j=1}^m u_{i\mu j}^{(n)}(t) \quad (5.2)$$

$$\dot{x}_j^{(p)} = \sum_{i=1}^n \sum_{\mu=1}^{s_i} u_{i\mu j}^{(o)} \quad (5.3)$$

*Модели вспомогательных процессов*

$$\dot{z}_{i\mu j} = u_{i\mu j}^{(o)} + w_{i\mu j}^{(o)}; \dot{h}_{i\mu j} = z_{i\mu j}; \dot{g}_{i\mu j} = v_{i\mu j} \quad (5.4)$$

$$\dot{x}_{i\mu}^{(s,1)} = u_{i\mu}^{(s,1)} \quad (5.5)$$

$$\dot{x}_{i\mu}^{(s,1)} = u_{i\mu}^{(s,2)} \quad (5.6)$$

Ограничения на управляющие воздействия

$$\sum_{j=1}^m u_{i\mu j}^{(n)}(t) \leq 1; \forall i, \forall \mu; \sum_{i=1}^n \sum_{\mu=1}^{s_i} u_{i\mu j}^{(o)}(t) \leq 1 \cdot \xi_j^{(1)}; \forall j \quad (5.7)$$

$$\sum_{j=1}^m u_{i\bar{\alpha}j}^{(o)} \cdot \sum_{\mu \in \Gamma_{i\bar{\alpha}}} x_{i\mu}^{(o)} = 0 \quad (5.8)$$

$$\sum_{j=1}^m u_{i\bar{\beta}j}^{(o)} \cdot \prod_{\mu \in \Gamma_{i\bar{\beta}}} x_{i\mu}^{(o)} = 0 \quad (5.9)$$

$$\sum_{j=1}^m u_{i\bar{\alpha}j}^{(o)} \cdot \sum_{\mu \in \Gamma_{i\bar{\alpha}}} (a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)}) = 0 \quad (5.10)$$

$$\sum_{j=1}^m u_{i\bar{\beta}j}^{(o)} \cdot \prod_{\mu \in \Gamma_{i\bar{\beta}}} (a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)}) = 0 \quad (5.11)$$

Ограничения (5.7) определяют условия одновременности выполнения операции на одном ресурсе и использования нескольких ресурсов для одной операции.

Ограничения (5.8), (5.9) задают логическую связку «и» и «или» операций  $D_{\mu}^{(i)}$  с предшествующими операциями  $D_{\bar{\alpha}}^{(i)}$ ,  $D_{\bar{\beta}}^{(i)}$ .

Ограничения (5.10), (5.11) задают логическую связку «и», «или» операций  $D_{\mu}^{(i)}$  с последующими операциями  $D_{\bar{\alpha}}^{(i)}$ ,  $D_{\bar{\beta}}^{(i)}$ .

$$\sum_{j=1}^m w_{i\mu j}^{(o)} [a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)}] = 0 \quad (5.12)$$

Ограничение (5.12) задает логику срабатывания вспомогательного управляющего воздействия  $w_{i\mu j}^{(o)} \in \{0,1\}$ , которое включается в том случае если  $x_{i\mu}^{(n)} = a_{i\mu}^{(n)}$  в некоторый момент времени  $t$ , а  $x_{i\mu}^{(o)} \neq a_{i\mu}^{(o)}$  (т.е. происходит искусственное прерывание операцией, которая была выполнена с максимальной интенсивностью). Для компенсации таких ситуаций вводится  $w_{i\mu j}^{(o)}$  в дифференциальное уравнение (5.1)

$$w_{i\mu j}^{(o)} \cdot g_{i\mu j} = 0 \quad (5.13)$$

$$x_{i\mu j} [a_{i\mu}^{(o)} - \sum_{j=1}^m z_{i\mu j}] = 0 \quad (5.14)$$

Ограничение (5.13) предназначено для того, чтобы не было перевыполнения операции  $D_{\mu}^{(i)}$ , т.е.  $x_{i\mu}^{(o)}(t_f) = a_{i\mu}^{(o)}$  и  $x_{i\mu}^{(o)}(t_f)$  не может быть больше  $a_{i\mu}^{(o)}$ .

Ограничения (5.14) совместно с ограничениями (5.15) используются для учета прерываний

$$\left[ \sum_{j=1}^m (z_{i\mu j} \cdot g_{i\mu j} + \frac{(a_{i\mu})^2}{2} - h_{i\mu j})^2 \cdot z_{i\mu j}^2 \right] \Big|_{t=t_f} = 0 \quad (5.15)$$

Подробно как учитывать ограничения на непрерывность выполнения операций написано в работе [223].

$$0 \leq u_{i\mu j}^{(n)} \leq c_{i\mu j}^{(n)} \cdot u_{i\mu j}^{(o)}(t) \cdot \xi_j^{(2)}(t) \quad (5.16)$$

Ограничения, связанные с учетом интенсивности выполнения операции  $D_\mu^{(i)}$ ,  $c_{i\mu j}^{(n)}$  – заданная константа

$$u_{i\mu}^{(6,1)} \cdot x_{i\mu}^{(6,2)} = 0 \quad (5.17)$$

$$u_{i\mu}^{(6,2)} [a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)}] = 0 \quad (5.18)$$

Ограничения (5.17), (5.18) вводятся для того, чтобы подсчитывать в  $t = t_f$  количество созданных объектов  $A_i$ , выполненных операций  $D_\mu^{(i)}$

$$0 \leq \xi_j^{(1)}(t) \leq 1 \quad (5.19)$$

$$0 \leq \xi_j^{(2)}(t) \leq 1 \quad (5.20)$$

(5.19) и (5.20) задают области изменения возмущающих воздействий при расчете показателей робастности планов управления информационными процессами.

$$u_{i\mu j}^{(o)}(t), w_{i\mu j}^{(o)}(t), v_{i\mu j}(t), u_{i\mu}^{(6,1)}(t), w_{i\mu}^{(6,2)}(t) \in \{0,1\}$$

*Краевые условия*

$$t = t_o : x_{i\mu}^{(o)}(t_o) = x_{i\mu}^{(n)}(t_o) = x_j^{(p)}(t_o) = z_{i\mu j}(t_o) = u_{i\mu j}(t_o) = g_{i\mu j}(t_o) = 0 \\ x_{i\mu}^{(6,1)}(t_o) = 0; x_{i\mu}^{(6,2)}(t_o) = 0 \quad (5.21)$$

$$t = t_f : x_{i\mu}^{(o)}(t_f) = a_{i\mu}^{(o)}; x_{i\mu}^{(n)}(t_f) = a_{i\mu}^{(n)} \\ x_i^{(n)}(t_f), z_{i\mu j}(t_f), h_{i\mu j}(t_f), g_{i\mu j}(t_f), x_{i\mu}^{(6,1)}(t_f), x_{i\mu}^{(6,2)}(t_f) \in \mathbb{R}^1, \mathbb{R}^1 \\ \in [0, \dots, \infty) \quad (5.22)$$

*Показатели качества программного управления производственными процессами*

$$J_1^{(o)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\mu=1}^{s_i} (a_{i\mu}^{(o)} - x_{i\mu}^{(o)})^2 \Big|_{t=t_f} \quad (5.23)$$

$$J_2^{(n)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\mu=1}^{s_i} (a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)})^2 \Big|_{t=t_f} \quad (5.24)$$

$$J_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{\mu=1}^{s_i} \int_{t_o}^{t_f} \eta_{i\mu}(\tau) \cdot x_{i\mu j}^{(o)}(\tau) d\tau \quad (5.25)$$

$$J_4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{\mu=1}^{s_i} \int_{t_o}^{t_f} q_{i\mu}(\tau) \cdot u_{i\mu j}^{(o)}(\tau) d\tau \quad (5.26)$$

$$J_5 = \sum_{j=1}^m (\tilde{t}_f - x_j^{(p)}(t_f))^2, \tilde{t}_f = t_f + \Delta; \Delta \gg t_f \quad (5.27)$$

$$J_6 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\mu=1}^{s_i} \left[ (a_{i\mu}^{(o)} - \sum_{j=1}^m z_{i\mu j})^2 + \sum_{j=1}^m (z_{i\mu j} g_{i\mu j} + \frac{(a_{i\mu})^2}{2} - h_{i\mu j})^2 z_{i\mu j}^2 \right]_{t=t_f} \quad (5.28)$$

$$J_7 = \sum_{i=1}^n \frac{x_{is}^{(6,2)}(t_f)}{t_f - x_{is}^{(6,1)}(t_f)} \quad (5.29)$$

$$J_8^{(i)} = \sum_{\mu=1}^{s_i} \frac{x_{i\mu}^{(6,2)}(t_f)}{t_f - x_{i\mu}^{(6,1)}(t_f)} \quad (5.30)$$

$$J_9 = (J_1^{(min)} - J_1^{(\xi)})(J_2^{(min)} - J_2^{(\xi)}) \quad (5.31)$$

(5.23), (5.24) – показатели, оценивающие полноту выполнения операций и потока; (5.25), (5.28) – качество и штрафы при выполнении операций, (5.27) – равномерность использования ресурсов (5.28) – учет прерываний; (5.29) – показатель, позволяющий подсчитать число завершенных объектов на момент времени  $t = t_f$ , (5.30) – число выполненных операций  $D_\mu^{(i)}$  при создании объекта  $A_i$ , (5.31) – показатель, используемый при подсчете робастности.

Как это уже было показано в 3 главе диссертации, предложенное полимодельное описание ПрП ССП (5.1) – (5.22) может быть представлено в обобщенном виде, представленном ранее в работе [46]:

$$M = \{\mathbf{u}(t) | \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t); \mathbf{h}_0(\mathbf{x}(T_0)) \leq \mathbf{0}, \mathbf{h}_1(\mathbf{x}(T_f)) \geq \mathbf{0}; \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0}\}, \quad (5.32)$$

где  $\mathbf{x}, \mathbf{u}$  – обобщённые векторы состояния и управления элементами и подсистемами ССП, компонентами которых являются переменные, входящие в дифференциальные уравнения, описывающие процессы программного управления движением, каналами, операциями, ресурсами, потоками, параметрами операций, структурами, вспомогательными операциями;  $\mathbf{h}_0, \mathbf{h}_1$  – известные вектор–функции, с помощью которых задаются краевые условия для вектора  $\bar{\mathbf{x}}$  в моменты времени  $t = T_0$  и  $t = T_f$ ;  $\mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0}$  – векторные функции, с помощью которых задают основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, накладываемые на процессы функционирования элементов и подсистем ССП [46].

При этом будем также предполагать, что, используя известные способы скаляризации векторного показателя качества планирования ПрП ССП  $\mathbf{J}_\theta$ , в состав которого входят перечисленные выше показатели (5.23) – (5.31) удалось его представить в скалярной форме  $J_{ob}$ . В данной главе скаляризация будет проведена за счет лексикографического упорядочения показателей качества планирования ПрП вида (5.23), (5.24), (5.27), (5.31). Можно показать, что указанному варианту упорядочения показателей соответствуют определенные коэффициенты важности  $\lambda_i \geq 0$  в соответствующей свертке показателей качества следующего вида:

$$I_{об} = \sum_{i=1}^{I_M} J_i \lambda_i \quad (5.33)$$

$$\lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^{I_M} \lambda_i = 1. \quad (5.34)$$

Для дальнейшего решения сформулированных в параграфе 5.1 задач введем функцию Гамильтона (Гамильтониан), сопряженную систему, а также условия трансверсальности.

*Гамильтониан*

$$H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\Psi}(t)) = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 + H_7$$

$$H_1 = \sum_i \sum_j \sum_\mu [\psi_{i\mu}^{(o)} \varepsilon_{ij} \theta_{i\mu j} + \psi_j^{(p)} + \phi_{i\mu j}^{(1)} + \eta_{i\mu} - q_{i\mu}] \cdot u_{i\mu}^{(o)} \quad (5.35)$$



$$H_2 = \sum_i \sum_\mu \sum_j [\psi_{i\mu}^{(n)}] \cdot u_{i\mu}^{(n)} \quad (5.36)$$

$$H_3 = \sum_i \sum_\mu \sum_j [\phi_{i\mu j}^{(1)} + \psi_{i\mu}^{(o)} \cdot \varepsilon_{ij} \theta_{i\mu j}] \cdot w_{i\mu j}^{(o)} \quad (5.37)$$

$$H_4 = \sum_i \sum_\mu \sum_j \phi_{i\mu j}^{(2)} \cdot z_{i\mu j} \quad (5.38)$$

$$H_5 = \sum_i \sum_\mu \sum_j \phi_{i\mu j}^{(3)} \cdot v_{i\mu j} \quad (5.39)$$

$$H_6 = \sum_i \sum_\mu p_{i\mu}^{(6,1)} \cdot u_{i\mu}^{(6,1)} \quad (5.40)$$

$$H_7 = \sum_i \sum_\mu p_{i\mu}^{(6,2)} \cdot u_{i\mu}^{(6,2)} \quad (5.41)$$

Поставим в соответствие компонентам вектора основной системы уравнений (5.1) – (5.6) компоненты сопряженной системы уравнений (5.42) – (5.49)

$$\mathbf{x} = \left\| x_{i\mu}^{(o)} x_{i\mu}^{(n)} x_j^{(p)} z_{i\mu j} h_{i\mu j} g_{i\mu j} x_{i\mu}^{(B,1)} x_{i\mu}^{(B,2)} \right\|^T,$$

$$\Psi = \left\| \psi_{i\mu}^{(o)} \psi_{i\mu}^{(n)} \psi_j^{(p)} \phi_{i\mu j}^{(1)} \phi_{i\mu j}^{(2)} \phi_{i\mu j}^{(3)} p_{i\mu}^{(B,1)} p_{i\mu}^{(B,2)} \right\|^T.$$

*Сопряженная система уравнений*

$$\dot{\psi}_{i\mu}^{(o)} = - \sum_{\bar{\alpha} \in \Gamma_{i\mu}^-} \sigma_{i\bar{\alpha}}^{(u)} \cdot \sum_{j=1}^m u_{i\bar{\alpha}j}^{(o)} - \sum_{\bar{\beta} \in \Gamma_{i\mu}^-} \sigma_{i\bar{\beta}}^{(uu)} \cdot \sum_{j=1}^m u_{i\bar{\beta}j}^{(o)} \cdot \prod_{\substack{\delta \in \Gamma_{i\bar{\beta}}^+ \\ \delta \neq \mu}} x_{i\delta}^{(o)} \quad (5.42)$$

$$\dot{\psi}_{i\mu}^{(n)} = - \sum_{\bar{\alpha} \in \Gamma_{i\mu}^+} \sigma_{i\bar{\alpha}}^{(u)} \cdot \sum_{j=1}^m u_{i\bar{\alpha}j}^{(o)} - \sum_{\bar{\beta} \in \Gamma_{i\mu}^+} \sigma_{i\bar{\beta}}^{(uu)} \cdot \sum_{j=1}^m u_{i\bar{\beta}j}^{(o)} \cdot \prod_{\substack{\gamma \in \Gamma_{i\bar{\beta}}^- \\ \gamma \neq \mu}} (a_{i\gamma}^{(n)} - x_{i\gamma}^{(n)}) - \sigma_{i\mu}^{(2,1)} \cdot \sum_{j=1}^m w_{i\mu j}^{(o)} - \sigma_{i\mu}^{(5,2)} \cdot u_{i\mu}^{(6,2)} \quad (5.43)$$

$$\dot{\psi}_o^{(p)} = 0 \quad (5.44)$$

$$\dot{\phi}_{i\mu j}^{(1)} = -\phi_{i\mu j}^{(2)} - \sigma_{i\mu j}^{(4,1)} v_{i\mu j} \quad (5.45)$$

$$\dot{\phi}_{i\mu j}^{(2)} = 0 \quad (5.46)$$

$$\dot{\psi}_{i\mu j}^{(3)} = -\sigma_{i\mu}^{(2,1)} \cdot w_{i\mu j}^{(o)} \quad (5.47)$$

$$\dot{p}_{i\mu}^{(6,1)} = 0 \quad (5.48)$$

$$\dot{p}_{i\mu}^{(6,2)} = 0 \quad (5.49)$$

$$\sigma_{i\bar{\alpha}}^{(u)} = \frac{[\psi_{i\bar{\alpha}}^{(o)} \varepsilon_{ij} \Theta_{i\bar{\alpha}j} + \psi_j^{(p)} + \varphi_{i\bar{\alpha}j}^{(1)} + \eta_{i\bar{\alpha}} - q_{i\bar{\alpha}}] + \sigma_{i\bar{\alpha}j}^{(3,1)} \cdot c_{i\bar{\alpha}j}^{(n)}}{[1 - \sum_{\mu \in \Gamma_{i\bar{\alpha}}^+} x_{i\mu}^{(o)}]}$$

$$\sigma_{i\bar{\beta}}^{(umu)} = \frac{[\psi_{i\bar{\beta}}^{(o)} \varepsilon_{ij} \Theta_{i\bar{\beta}j} + \psi_j^{(p)} + \varphi_{i\bar{\beta}j}^{(1)} + \eta_{i\bar{\beta}} - q_{i\bar{\beta}}] + \sigma_{i\bar{\beta}j}^{(3,1)} \cdot c_{i\bar{\beta}j}^{(n)}}{[1 - \prod_{\mu \in \Gamma_{i\bar{\beta}}^+} x_{i\mu}^{(o)}]}$$

$$\sigma_{i\bar{\alpha}}^{(u)} = \frac{[\psi_{i\bar{\alpha}}^{(o)} \varepsilon_{ij} \Theta_{i\bar{\alpha}j} + \psi_j^{(p)} + \varphi_{i\bar{\alpha}j}^{(1)} + \eta_{i\bar{\alpha}} - q_{i\bar{\alpha}}] + \sigma_{i\bar{\alpha}j}^{(3,1)} \cdot c_{i\bar{\alpha}j}^{(n)}}{[1 + \sum_{\mu \in \Gamma_{i\bar{\alpha}}^+} (a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)})]}$$

$$\sigma_{i\bar{\beta}}^{(umu)} = \frac{[\psi_{i\bar{\beta}}^{(o)} \varepsilon_{ij} \Theta_{i\bar{\beta}j} + \psi_j^{(p)} + \varphi_{i\bar{\beta}j}^{(1)} + \eta_{i\bar{\beta}} - q_{i\bar{\beta}}] + \sigma_{i\bar{\beta}j}^{(3,1)} \cdot c_{i\bar{\beta}j}^{(n)}}{[1 + \prod_{\mu \in \Gamma_{i\bar{\beta}}^+} (a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)})]}$$

$$\sigma_{i\mu}^{(2,1)} = \frac{\psi_{i\mu}^{(o)} \varepsilon_{ij} \Theta_{i\mu j} + \varphi_{i\mu j}^{(1)}}{[(a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)}) - g_{i\mu j} + 1]}$$

$$\sigma_{i\mu j}^{(3,1)} = \psi_{i\mu}^{(n)}, \text{ если } \rho_{i\mu}^{(3,1)} = 0, \rho_{i\mu}^{(3,2)} < 0$$

$$\sigma_{i\mu j}^{(3,1)} = -\psi_{i\mu}^{(n)}, \text{ если } \rho_{i\mu}^{(3,1)} < 0, \rho_{i\mu}^{(3,2)} = 0$$

$$\rho_{i\mu}^{(3,1)} = u_{i\mu j}^{(n)} - c_{i\mu j}^{(n)} \cdot u_{i\mu j}^{(n)} \leq 0$$

$$\rho_{i\mu}^{(3,2)} = -u_{i\mu j}^{(n)}(t) \leq 0$$

$$\sigma_{i\mu j}^{(4,1)} = \frac{\varphi_{i\mu j}}{1 + [a_{i\mu}^{(o)} - \sum_{j=1}^m z_{i\mu j}]}$$

$$\sigma_{i\mu}^{(5,1)} = \frac{p_{i\mu}^{(s,1)}}{1 - x_{i\mu}^{(s,2)}}$$

$$\sigma_{i\mu}^{(5,2)} = \frac{p_{i\mu}^{(s,2)}}{1 + (a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)})}$$

Условия трансверсальности

$$\psi_{i\mu}^{(o)}(t_f) = -(a_{i\mu}^{(o)} - x_{i\mu}^{(o)}) \Big|_{t=t_f} \quad (5.50)$$

$$\psi_{i\mu}^{(n)}(t_f) = (a_{i\mu}^{(n)} - x_{i\mu}^{(n)}) \Big|_{t=t_f} \quad (5.51)$$

$$\psi_j^{(p)}(t_f) = (\tilde{t}_f - x_j^{(p)}(t_f)) \quad (5.52)$$

$$\varphi_{i\mu j}^{(1)}(t_f) = (a_{i\mu}^{(o)} - \sum_{j=1}^m z_{i\mu j}) \Big|_{t=t_f} + (z_{i\mu j} g_{i\mu j} + \frac{(a_{i\mu}^{(o)})^2}{2} - h_{i\mu j}) z_{i\mu j}^2 + (z_{i\mu j} g_{i\mu j} + \frac{(a_{i\mu}^{(o)})^2}{2} - h_{i\mu j})^2 z_{i\mu j} \quad (5.53)$$

$$\varphi_{i\mu j}^{(2)}(t_f) = z_{i\mu j}^2 (z_{i\mu j} g_{i\mu j} + \frac{(a_{i\mu}^{(o)})^2}{2} - h_{i\mu j}) \quad (5.54)$$

$$\varphi_{i\mu j}^{(3)}(t_f) = -z_{i\mu j}^2 (z_{i\mu j} g_{i\mu j} + \frac{(a_{i\mu}^{(o)})^2}{2} - h_{i\mu j}) \quad (5.55)$$

$$p_{i\mu}^{(e,1)}(t_f) = + \frac{x_{is}^{(e,1)}(t_f)}{[t_f - x_{is}^{(e,1)}(t_f)]^2} \quad (5.56)$$

$$p_{i\mu}^{(e,2)}(t_f) = - \frac{1}{[t_f - x_{i\mu}]^2} \quad (5.57)$$

### 5.1.2. Методы и алгоритмы оценивания производственного потенциала ССП, а также синтеза технологий и комплексных планов функционирования ССП

Важную роль при решении задач управления структурной динамикой (УСД) ССП играет оценка потенциальной способности ССП реализовать поставленные производственные планы по строительству судов (задача оценивания производственного потенциала – задача класса Б (см. параграф 5.1). Далее будем ориентироваться на подходы к решению аналогичных задач, приведённых в работах [3, 124, 126, 141].

Конструктивно задачу расчёта, оценки и анализа возможностей ССП по выполнению производственных планов (ПрП) можно решать, используя ранее построенные динамические модели УСД ССП (модели, входящие в состав  $M$  – см. выражение (5.32)), которые формально представляют собой нестационарные детерминированные конечномерные дифференциальные динамические системы (НКДДС) с перестраиваемой структурой. В этом случае задача оценки выполнимости ПрП может быть интерпретирована как задача оценивания управляемости рассматриваемой НКДДС, построения соответствующего множества (области) достижимости  $D(t, t_0, \mathbf{x}(t_0))$ , которое является фундаментальной характеристикой указанной динамической системы. Знание данного множества, по существу, заменяет собой всю необходимую для решения задач управления ССП информацию о динамике системы (5.1) – (5.6), её основных ограничениях. В этом случае значения показателей выполнимости ПрП ССП получаются в результате проектирования множества достижимости динамической модели УСД ССП (модели  $M$ ) и её частных вариантов на соответствующие оси декартовой (полярной) системы координат в пространстве состояний (в общем случае, многоструктурных макросостояний), либо в пространстве целевых (критериальных) функций (в пространстве выходов динамической модели  $M$ ). Располагая множеством достижимости, можно проанализировать как зависит разрешимость поставленных ранее краевых задач, к которым были сведены задачи УСД ССП, от структуры и свойств множества начальных состояний  $X_0$ , конечных состояний  $X_f$  ( $\mathbf{x}(t_0) \in X_0$ ,  $\mathbf{x}(t_f) \in X_f$ ) динамической системы (5.1) – (5.6), от интервалов времени, на котором происходит управление, от состава и структуры пространственно-временных, технических и технологических ограничений. Кроме того, в этом случае исходные задачи УСД ССП могут быть сформулированы

в другом виде, а именно, как задачи отыскания минимума заданной функции по соответствующему множеству достижимости

$$J'_{ог}(\mathbf{x}(\cdot)) \rightarrow \min_{\mathbf{x}(\cdot) \in D_i(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))}, \quad (5.58)$$

где  $D_i(t_f, t_0, \mathbf{x}(t_0))$  – множество достижимости динамической системы (модели)  $M_i$  ( $i = 1, 2, 3$  – номера уровней агрегирования обобщенной модели  $M$ ). Подробно о вариантах представления данных моделей написано в работах [221, 222, 224];  $J'_{ог}(\mathbf{x}(\cdot))$  – преобразованный к терминальному виду (виду функционала Майера) исходный функционал (5.33).

При этом необходимо подчеркнуть, что при изменении вида функции  $J'_{ог}(\mathbf{x}(\cdot))$  не требуется повторный расчёт множества достижимости  $D(t, t_0, \mathbf{x}(t_0))$ . В указанной ситуации следует просто заново решить задачу нелинейного программирования (5.58). Таким образом, множества достижимости для динамических моделей (5.1) – (5.6) позволяет существенно сократить затраты времени и повысить оперативность решения задач ССП при различных показателях качества УСД ССП. Необходимо отметить, что для задач УСД ССП большой размерности построение множеств (областей) достижимости представляет собой исключительно сложную проблему. Поэтому на практике при решении указанной проблемы проводят различного рода упрощения, связанные с аппроксимацией множеств  $D(t, t_0, \mathbf{x}(t_0))$  [224].

Говоря о методе и алгоритме решения задач синтеза технологии и комплексного плана функционирования ССП (задача класса А, см. параграф 5.1 данной главы) необходимо указать на то, что в их основу был положен методический аппарат, описанный в параграфе 3.2 данной диссертации, базирующийся на комбинированном использовании методов последовательных приближений и ветвей и границ.

В этом случае основные этапы реализации разработанного комбинированного метода и алгоритма в себя следующие шаги:

**Шаг 1.** Задаётся диспетчерское решение, представляющее собой некоторую фиксированную производственную технологию, а также распределение технологических операций постройки судна по доступным ресурсам ССП предприятия по принципу «первый пришёл – первый обслуживается»;

**Шаг 2.** Интегрируется основная система рекуррентных уравнений, описывающая процесс выполнения технологических операций с заданными начальными условиями (5.1) – (5.6). В результате интегрирования рассчитываются предварительные показатели качества производственного плана: полнота выполнения технологических операций создания сборочных единиц; суммарное нарушение директивных сроков реализации плана; равномерность загрузки оборудования судостроительного предприятия (см. (5.23) – (5.31)). Кроме того,

вычисляются условия трансверсальности, с помощью которых фиксируются вклады каждой операции и каждого ресурса в изменение показателей качества производственного плана (5.50) – (5.57);

**Шаг 3.** Интегрируется сопряжённая система рекуррентных уравнений (5.42) – (5.49) с рассчитанными на предыдущем шаге начальными условиями от конечного момента времени (времени окончания строительства судна) к начальному моменту времени (время начала выполнения производственного плана). В итоге в начальный момент времени формируется первое приближение динамических приоритетов технологических операций, входящих в ПрП. Указанные динамические приоритеты аккумулируют сведения о ходе выполнения каждой операции на предыдущем шаге реализации алгоритма (технологии) моделирования;

**Шаг 4.** Начиная с начального момента времени выполняется итерационный синтез технологий ПрП, а также распределение технологических операций по оборудованию судостроительного предприятия. При рассматриваемом синтезе и распределении учитываются полученные на предыдущем шаге динамические приоритеты. Решение в каждый момент времени ряда оптимизационных задач (задач линейного программирования, задач о назначениях) для конкурирующих операций позволяет формировать оптимистическую оценку производственного плана. Рассчитываются итоговые показатели качества производственного плана.

В случае прерывания технологических операций, осуществляется реализация ликвидации прерываний, описанная в параграфе 3.2.

В качестве исходных данных для разработанного модельно-алгоритмического обеспечения использовались следующая информация:

- описание вариантов производственных программ и технологий их реализующих:
  - а) сроки реализации производственной программы в целом;
  - б) перечень типов изделий, подлежащих постройке;
  - в) планируемые сроки постройки каждого изделия;
  - г) приоритетность каждого изделия.
- для каждого типа изделия:
  - а) перечень сборочных единиц изделия (разбивки);
  - б) перечень операций по созданию типовых сборочных единиц и их взаимосвязи;
  - в) длительность выполнения каждой операции и возможные отклонения;
  - г) технологические ограничения: перечень оборудования, на котором может выполняться конкретная операция;

- д) перечень оборудования и его характеристики (время выполнения каждой допустимой операции);
- е) возможные (прогнозируемые) сценарии снижения производительности оборудования, вызываемые внешними, внутренними, объективными, субъективными причинами.

Состав выходных данных для пессимистической и оптимистической оценки выполнимости производственной программы:

- показатель выполнимости производственного плана ССП (в процентах от директивно заданного значения);
- набор частных показателей качества реализации производственных планов для оптимистических и пессимистических сценариев изменения внешней и внутренней обстановок на ССП:
  - а) показатель полноты выполнения технологических операций создания сборочных единиц;
  - б) суммарное время нарушения директивных сроков выполнения операций, входящих в производственный план;
  - в) показатель равномерности загрузки однотипного оборудования судостроительного предприятия.
- общее время выполнения производственного плана, а также конкретные интервалы времени и доля загрузки каждой единицы оборудования предприятия.

Приведённые выше частные показатели имеют следующую интерпретацию:

- значение показателя полноты выполнения операций рассчитывается как суммарная длительность операций, которые не были выполнены до конца интервала планирования. Показатель необходимо минимизировать, но допускается его отличие от нуля даже при полном выполнении плана, так как существуют альтернативные ветви технологического процесса, которые не будут выполнены. Определяющим является не его абсолютное значение, а сравнение значений показателя нескольких производственных планов (в том числе с эталонным (оптимальным) планом);
- показатель суммарного времени нарушения директивных сроков выполнения операций, входящих в производственный план, равен сумме длительностей той части операций, которая была выполнена после окончания, установленного для каждой из них директивного срока. Значение показателя рассчитывается как сумма интегралов монотонно возрастающих штрафных функций для всех операций, выполняющихся

после директивного срока. То есть, значение «штрафа» для каждой операции начинает нарастать в каждый момент времени, следующий за окончанием директивного срока выполнения этой операции. Так как вид функции задаётся экспертом-оператором, то численные значения данного показателя имеет смысл интерпретировать только при сравнении различных производственных планов. Показатель необходимо минимизировать;

- значение показателя равномерности загруженности ресурсов ССП соответствует величине суммы разности квадратов времен задействия всевозможных сочетаний пар однотипного оборудования. Например, если  $t_a$ ,  $t_b$  и  $t_c$  – время задействия соответствующего однотипного оборудования  $a$ ,  $b$  и  $c$ , то рассматриваемый показатель будет иметь следующий вид:  $(t_a - t_b)^2 + (t_a - t_c)^2 + (t_b - t_c)^2$ . Таким образом, если производство при выполнении конкретной программы идеально сбалансировано и всё оборудование загружено на 100%, показатель будет равен 0. Большее значение показателя характеризует производственные программы с более высокой неравномерностью использования оборудования.

При синтезе технологий и комплексных производственных планов к выходным данным относится, во-первых, выбранная оптимальная технология реализации ПрП, а также сам план и расписание работы оборудования ССП.

В параграфе 5.1.4 будут приведены примеры выходных форм разработанного программного обеспечения, полученные при решении конкретной практической задачи.

### 5.1.3. Программное обеспечение решения задач синтеза технологий и комплексных планов функционирования судостроительного предприятия

Проведённый анализ используемых в настоящее время на отечественных судостроительных предприятиях программных средств комплексного моделирования и планирования показал, во-первых, существенную гетерогенность применяемого СПМО, во-вторых, сложность или невозможность организации взаимодействия между программными средствами. Упомянутые выше программные средства комплексного моделирования и планирования представляют собой унаследованные программные системы в виде законченных решений (например, имитационная модель в среде AnyLogic, GPSS), реализующих имитационные модели судостроительного завода, прошедшие валидацию и верификацию. Такие подсистемы целесообразно использовать в составе предлагаемого программно-методического комплекса (ПМК). Разработка подобных подсистем «с нуля» представляет собой экономически

не выгодный процесс как с точки зрения трудозатрат, так и времени выполнения проекта. В связи с этим, необходимо организовать ПМК таким образом, чтобы обеспечить беспрепятственный обмен согласованными исходными данными и выходным результатом между готовыми и создаваемыми программными средствами.

В разработанный ПМК включены следующие унаследованные модули:

- расчета показателей надежности и критичности отказов;
- многокритериального оценивания и анализа интегральных показателей выполнимости производственных планов.

Кроме того, используется четыре сторонних программных продукта:

- среда имитационного моделирования AnyLogic (<https://www.anylogic.ru>);
- язык и система имитационного моделирования GPSS (General Purpose Simulation System – система моделирования общего назначения);
- программный комплекс АРБИТР для автоматизированного моделирования и расчетов показателей надежности структурно-сложных систем;
- пакет прикладных программ МОСТ (Массовое Обслуживание – Стационарные задачи) предназначен для расчета систем и сетей с очередями.

Обоснованный в п. 4.1 подход к построению гетерогенных модульных систем на основе сервис-ориентированной архитектуры был применён для реализации описываемого ПМК. Связующее программное обеспечение, обеспечивающее централизованный и унифицированный событийно-ориентированный обмен сообщениями между различными информационными системами, реализовано в виде сервисной шины предприятия (Enterprise Service Bus, ESB) [169] и основано на свободно распространяемом программном обеспечении с открытым исходным кодом OpenESB (<https://www.open-esb.net>). OpenESB объединяет в себе средства диспетчеризации работы веб-сервисов и отделение логики работы от технической реализации. Несмотря на удобство использования данного связующего программного обеспечения в рассматриваемой задаче применения ПМК для ССП, существуют две важные технические проблемы: во-первых, OpenESB требует использования стандартизированных интерфейсов модулей и работы по стандартизированным протоколам, что не было реализовано во всех унаследованных и сторонних программных продуктах, а, во-вторых, оно поддерживает только стандарт WS-BPEL для реализации логики работы. Первая проблема решилась методом программных «обёрток», преобразующих частную систему ввода-вывода каждого модуля в стандартизированный интерфейс обмена данными (см. рисунок 51). Вторая проблема также



успешно решилась благодаря наличию в стандарте BPMN 2.0 специального раздела, посвящённого преобразованию нотации BPMN в исполняемый сценарий на языке BPEL – «Mapping BPMN Models to WS-BPEL». В данном разделе стандарта приведены подробные инструкции по преобразованию одного формата в другой, что позволило выходные данные из разработанного аналитико-имитационного программного комплекса перевести в формат WS-BPEL.

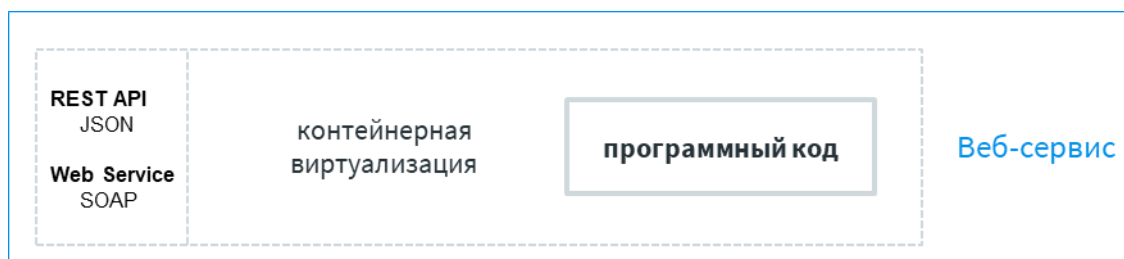


Рисунок 51. Стандартизация интерфейсов наследуемых модулей

Подсистема управления данными была реализована в виде СУБД PostgreSQL, свободно распространяемой с открытыми исходными кодами. В базе данных хранятся наборы исходных данных для имитационного и аналитического моделирования, а также сведения о конфигурациях ПМК и сценариях моделирования. Указанные сведения позволяют технологу судостроительного предприятия строить различные вычислительные программы для моделирования производственных процессов с различной степенью детализации.

Подсистема управления моделированием, визуализации и интерпретации результатов представляет собой программный модуль, реализованный в виде клиент-серверного приложения. Клиентская часть выполнена в виде тонкого клиента – веб-интерфейса пользователя (отображается в браузере) и основана на свободно распространяемом программном каркасе DHTMLX (<https://dhtmlx.com>), который предоставляет возможность быстрого создания эргономичных пользовательских интерфейсов из набора готовых графических компонентов. Клиентская часть фактически реализуется на языках HTML и Javascript, что позволяет использовать её в большинстве современных операционных систем без необходимости преобразования исходного кода. Для повышения наглядности результатов моделирования в ПМК используются средства отображения графиков и диаграмм, встроенные в программный каркас DHTMLX.

С учётом обозначенных ранее особенностей используемых унаследованных программных комплексов была разработана архитектура создания ПМК, представленная на рисунке 52. Для преодоления проблем гетерогенности с одной стороны, и удобства развёртывания ПМК с другой стороны, представленная архитектура позволила размещать модули с несовместимыми

требованиями к среде исполнения на одном аппаратном сервере благодаря применяемой технологии контейнерной виртуализации. Следуя описанным в 4-й главе диссертации подходам, она обеспечила взаимодействие модулей посредством сетевого обмена данными. Роль связующего программного обеспечения в данном случае выполняет созданная центральная часть ПМК: программный модуль, обеспечивающий вызов всех остальных модулей, снабжение их согласованными исходными данными, сбор и интерпретацию результатов. И, наконец, кроссплатформенный интегрированный пользовательский интерфейс позволил удалённо использовать все возможности ПМК.

Сервис-ориентированная архитектура позволила перевести разработанный программный комплекс в формат «облачного» приложения, реализуемого как сервис (Software as a Service, SaaS). Следствием перехода к облачным вычислениям стало существенное повышение гибкости аппаратно-программной реализации. В частности, создаваемый программный комплекс был значительно распределен территориально и структурно, то есть, выполнялся на вычислительных мощностях, принадлежащих разным подрядным организациям, в том числе, находящимся в разных городах. При этом синтезированная система на рабочем месте технолога (или любого другого заинтересованного пользователя) функционировала как единое целое решение.

При объединении веб-сервисов с целью создания высокоуровневого приложения была необходима стандартизация моделей их взаимодействия. Очевидно, что работа программного комплекса предполагает регулярный обмен данными между входящими в её состав программными модулями. Сами модули представляют собой достаточно функциональные тематические решения, что выходит за рамки концепции микросервисов. Поэтому для стандартизации интерфейсов взаимодействия модулей планируется использовать язык описания веб-сервисов WSDL (Web Services Description Language) из состава стандартов W3C Web Services.

Это язык, который описывает веб-сервис как набор конечных точек (портов), способных обмениваться сообщениями. WSDL, служит для документирования и комплексного определения деталей взаимодействия распределенных систем в виде, удобном для машинной обработки. Раздельное описание абстрактных понятий, таких как порт и сообщение, и их конкретных реализаций (формат данных, сетевые протоколы) обеспечивает высокую степень гибкости и масштабируемости создаваемого программного комплекса.

При переходе к конкретной реализации сетевого межмашинного обмена данными, в настоящее время применяются, в основном, следующие протоколы: XML-RPC, REST, SOAP [170]. Проведённый детальный анализ существующих технологий взаимодействия веб-сервисов показал, что в случае ориентации разработки на интеграцию со сторонними системами, наиболее строгим и перспективным для использования протоколом является SOAP.

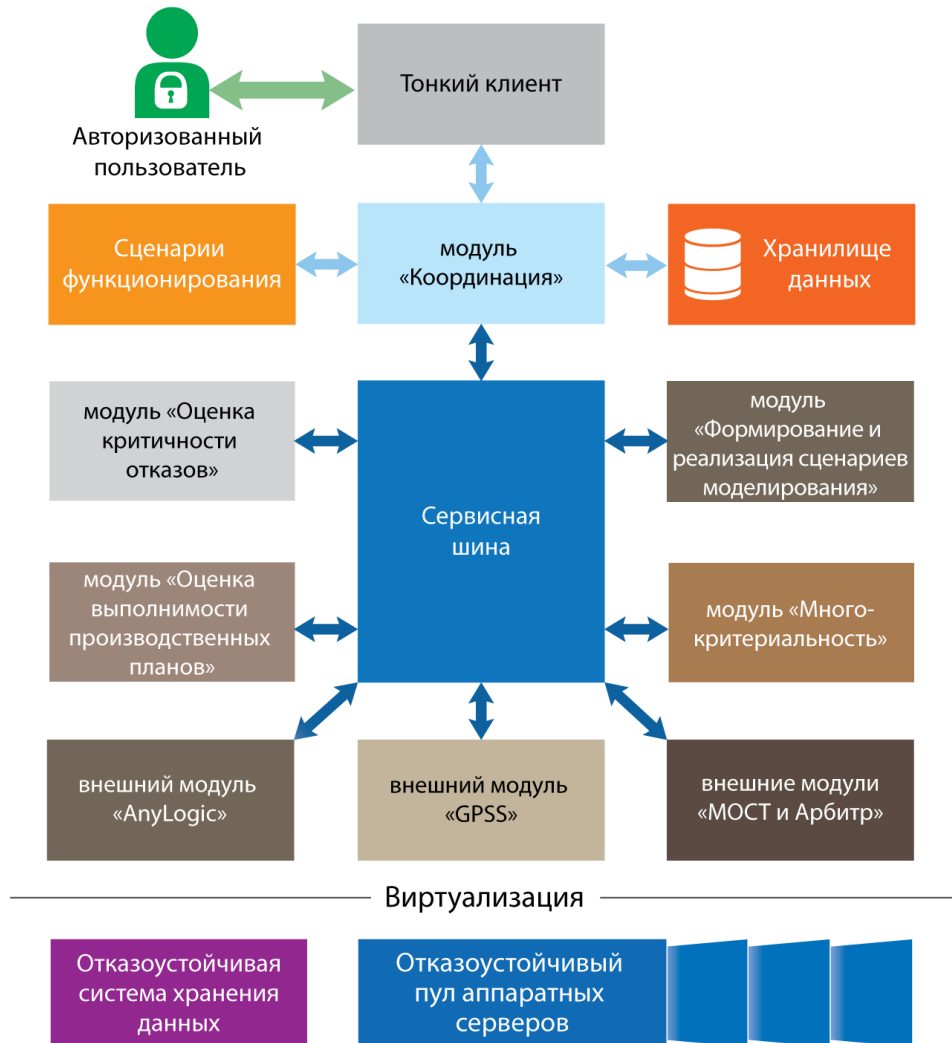


Рисунок 52. Обобщенная архитектура создаваемого экспериментального образца программного обеспечения

Следует ещё раз подчеркнуть, что стандартизация моделей взаимодействия веб-сервисов не определяет логику работы программного комплекса. Для этих целей используется язык описания последовательности действий и инфраструктура для его выполнения. В рассматриваемом примере используется реализация сервисной шины OpenESB, в которой имеется встроенный интерпретатор языка WS-BPEL. Вследствие этого выходной файл расчётного модуля, содержащий синтезированную технологию и план её реализации, записанный в формате BPMN 2.0, конвертируется в исполняемый файл в формате WS-BPEL (см. рисунок 53), который интерпретируется средствами OpenESB, реализуя бизнес-логику, то есть, взаимодействие между различными частями программного комплекса.

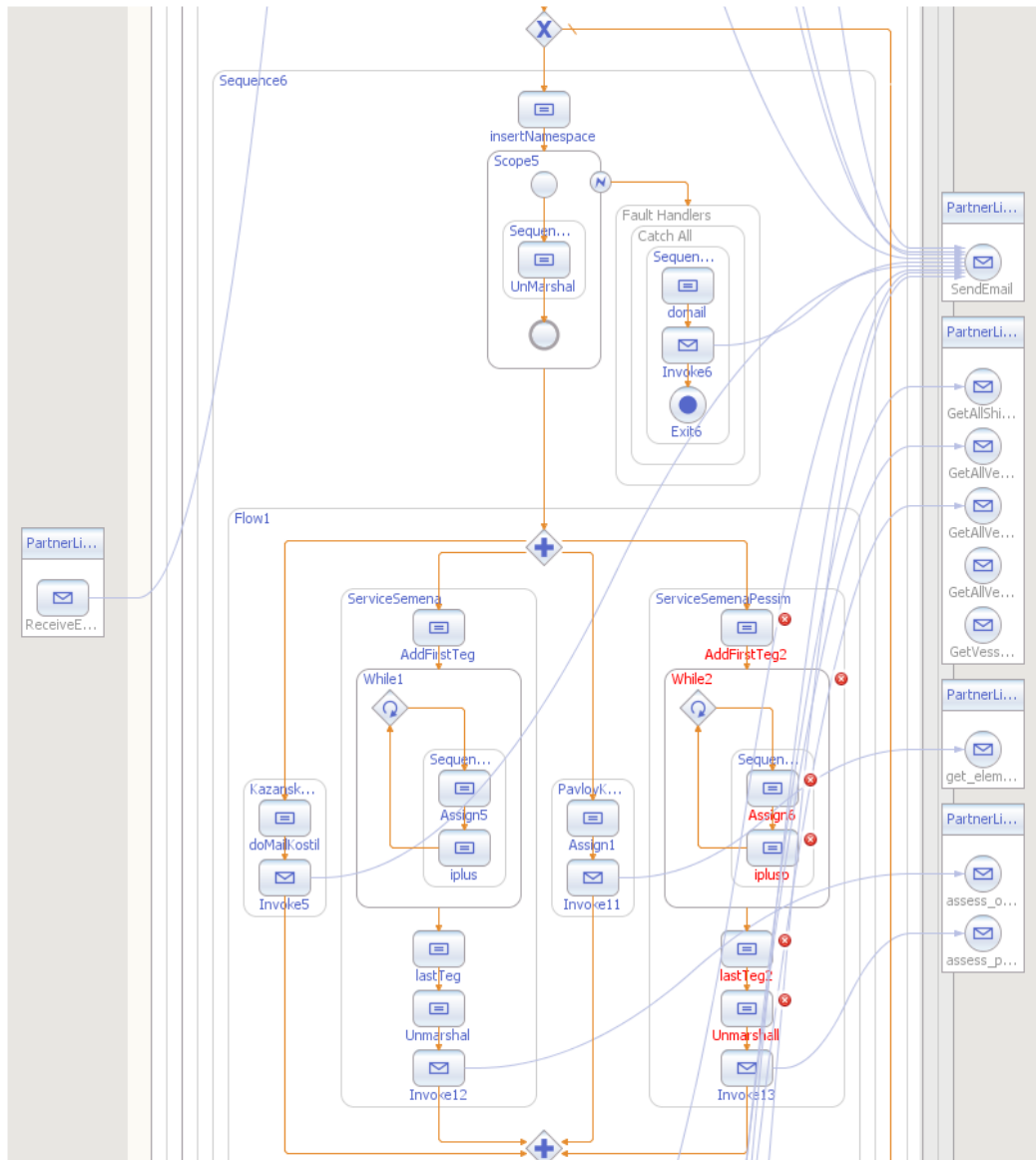


Рисунок 53. Фрагмент бизнес-процесса в формате WS-BPEL

Как было описано выше, программный комплекс состоит из отдельных сервисов, а именно:

1. Программно-методический комплекс, который инициирует передачу сформированной производственной программы в имитационную модель, а также обеспечивает пополнение информации о судах и их типов, выгрузку информации о доступных судах и верфях. Взаимодействие программно-методического комплекса и сервисной шины происходит по средствам обмена сообщениями в формате XML через сервер электронной почты, так как сервер заказчика не имеет прямого доступа в интернет.

2. Веб-сервис «Расчет статистической оценки значения показателя выполнимости производственной программы», реализованный с использованием системы имитационного моделирования GPSS World. Данный сервис также является поставщиком исходных данных для модуля «Многокритериальная оценка».
3. Веб-сервис «Расчет показателей выполнимости производственных планов» реализует оптимистичный и пессимистичный сценарий выполнимости производственных планов. Для их реализации разработана соответствующая структура двух видов запросов. После получения ответа, информация обрабатывается и формирует часть ответа программно-методическому комплексу, содержащего результаты работы всех доступных веб-сервисов, а также часть информации поступает в модуль «Многокритериальная оценка».
4. Веб-сервис «Многокритериальная оценка» получает запрос на выполнение, который частично состоит из данных предоставленных в результате работы других сервисов, таких как «Расчет статистической оценки значения показателя выполнимости производственной программы» и «Расчет показателей выполнимости производственных планов», а также в результате работы своих собственных подсистем, таких, например, как «Надежность и критичность отказов». В результате работы модуля формируется часть ответа программно-методическому комплексу.
5. После выполнения работы описанных выше модулей формируется полный ответ программно-методическому комплексу в формате XML и пересылается в теле письма по электронной почте.

Таким образом, используя разработанный вычислительный модуль комплексного моделирования и соответствующую архитектуру, описанные в четвертой главе диссертации, был разработан программно-методический комплекс решения задачи оценивания выполнимости производственных планов судостроительного предприятия. Несмотря на наличие технических особенностей реализации, таких как стороннее унаследованное программное обеспечение, не соответствующее стандартам веб-сервисам, отсутствие прямого интернет-соединения некоторых модулей комплекса и отсутствие поддержки интерпретации стандарта BPMN 2.0 удалось остаться в рамках стандартов и предложенной ранее обобщенной архитектуры.

#### 5.1.4. Пример решения задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования судостроительного предприятия

Разработанный экспериментальный образец (ЭО) программного модуля (ПМ) «Расчет показателей выполнимости производственных планов» предназначен для решения задач автоматизированного расчета значений показателей качества выполнения производственных планов судостроительных предприятий (ССП), в частности, показателя выполнимости производственной программы, показателей полноты выполнения технологических операций создания сборочных единиц и суммарного нарушения директивных сроков реализации программы, а также показателя равномерности загруженности оборудования судостроительного предприятия. Кроме того, рассчитывается планируемое время использования каждой единицы оборудования предприятия.

В основу разработки ЭО ПМ положено полимодельное динамическое описание процесса функционирования ССП, включающее в себя комплекс моделей управления технологическими операциями, комплекс моделей управления ресурсами (оборудованием), комплекс моделей управления материальными потоками. Основное достоинство разработанных комплексов моделей состоит в том, что они, в отличие от существующих разработок, базируются на результатах современной теории проактивного управления сложными организационно-техническими объектами. Указанный фундаментальный научный базис предоставляет потенциальным пользователям возможность решения широкого спектра задач многовариантного прогнозирования, мониторинга и управления производственными процессами для различных сценариев изменения внешней и внутренней обстановок на ССП.

Для решения ряда конкретных производственных задач с использованием ЭО ПМ требуется выполнить ряд действий. Так, на подготовительном этапе по исходным данным, имеющимся в заранее созданной базе данных, выполняется автоматическое формирование основы для шаблонов описания производственных процессов создания сборочных единиц изделий в нотации BPMN (Business Process Modelling Notation). Основа шаблона представляет собой описание технологических операций и их связей (см. рисунки 54, 55). Далее в интерактивном режиме производится уточнение и детализация содержания шаблонов для обеспечения возможности выполнения дальнейшего моделирования производственных процессов на ССП в автоматическом режиме. Фактически происходит описанное подробно в п. 4.2 настоящей диссертации расширение нотации BPMN с помощью специального элемента <extensionElements> требуемыми параметрами из логико-динамических моделей.



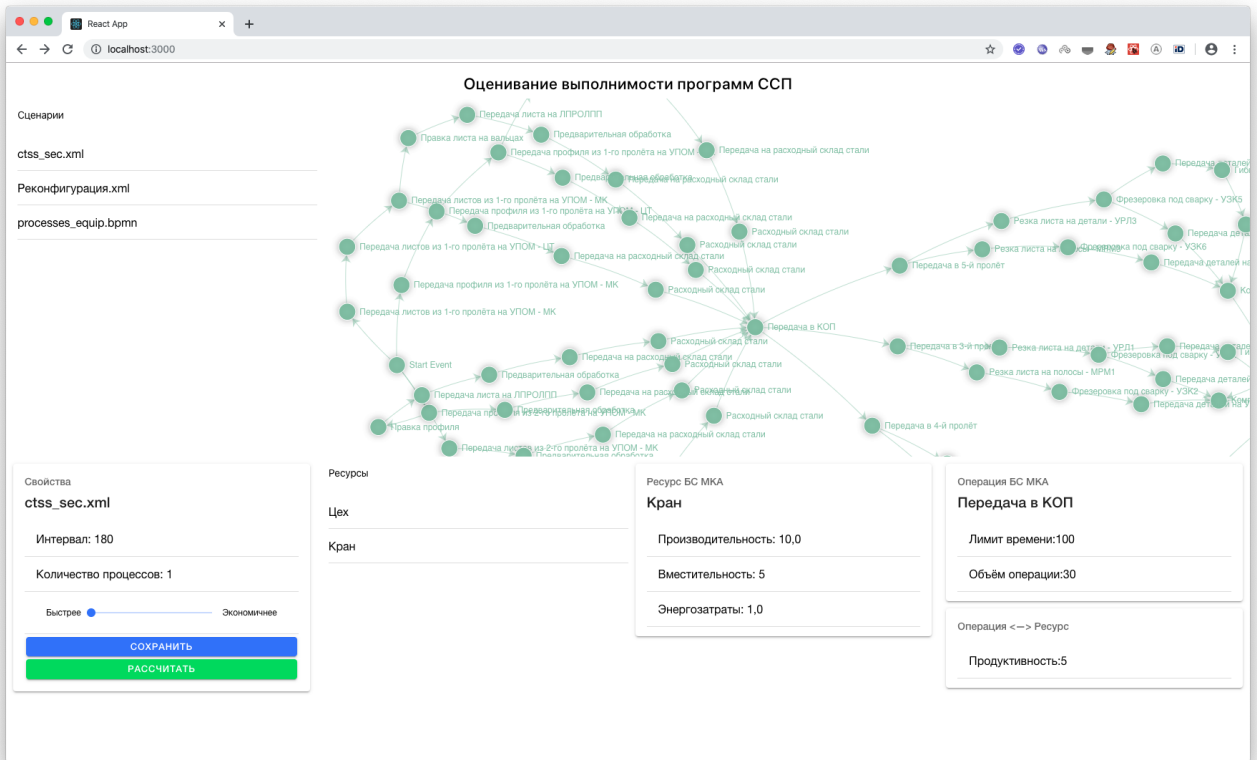


Рисунок 55. Интерфейс разработанного программного комплекса с загруженным описанием производственных процессов

На этапе выполнения расчётов происходит формирование описания производственного процесса для каждой сборочной единицы изделия путём автоматического заполнения типового шаблона исходными данными, автоматически получаемыми из других модулей прототипа программного комплекса. В частности, ЭО ПМ работает совместно с модулями имитационного моделирования сторонних разработчиков. Здесь использовался метод «программных обёрток», описанный в п. 5.3 выше. Указанные сторонние модули содержат все необходимые данные в своих базах данных и по запросу в формате веб-сервиса предоставляют эти данные разработанному ЭО ПМ. Расчёт динамических приоритетов для каждой операции производственного процесса каждой сборочной единицы изделия осуществлялся в соответствии с математическим обеспечением, представленным в п. 5.2 данной главы диссертации.

На основе полученных динамических приоритетов выполнялось оценивание выполнимости производственной программы и загруженности производственного оборудования, в результате чего формировалась оптимистичная оценка выполнимости производственных планов ССП.



Сформированные сценарии снижения производительности оборудования позволили производить расчёты пессимистичной оценки выполнимости производственной программы. Расчёт частных показателей качества реализации производственной программы в оптимистичном и пессимистичном варианте.

Для успешного завершения расчётов в прототипе программного модуля был сформирован следующий состав необходимых входных данных:

1. Описание производственной программы:

- сроки реализации производственной программы в целом;
- перечень типов изделий, подлежащих постройке;
- планируемые сроки постройки каждого изделия;
- приоритетность каждого изделия.

2. Для каждого типа изделия:

- перечень сборочных единиц изделия (разбивки);
- перечень операций по созданию типовых сборочных единиц и их взаимосвязи;
- длительность выполнения каждой операции и возможные отклонения;
- технологические ограничения: перечень оборудования, на котором может выполняться конкретная операция;
- перечень оборудования и его характеристики (время выполнения каждой допустимой операции);
- возможные (прогнозируемые) сценарии снижения производительности оборудования, вызываемые внешними, внутренними, объективными, субъективными причинами.

В результате работы прототипа формируется следующий состав выходных данных для пессимистической и оптимистической 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:

- полнота выполнения технологических операций создания сборочных единиц;
- суммарное нарушение директивных сроков реализации программы;
- равномерность загрузки оборудования судостроительного предприятия.

3. Общее время и конкретные интервалы времени планирования использования, а также доля загрузки каждой единицы оборудования предприятия.

Вид перечисленных выходных данных представлен на рисунках 56 – 57.

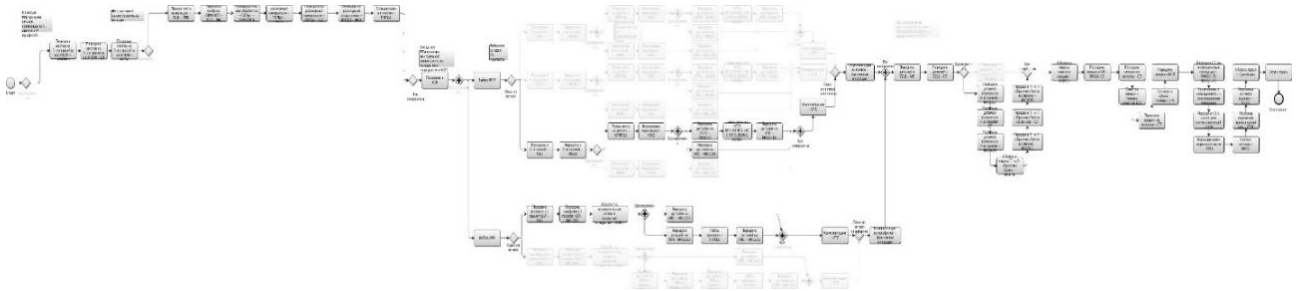


Рисунок 56. Оптимальная технология реализации производственного процесса, выделенная на исходном альтернативном графе в нотации BPMN

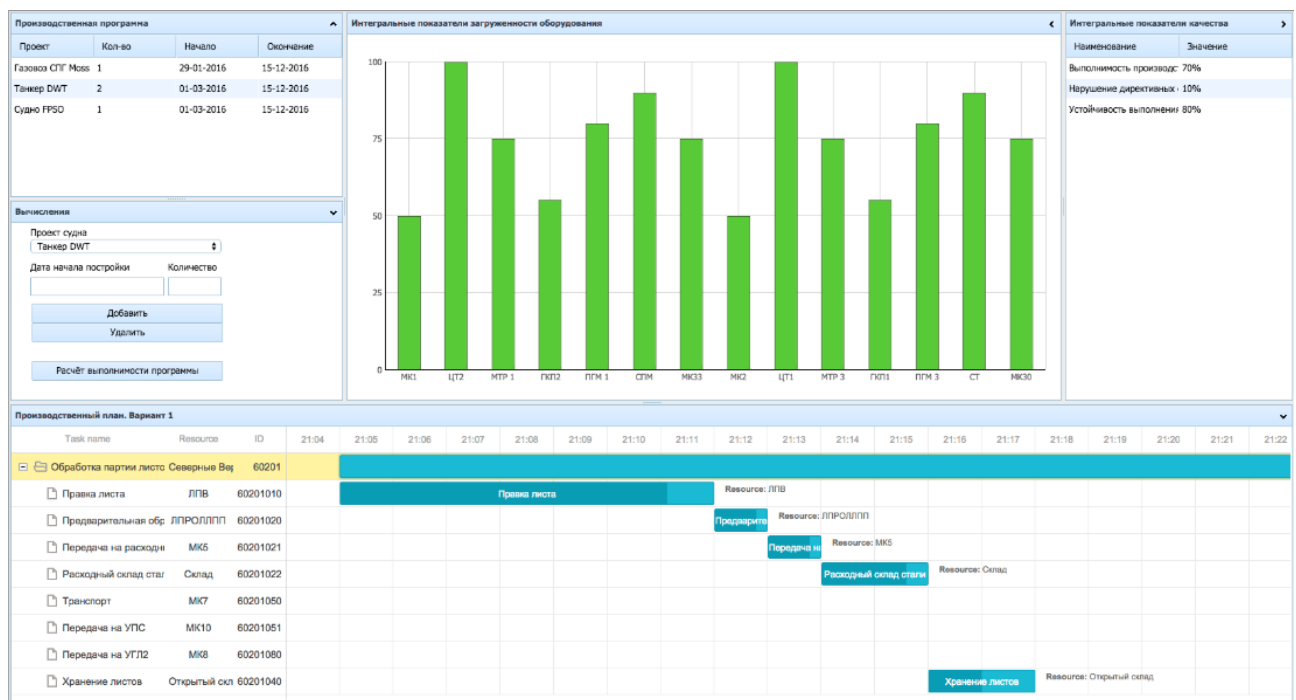


Рисунок 57. Пользовательский интерфейс разработанного программного комплекса, отображающий, результаты оценивания производственного потенциала ССП, а также фрагмент конкретного расписания работы его оборудования

## **5.2. Математическое и программное обеспечение решения задач синтеза планов функционирования автоматизированных систем управления космическими аппаратами (АСУ КА)**

Проиллюстрируем конструктивность разработанного в диссертации математического и программного обеспечения решения задач управления КФС применительно к космической сфере. В данной сфере в качестве основного объекта исследований выберем современные автоматизированные системы управления (АСУ) космическими аппаратами (КА), являющиеся одной из разновидностей сложных организационно-технических объектов (СОТО). Традиционно в их состав включают орбитальные и наземные космические средства КСр (ОрКСр, НКСр). В свою очередь, ОрКСр и НКСр, объединяясь и взаимодействуя между собой, образуют соответственно: орбитальные системы (ОрС) КСр, или, по-другому, ОрС космических аппаратов (ОрС КА), а также наземные комплексы управления (НКУ) [46, 225-228]. Общая организация и проведение работ в перечисленных системах и комплексах осуществляются при непосредственном участии и под руководством различных категорий специалистов, обеспечивающих надежное и устойчивое функционирование АСУ КСр [46, 225].

В настоящее время при проектировании, внедрении, эксплуатации и развитии АСУ КСр одной из актуальных проблем была и остается проблема автоматизации и интеллектуализации управления указанными средствами. При этом говоря об управлении КСр выделяют такие основные функции управления, как целеполагание, планирование, оперативное управление, контроль, учет, мониторинг состояния, координация и т. п.

Далее, исследуя вопросы синтеза специального программно-математического и информационного обеспечения (СПМО) для такого объекта исследования как АСУ КА, будем рассматривать различные варианты постановки и решения задач анализа и синтеза технологии совместного (раздельного) планирования и управления работой бортового комплекса управления (БКУ) КА и средств наземного комплекса управления КА. На рисунках 58, 59 представлены в обобщенном виде основные элементы структуры АСУ КА. На рисунках приняты следующие условные сокращения: система связи и передачи данных (ССПД), система единого времени (СЕВ), центр управления полетом (ЦУП), пункт управления (ПУ), баллистический центр (БЦ), телеметрический центр (ТМЦ), баллистико-навигационная информация (БНИ), командно-программная информация (КПИ).

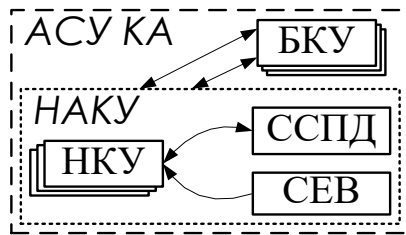


Рисунок 58. Обобщенная структура АСУ КА

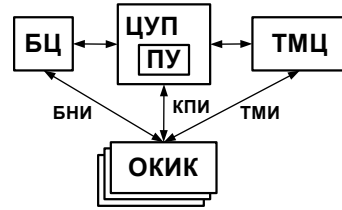


Рисунок 59. Обобщенная структура НКУ

Формально описывая и исследуя процессы синтеза технологий управления рассматриваемыми КСр, а также совместного и отдельного планирования работы БКУ и НКУ КА, будем предполагать, что они представляют собой целенаправленные, организованные и непрерывные процессы выделения различных элементов и аспектов СОТО (в рассматриваемом случае АСУ КА), определения их состояния и взаимодействия в данное время, прогнозирования их развития на некоторый период времени в будущем, а также составления и программирования набора действий и планов, направленных на достижение желаемых результатов [52, 64].

Главная трудность при решении задачи совместного планирования работы БКУ КА и НКУ КА (также, как и в общем случае, для систем управления КФС (см. 1 главу диссертации)) состоит в следующем: определение оптимальных программ управления основными элементами и подсистемами АСУ КА может быть выполнено лишь после того, как станет известен перечень функций и алгоритмов обработки информации и управления, который должен быть реализован в указанных элементах и подсистемах. В свою очередь, распределение функций и алгоритмов по элементам и подсистемам АСУ КА зависит от структуры и параметров законов управления данными элементами и подсистемами. Трудность разрешения данной противоречивой ситуации усугубляется еще и тем, что под действием различных причин во времени изменяется состав и структура АСУ КА на различных этапах её жизненного цикла [3].

В данной главе будут рассмотрены два примера решения задачи синтеза технологий и комплексных планов работы АСУ КА применительно к двум конкретным классам КА, к которым были отнесены навигационные КА (НКА), и КА дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). При решении данных примеров будут использоваться логико-динамические модели, описанные во второй главе. Кроме того, для каждого из примеров будут приведены сведения об особенностях программной реализации соответствующего специального модельно-алгоритмического обеспечения КА.

### 5.2.1. Пример решения задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования центра управления полётом навигационными космическими аппаратами

Применительно к рассматриваемой задаче уточним состав и структуру соответствующих исходных данных. На рисунках 60 и 61 представлены типовые топологические структуры ОрС навигационными космическими аппаратами (НКА) и НКУ [225-229].

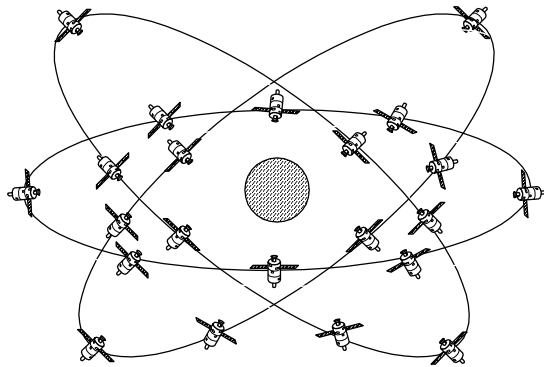


Рисунок 60. Типовая топологическая структура орбитальной группировки НКА

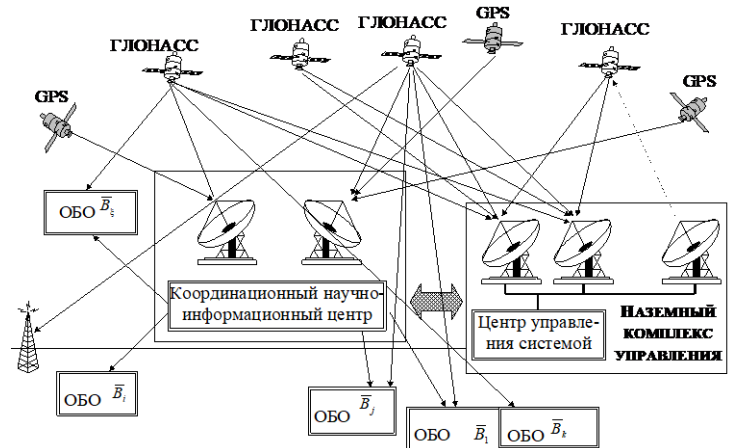


Рисунок 61. Типовая топологическая структура наземного комплекса управления НКА

На рисунке 62, взятом из [46] изображена типовая техническая структура системы управления (СУ) ОрС НКА. На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: ЦА – целевая аппаратура, обеспечивающая выполнение целевого предназначения НКА; СЛА – служебная аппаратура общего назначения; СУД – система управления движением; ИВК – информационно-вычислительный комплекс; ЛТС – локальная телекоммуникационная сеть; УСВЗ – унифицированные средства информационного взаимодействия; АКНП – аппаратура контроля навигационного поля; АРМ – автоматизированное рабочее место; НО, ИТО, КДО, КПО – навигационное обеспечение, информационно-телеметрическое, контрольно-диагностическое, командно-программное обеспечение; ТРТС – территориально распределённая телекоммуникационная система.

Процессы формирования (коррекции) навигационной информации 1, 2, 3 типов, которым соответствуют процессы формирования эфемеридной информации (НИ-1), альманаха навигационной системы (НИ-2) и частотно-временных поправок (НИ-3), предполагает реализацию соответствующей технологии автоматизированного управления как НКА и ОрС НКА, так и территориально-распределенной системой пунктов обслуживания (ПО) и пунктов управления (ПУ), образующих наземный комплекс управления (НКУ).

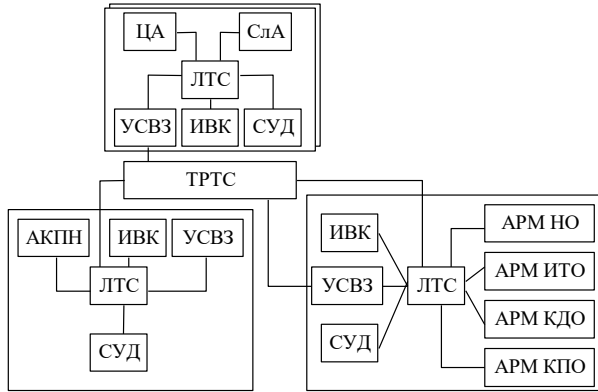


Рисунок 62. Типовая техническая структура системы управления ОрС НКА

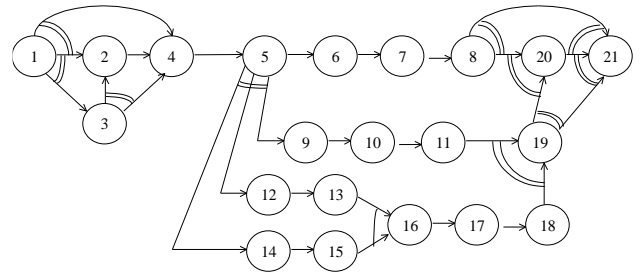


Рисунок 63. Фрагмент технологии функционирования НКУ при взаимодействии с НКА

На рисунке 63, также взятом в [46] в качестве примера представлен фрагмент указанной технологии, связанной с функционированием НКУ при взаимодействии с одиночным НКА. На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: **1** – операция приёма  $V_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) информации ПО, поступающей с НКА  $A_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ); **2** – операция предварительной обработки на ПО  $V_j$  информации, поступившей с НКА  $A_i$ ; **3** – операция хранения информации, информации, поступившей с НКА  $A_i$ ; **4** – операция передачи информации с ПО  $V_j$  на ПУ  $V_{j'}$  ( $j \in M, j' \in M'$ ); **5** – операция планирования работ и формирования заданий, связанных с обработкой на ПУ  $V_{j'}$  информации с НКА  $A_i$ ; **6** – операция обработки частотно-временных поправок (НИ-3); **7** – операция формирования НИ-3; **8** – операция передачи с ПУ  $V_{j'}$  на ПО  $V_j$  частотно-временных поправок; **9** – операция обработки НИ-1; **10** – операция обработки НИ-2; **11** – операция формирования обновлённой НИ-1, НИ-2; **12** – операция обработки информации о состоянии НКА  $A_i$ ; **13** – операция анализа и диагностики состояния НКА  $A_i$ ; **14** – операция обработки информации о состоянии навигационного поля; **15** – операция выработки рекомендаций по улучшению качества навигационного поля; **16** – операция обработки результатов выдачи разовых команд; **17** – операция обработки результатов выполнения временной программы; **18** – операция формирования (коррекции) программно-командной информации (ПКИ); **19** – операция передачи на ПО  $V_j$  НИ-1, НИ-2, НИ-3, ПКИ; **20** – операция хранения на ПО  $V_j$  информации, полученной с ПУ  $V_{j'}$  и предназначенной для передачи на борт НКА  $A_i$ ; **21** – операция передачи на борт НКА  $A_i$  с ПО  $V_j$  всей ранее полученной информации (НИ-1, НИ-2, НИ-3, ПКИ и т.п.). На рис. 63 одиночной дугой помечены операции (вершины), которые логически связаны по схеме «И» с операциями, непосредственно предшествующими данной операции (следующими за данной операцией); двойной дугой помечены операции (вершины), которые логически связаны по схеме

«ИЛИ» (либо альтернативное «ИЛИ») с операциями, непосредственно предшествующими данной операции (следующими за данной операцией).

Введём в рассмотрение ещё два множества: множество операций взаимодействия  $D^{(i)} = \{D_{\alpha}^{(i)}, \alpha \in \Phi\}$ ,  $\Phi = \{1, \dots, s_i\}$ ; а также множество потоков –  $P^{(i)} = \{P_{\rho}^{(i)}, \rho \in \tilde{R}\}$ ,  $\tilde{R} = \{1, \dots, \pi_i\}$ . Данные множества необходимы при формальном описании рассматриваемой в данной главе диссертации задачи синтеза технологии и процессов планирования работы АСУ НКА.

Будем предполагать, что в результате реализации того или иного варианта технологии управления элементы и подсистемы СУ НКА переходят в одно из возможных расчётных (либо нерасчётных, нештатных) макросостояний. На рисунке 64 представлена в графическом виде диаграмма переходов из агрегированных макросостояний основных элементов и подсистем, входящих в состав СУ НКА. На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: I – макрооперация, описывающая функционирование элемента (подсистемы) СУ НКА в соответствии с целевым предназначением; II – макрооперация, описывающая функционирование элемента (подсистемы) СУ НКА в резервном состоянии; III – макрооперация, описывающая функционирование элемента (подсистемы) СУ НКА, находящегося в состоянии технического обслуживания и ремонта; II → III; III → II; I → III; III → I; I → II; II → I – макрооперации, описывающие процессы функционирования элемента (подсистемы) СУ НКА, находящегося в промежуточных макросостояниях. Рисунок и описание аналогичны приведённым в [46].

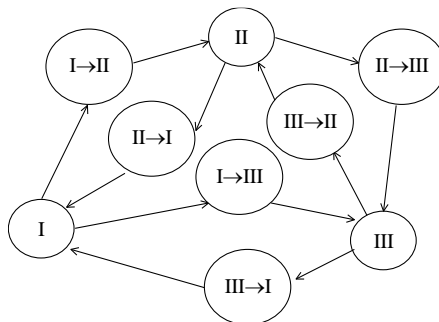


Рисунок 64. Диаграмма переходов между агрегированными макросостояниями

При проведении планирования будем предполагать известными технические характеристики основных элементов и подсистем СУ НКА, пространственно-временные, технические и технологические ограничения, определяющие специфику функционирования как ОрС НКА, так и НКУ. Пусть взаимодействие НКА, ПО, ПУ осуществляется в централизованном режиме. Проведённый анализ показывает, что показатели качества и оперативности определения местоположения того или иного класса объектов обслуживания (ОБО) во многом определяются

показателями точности оценивания вектора состояния движения НКА  $A_i$ , своевременности передачи на борт НКА обновлённой навигационной информации (эфемериды, альманах системы, частотно-временные поправки). Так, например, если неподвижный ОБО, находящийся на поверхности Земли, определяет своё местоположение на основе навигационной информации, поступающей от трёх НКА, показатель точности навигационного поля, создаваемого ОрС НКА, может быть вычислен по следующим формулам [46, 56, 57, 230, 231]:

$$K_x = \sum_{i=1}^3 \left( c^2 K_{t_i} \bar{\psi}_i \bar{\psi}_i^T + \bar{\psi}_i \bar{b}_i^T K_{e_i} \bar{b}_i \bar{\psi}_i^T \right), \quad \bar{\psi}_i = (B_0^T B_0)^{-1} \bar{b}_i; \quad B_0 = \begin{Bmatrix} \bar{b}_1^T \\ \bar{b}_2^T \\ \bar{b}_3^T \end{Bmatrix}; \quad (5.59)$$

$$\bar{b}_i^T = \frac{\partial D_i}{\partial \bar{x}_p} = \left\| -\frac{x_i^{(g)} - x_p}{D_i} \quad -\frac{y_i^{(g)} - y_p}{D_i} \quad -\frac{z_i^{(g)} - z_p}{D_i} \right\|;$$

$$D_i = \left[ (x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2 \right]^{1/2};$$

$$K_{t_i} = b_0^2 + 2b_0 b_1 (t - t_i) + b_1^2 (t - t_i)^2; \quad (5.60)$$

$$K_{e_i} = K_{0i} + K_{1i} (t - t_i) + K_{2i} (t - t_i)^2; \quad (5.61)$$

где  $K_x$  – корреляционная матрица ошибок определения местоположения ОБО по данным НКА;  $c$  – скорость распространения радиоволн;  $\bar{\psi}_i, B_0$  – вспомогательные векторы и матрицы;  $D_i$  – расстояние от ОБО до НКА  $A_i$ , измеренное (вычисленное) в момент времени  $t$ ;  $\bar{x}_i^{(g)} = \left\| x_i^{(g)} \quad y_i^{(g)} \quad z_i^{(g)} \right\|^T$  – вектор состояния движения НКА  $A_i$  в гринвичской системе координат;  $\bar{x}_p^{(g)} = \left\| x_p \quad y_p \quad z_p \right\|^T$  – вектор положения ОБО в гринвичской системе координат;  $b_0, b_1$  – заданные коэффициенты, характеризующие точность бортовой шкалы времени НКА;  $K_{0i}, K_{1i}, K_{2i}$  – заданные корреляционные матрицы, характеризующие точность эфемеридной информации;  $K_{t_i}$  – корреляционная функция ошибок бортовой шкалы времени НКА  $A_i$ ;  $K_{e_i}$  – корреляционная матрица ошибок формирования вектора положения НКА  $A_i$  в гринвичской системе координат;  $t_i$  – момент времени начала периода, на который рассчитана навигационная информация (НИ-1, НИ-2, НИ-3). В дальнейшем при формальной постановке задачи планирования НКУ мы будем использовать выражения вида (5.60), (5.61) при вычислении показателей качества функционирования ПО, ПУ, входящих в состав НКУ.

С учётом вышеизложенного, на содержательном уровне задача синтеза технологий и комплексных планов функционирования центра управления полётом навигационными космическими аппаратами может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти такие допустимые технологии и программы управления наземными техническими средствами



(НТСр) (планы функционирования), в ходе реализации которых будут выполнены своевременно и полностью все операции, входящие в соответствующие технологические циклы управления (ТЦУ) НКА, а качество обеспечения ОБО навигационной информацией удовлетворяло бы заданным требованиям. При этом, если будет получено несколько допустимых технологий и программ управления НТСр, то необходимо выбрать наилучшие (оптимальные) технологию и программу (план) с точки зрения принятых критериев оптимальности.

Для решения поставленной выше задачи зададим основные исходные данные следующим образом.

Пусть интервал планирования  $T$  составляет 12 часов с шагом  $\Delta = 5$  минут. На заданном интервале реализуются целевые процессы  $A'$ , связанные с функционированием 20-и НКА. Каждый процесс включает 4 – 7 операций обработки информации  $D^i$ , длительностью  $a_{i\bar{\alpha}}^{(o,1)}$  от 10 до 30 минут. Кроме того, параллельно реализуется 3 обеспечивающих процесса  $A''$ , в состав которых входят 4 – 6 операций  $D^i$  длительностью  $a_{i\bar{\alpha}}^{(o,1)}$  от 10 до 20 минут каждая. В отведённом времени  $a_{i\bar{\alpha}}^{(o,1)}$  необходимо обработать от 5 до 12 условных единиц информационного потока  $a_{ik}^{(п,1)}$ .

Начало выполнения целевых процессов связано с вхождением НКА в зоны видимости радиотехнических средств (РТС). Для каждого НКА зона видимости, описываемая функцией  $\varepsilon_{ij}(t)$ , длится от 4 до 6 часов и появляется с задержкой от 0 до 6 часов от начала интервала планирования, которая формируется по результатам баллистических расчётов [232].

Пусть обработанная информация передаётся на НКА и в резервный центр по каналам передачи данных. Операции передачи информации  $D^i$  имеют длительность 10 – 30 минут, в течение которых должно быть передано 5 – 10 условных единиц информационного потока  $a_{ik}^{(п,1)}$ .

Пусть обработка информации в ЦУП НКА реализуется на двух вычислительных машинах  $B_1$  и  $B_2$ , каждая из которых может параллельно решать две задачи ( $R_{1,2}^{(o,1)} = 2$ ) с суммарной интенсивностью  $R_j^{(п,1)}$  от 2 до 3 условных единиц информационного потока в минуту. Передачу информации осуществляют 5 СОД ( $R_1^{(п,1)} = 5$ ) суммарной интенсивностью передачи  $C_{v\mu\rho}^{(п,2)}$  от 2-х до 4-х условных единиц информационного потока в минуту.

Передача (прием) информации на борт (с борта) НКА должна быть осуществлена в пределах его зоны видимости. Выполнение данной операции за пределами зоны видимости влечёт за собой наложение штрафа согласно заданной штрафной функции  $\alpha_{ik}^{(o,1)}(\tau)$ .

Первым показателем оптимальности синтезируемой технологии управления НКА и соответствующего плана работы ЦУП НКА был выбран показатель своевременности закладки

информации на борт НКА. Вторым по значимости показателем оптимальности функционирования ЦУП НКА был выбран показатель точности выполнения краевых условий модели управления операциями (полнота выполнения операций). Третьим по значимости показателем оптимальности плана работы ЦУП НКА был выбран показатель равномерности загрузки ресурсов на интервале планирования.

### 5.2.2. Результаты решения задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования центра управления полётом навигационными космическими аппаратами

В качестве диспетчерского решения был выбран эвристический план и технология управления ЦУП НКА, построенный по принципу «первым пришёл – первым обслуживается» (FIFO). На рисунке 65 данный план представлен в виде диаграммы Ганта. По оси абсцисс отмечены порядковые номера процессов, по оси ординат – время в условных временных единицах.

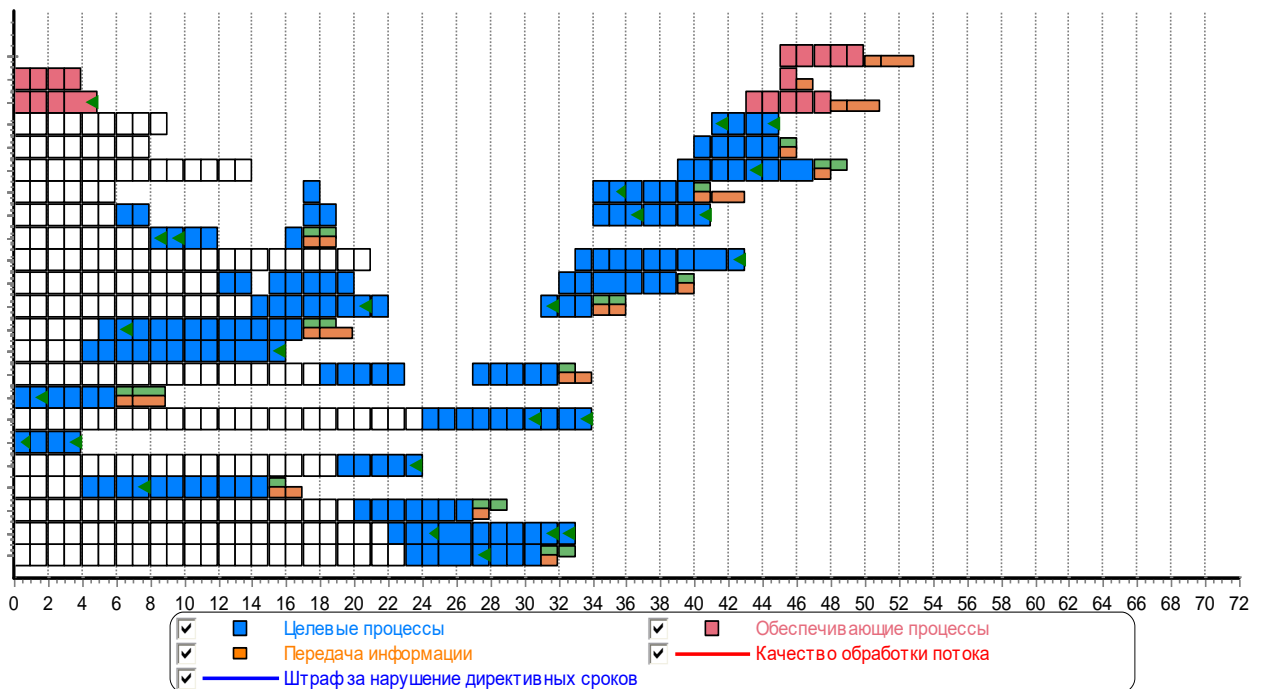


Рисунок 65. Эвристический план и технология управления ЦУП

После проведения оптимизации план и соответствующая технология функционирования ЦУП НКА на аналогичной диаграмме имеет следующий вид (рисунке 66):

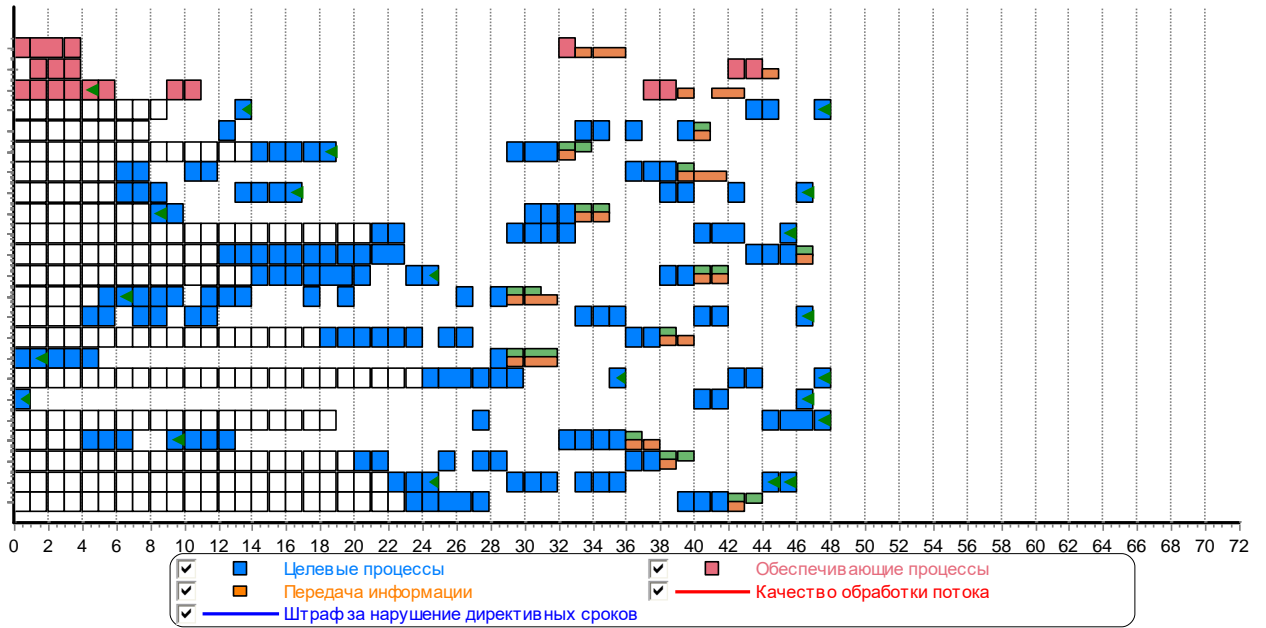


Рисунок 66. Оптимальный план и технология управления ЦУП

В представленной ниже таблице 8 проведено сравнение частных и обобщённого показателей качества двух полученных ранее решений.

Таблица 8 – Сравнение показателей качества решений

Показатель качества	FIFO	DYN
Необработанный информационный поток, $J_4$	14,80	11,15
Неравномерность загрузки ресурсов, $J_3$	0,05	0,00
Нарушение директивных сроков, $J_2$	56,50	56,00
Обобщённый показатель качества, $J_{06}$	71,35	67,15

Как видно из таблицы 8, применение разработанного метода и соответствующего алгоритма динамического планирования операций в ЦУП НКА в конкретном примере позволяет улучшить обобщённый показатель качества на 5%.

Следует отметить, что улучшение обобщённого показателя качества зависит от исходных данных, более того, при многократном решении задачи комплексного планирования операций и распределения ресурсов в ЦУП НКА с различными их вариантами наблюдались определённые закономерности у данной зависимости. Для выявления этих закономерностей было проведено более 1500 экспериментов, что стало возможно благодаря использованию разработанного генератора исходных моделей. В качестве базовой модели рассматривалась модель, описанная в параграфе 4.2.

В ходе проведённых экспериментов было выявлено влияние следующих параметров модели на степень улучшения показателя качества:

- суммарное количество выполняемых операций на интервале планирования;
- дисперсия объёмов выполняемых операций;
- соотношение суммарного объёма операций к числу процессов;
- плотность операции (отношение количества данных к объёму операции).

Наибольшее влияние на показатели качества планирования работы ЦУП НКА оказывают суммарное количество выполняемых операций на интервале планирования и плотность операции. На рисунке 67 приведён график поверхности в пространстве следующих показателей: количество НКА, информация от которых подлежит обработке в ЦУП на интервале планирования; плотность операции; улучшение обобщённого показателя качества по сравнению с эвристическим планом. Количество НКА фактически задаёт суммарное количество выполняемых операций на интервале планирования, а относительная плотность операций определяется отношением среднего арифметического объёмов данных всех операций  $a_{\text{ср}}^{(п,1)}$  к произведению среднего арифметического объёмов операции  $a_{\text{ср}}^{(о,1)}$  и среднего арифметического всех интенсивностей обработки операции ресурсом  $C_{\text{ср}}^{(п,1)}$ , выраженным в процентах:

$$P = \frac{a_{\text{ср}}^{(п,1)}}{C_{\text{ср}}^{(п,1)} \cdot a_{\text{ср}}^{(о,1)}} \cdot 100\% \quad (5.62)$$

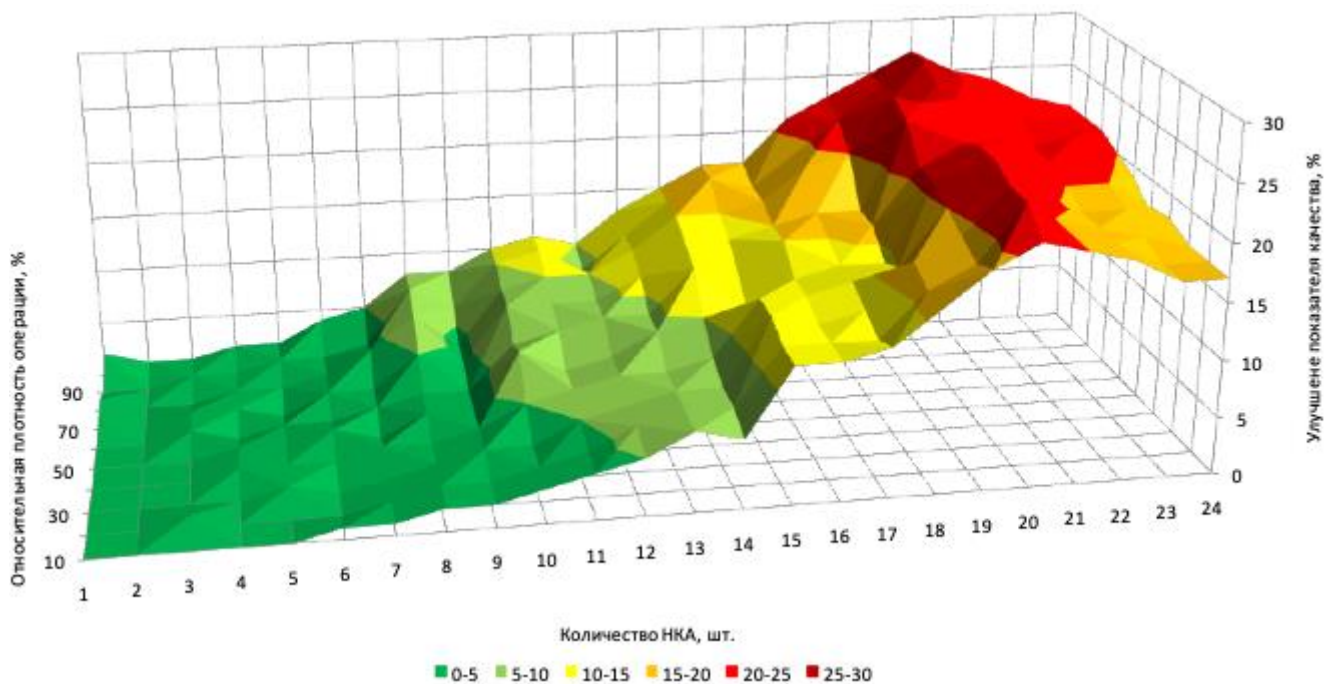


Рисунок 67. Влияние исходных данных на улучшение показателя качества

График построен на основе 720 экспериментов. Для каждой точки поверхности решались три задачи с фиксированием плотности операций, числа НКА и характеристик ресурсов, но варьированием других параметров модели (дисперсия объёмов выполняемых операций, соотношение суммарного объёма операций к числу процессов). Итоговая точка по вертикальной оси формировалась как среднее арифметическое значений, полученных на основе улучшений показателей качества трёх решений.

В качестве диспетчерского решения применялся нулевой план, так как он зачастую давал наибольший положительный эффект от динамического планирования. Улучшение показателя качества («выигрыш») – это отношение разницы обобщённых показателей качества эвристического (FIFO) и оптимального плана к обобщённому показателю качества эвристического (FIFO) плана.

Анализ полученных результатов показал следующее. При минимальной загруженности ресурсов (занятость каждого ресурса не превосходит  $0,1 \cdot T$ ) использовать алгоритм динамического планирования нецелесообразно, так как улучшение показателя качества не превосходит 3%. Первый значимый эффект от применения динамического планирования наблюдается при занятости ресурсов  $0,2 \cdot T$  и составляет 5 – 10%. Далее величина улучшения показателя качества нарастает по закону, близкому к линейному. Наибольший выигрыш, до 23 – 27%, проявляется при занятости ресурсов  $0,8 \cdot T$ . При дальнейшем увеличении загруженности ресурсов (увеличении числа обслуживаемых НКА) происходит постепенный спад величины улучшения показателя качества. При максимальной загрузке (24 НКА в рассматриваемом примере) данная величина снижается до отметки 17 – 20%.

Анализируя влияние на результаты второго фактора – плотности операции – можно выделить следующие закономерности. Применение алгоритма динамического планирования на моделях с высокой плотностью операций (при  $a_{\text{ср}}^{(п,1)} \approx C_{\text{ср}}^{(п,1)} \cdot a_{\text{ср}}^{(о,1)}$ ) в 93% проведённых экспериментов позволяет получить больший выигрыш, чем на моделях с низкой плотностью операций ( $a_{\text{ср}}^{(п,1)} \ll C_{\text{ср}}^{(п,1)} \cdot a_{\text{ср}}^{(о,1)}$ ). Разница значений улучшения показателей качества при минимальной и максимальной плотности находится в диапазоне 1 – 8%.

Следует отметить, что сходимость итерационного процесса ухудшается с увеличением загруженности ресурсов. Так, при 7-ми и менее НКА процесс в 98% экспериментов сходится за одну итерацию, от 7-ми до 13-ти НКА – в 85% случаев сходится за две итерации, от 14-ти до 21-го НКА – 70% экспериментов сходятся за 3 итерации и свыше 21-го НКА – 4 и более итераций в 87%, в том числе наблюдались расходящиеся итерационные процессы.

Также выявлено, что увеличение числа и производительности доступных ресурсов происходит сдвиг точки наивысшего выигрыша в сторону большего числа НКА. Так, согласно проведённым дополнительно экспериментам, для получения наибольшего выигрыша от использования алгоритма динамического планирования при 24 НКА необходимо использовать либо три вычислительные машины ЦУП НКА, параллельно решающие 2 задачи, либо две вычислительные машины, решающие одновременно по 3 задачи каждая.

Получив эталонные решения для нескольких опорных точек, соответствующих типовым вариантам исходных данных, можно определить целесообразность использования того или иного эвристического алгоритма вместо алгоритма динамического планирования. На рисунке 68 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%.

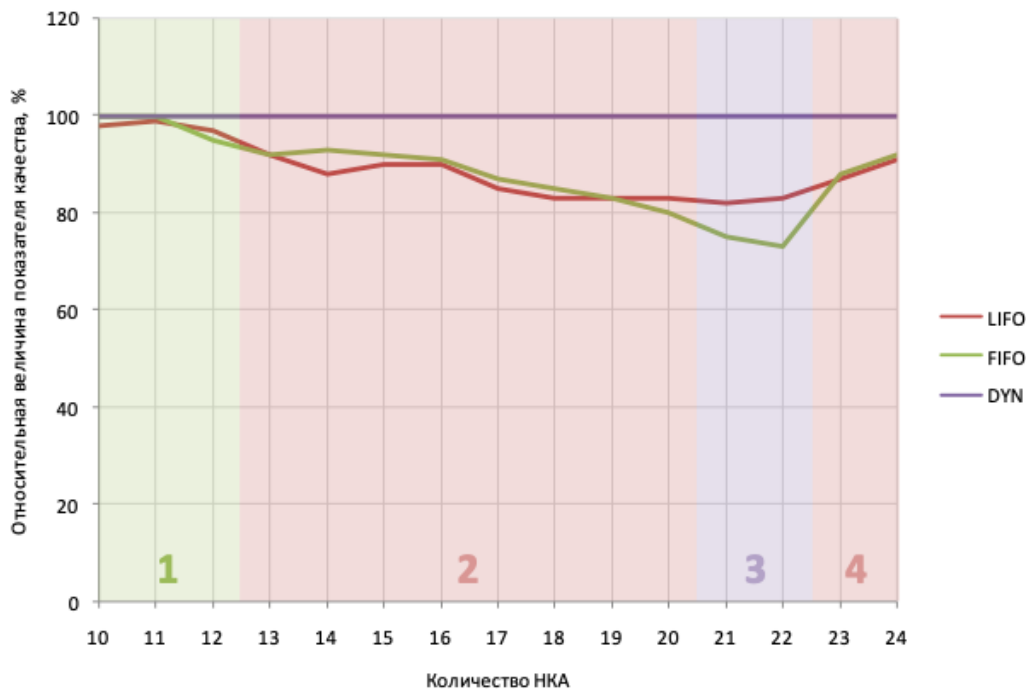


Рисунок 68. Относительные значения показателя качества для некоторых типовых вариантов исходных данных

Так, например, на графике можно выделить следующие области: область №1, не более 12 НКА – область эквивалентного использования эвристических и эталонного решения, так как значения показателей качества отличаются не более чем на 4%; область №2, от 13 до 20 НКА включительно и область №4, 23 и 24 НКА – область предпочтительного использования эталонного решения, при необходимости использования эвристических решений выбор

конкретной дисциплины назначения приоритетов не принципиален; для области №3 – области предпочтительного использования эталонного решения, при необходимости использования эвристических решений целесообразнее выбирать дисциплину назначения приоритетов LIFO.

Вторая серия экспериментов была направлена на выявление зависимости робастности полученного решения от исходных данных.

Экспериментально подтвердились предположения о том, что робастность планов функционирования моделей снижается при увеличении количества обслуживаемых НКА и, как следствие, повышении нагрузки на вычислительные ресурсы. Большой интерес представляет исследование факторов, влияющих на робастность решений при высокой нагрузке на вычислительные ресурсы.

Проведённый на основе результатов экспериментов анализ показал, что на робастность полученных решений (технологий и планов функционирования ЦУП НКА) в указанных выше условиях в большей степени влияет состав и параметры используемых вычислительных ресурсов. Так, планы, реализуемые на однородных (близких по значению параметров) ресурсах, в среднем на 12% более робастны, чем планы, реализуемые на разнородных, поэтому в дальнейших экспериментах рассматривались только однородные ресурсы.

В ходе решения группы аналогичных задач синтеза технологий и планирования работы ЦУП НКА фиксировалась суммарная производительность ресурсов, и варьировалось их количество и частная производительность.

В следующем примере в модель, подробно рассмотренную в параграфе 4.2, были последовательно внесены следующие изменения: использован один ресурс, способный параллельно реализовывать 6 операций, суммарной производительностью, равной 60 условным единицам информационного потока за один шаг времени ( $\Delta$ ); использовано два ресурса половинной мощности (вместимость – 3 операции, производительность 30 условных единиц); использовано три ресурса мощностью  $1/3$  от первого варианта (вместимость – 2 операции, производительность 20 условных единиц); использовано шесть ресурсов мощностью  $1/6$  от первого варианта (вместимость – 1 операция, производительность 10 условных единиц). Для каждого варианта конфигурации ресурсов были построены планы реализации технологий, рассмотренных в предыдущем примере, в условиях различных сценариев возмущающих воздействий: доступно от 90% до 10% от общей производительности ресурсов (вместительности  $R^{(o,1)}$  и интенсивности  $R^{(n,1)}$ ). График зависимости показателя  $S$ , оценивающего робастность плана (см. параграф 3.3), от сценария возмущающих воздействий и конфигурации ресурсов приведён на рисунке 69, а числовые результаты экспериментов – в таблице 7.

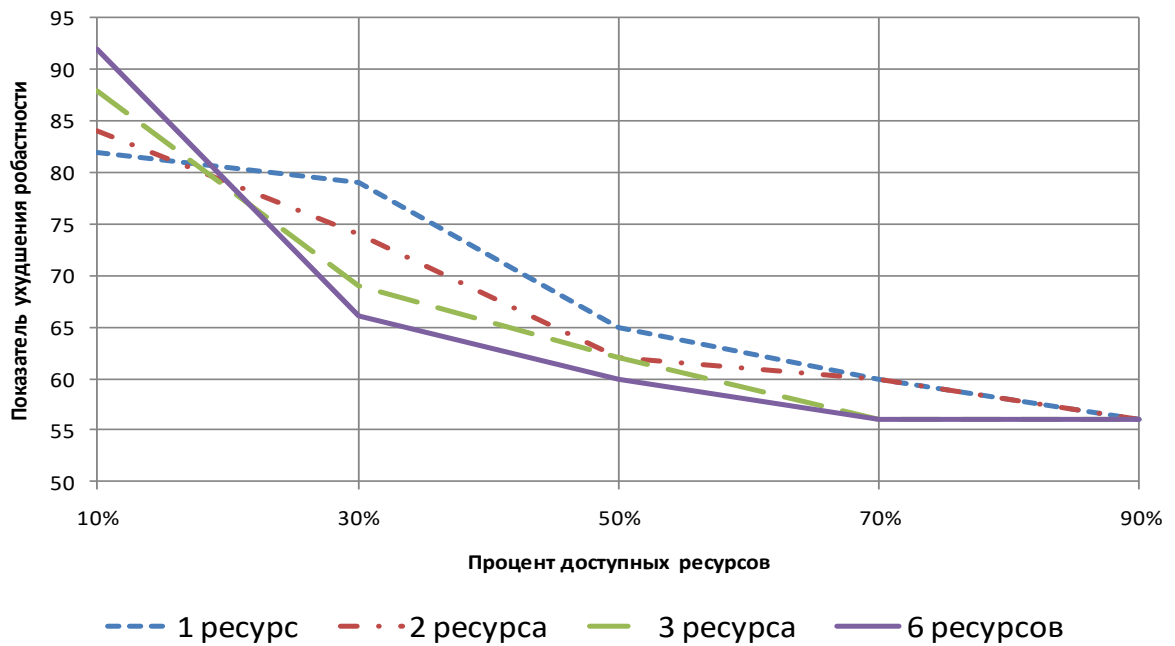


Рисунок 69. График зависимости показателя робастности от исходных данных

Более робастными являются решения, для которых показатель ухудшения робастности  $S$  (площадь пересечения областей  $\bar{D}_j^{(\xi)}$  и  $P_j$ , рассмотренных в параграфе 3.3) принимает наименьшее значение.

Таблица 9 – Значения показателя робастности

Количество ресурсов	Вместимость ресурса	Производительность ресурса	% работоспособных ресурсов				
			0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
6	1	10	92	66	60	56	56
3	2	20	88	69	62	56	56
2	3	30	84	74	62	60	56
1	6	60	82	79	65	60	56

Как показал анализ результатов проведенного эксперимента, декомпозиция суммарной производительности ресурсов, то есть использование их большего числа, но с меньшей производительностью, повышает робастность полученных решений в среднем на 24%.

В частности, выявлен ряд зависимостей:

При слабых возмущающих воздействиях (доступно 90% ресурсов) конфигурация ресурсов не оказывает влияния на робастность полученного решения.

По мере нарастания возмущающего воздействия внешней среды выигрыш в робастности имеют планы, реализуемые на декомпозированных ресурсах. Чем большее количество ресурсов используется, тем более робастным является решение.



При сильных возмущениях внешней среды (доступно не более 10% ресурсов) наоборот, большую робастность показывают планы, реализуемые на одном производительном ресурсе. Полученный результат объясняется тем, что производительность возмущённых декомпозированных ресурсов ( $R^{(п,1)} \cdot \xi^{(в,2)}$  и  $R^{(о,1)} \cdot \xi^{(в,1)}$ ) становится настолько мала, что ни один из них не способен самостоятельно выполнить некоторые операции реализуемой технологии. В данной ситуации уменьшение числа и повышение производительности ресурсов может повысить робастность плана.

Итак, можно сделать вывод, что для повышения робастности решения предпочтительнее использовать группу близких по характеристикам ресурсов вместо применения нескольких экземпляров вычислительных машин с уникальными характеристиками.

### 5.2.3. Программное обеспечение решения задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования центра управления полётом навигационными космическими аппаратами

Из приведённого выше описания задачи следует, что в данном примере разработанный программный комплекс должен функционировать в исследовательском режиме, то есть, акцент смещён в сторону работы аналитико-имитационных модулей без активного взаимодействия со внешней инфраструктурой и сторонними системами. Вместе с тем, существенно повысились требования к автоматизации проведения экспериментов с логико-динамическими моделями, а именно – формирование исходных данных для массовых расчётов и анализ множества полученных результатов. Так, программный комплекс был дополнен генератором моделей.

Генератор моделей – модуль, позволяющий автоматически создать модель, готовую к использованию в расчётном модуле. Значения каждого параметра операций и ресурсов контролируется пользователем путём задания допустимых интервалов его изменения. Созданные в генераторе модели помещаются в общий репозиторий моделей и могут быть использованы в расчётных модулях.

Для работы с большим количеством моделей использовались сценарные режимы работы, настраиваемые с помощью скриптов (исполняемых программ) на языке Python в консольном режиме. Первый скрипт отвечает за исследование влияния вида исходных данных на изменение показателя качества планирования с использованием предлагаемого в диссертации алгоритма по сравнению с заданным эвристическим решением. Второй скрипт предназначен для исследования влияния вида исходных данных на робастность синтезированных планов. В обоих случаях полный цикл моделирования состоял из следующих шагов:

1. Задание пользователем границ изменения каждого исследуемого параметра.
2. Задание шага изменения параметров.
3. Автоматическое создание модели с помощью разработанного генератора с учётом заданных параметров.
4. Проверка исходных данных на корректность.
5. Автоматический запуск расчётной процедуры.
6. Фиксирование в выходном файле рассчитанных показателей качества.

Итоговый анализ результатов проводился в ручном режиме с использованием различных средств анализа данных и построения графиков и диаграмм.

Благодаря применяемой архитектуре построения программного комплекса удалось достичь высокого уровня автоматизации проведения экспериментов, что позволило повысить обоснованность получаемых выводов.

#### 5.2.4. Пример решения задачи синтеза технологии и комплексных планов функционирования АСУ космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ)

**Дано:** известны следующие множества:  $A = \{A_i, i \in N = \{1, \dots, n\}\}$  – множество функций управления, которые необходимо реализовать в АСУ КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на заданном интервале времени  $T = (t_0, t_f]$ . Будем предполагать, что каждая функция управления реализуется соответствующим программным модулем (ПМ), в который заложена определенная функциональная избыточность (гибкость), позволяющая ему быть реализованным как в БКУ КА ДЗЗ, так и НКУ КА ДЗЗ.

Реализация функций управления КА ДЗЗ в рамках соответствующих технологических циклов управления (ТЦУ) гарантирует успешное достижение целей, поставленных на интервале времени  $T$ . Говоря о функциях управления, будем, прежде всего, различать функцию целеполагания, планирования (долгосрочного, оперативного), оперативного управления, контроля, учета, оценивания и анализа состояния АСУ КА ДЗЗ, складывающейся обстановки, функцию координации. С множеством  $A = \{A_i, i \in N\}$  непосредственно связано множество технологических операций  $D^{(i)} = \{D_{\alpha}^{(i)}, \alpha \in K = \{1, \dots, s_i\}\}$ , выполнение которых гарантирует успешную реализацию функции  $A_i, i = 1, \dots, n$ ; множество основных элементов и подсистем АСУ КА ДЗЗ (КА ДЗЗ, ретрансляторы (РТР), пункты обслуживания и управления (ОКИК), (ПУ)), обозначим его через  $B = \{B_j, j \in M = \{1, \dots, m\}\}$ ; также введем в рассмотрение множество технических комплексов (ТК) (с соответствующими ПМО и ИО), входящих в состав  $B_j$

подсистемы:  $C^{(j)} = \{C_\lambda^{(j)}, \lambda \in L = \{1, \dots, l\}\}$ . На данных ТК в  $B_j$  может быть реализована та или иная функция (функции) управления.

Будем считать известной матричную функцию  $E(t) = \|\varepsilon_{ij}(t)\|$ , элементы которой представляют из себя функции Хевисайда. При этом пусть  $\varepsilon_{ij}(t) = 1$ , если пространственно-временные и технические ограничения позволяют в момент времени  $t$  реализовать в подсистеме  $B_j$  функцию  $A_j$ ;  $\varepsilon_{ij}(t) = 0$  – в противоположном случае. Пусть информационное взаимодействие ТК в АСУ КА ДЗЗ осуществляется по дуплексным каналам связи (телефонным, телеграфным, радиоканалам).

На рисунке 70 для примера представлены семь возможных структурных состояний АСУ КА ДЗЗ, в которых может находиться данная система и её элементы в процессе применения по целевому назначению. Данным структурным состояниям соответствуют семь возможных сценариев изменения структурной динамики АСУ КА ДЗЗ, в рамках которых заданы варианты возмущающих воздействий как в интервальном виде, так и в виде импульсных потоков с известными вероятностно-статистическими характеристиками. На данном рисунке стрелками показаны варианты информационного взаимодействия этих элементов между собой. Указанные варианты соответствуют различным способам применения АСУ КА ДЗЗ, различному пространственному расположению её элементов и подсистем (в том числе ПМ) друг относительно друга.

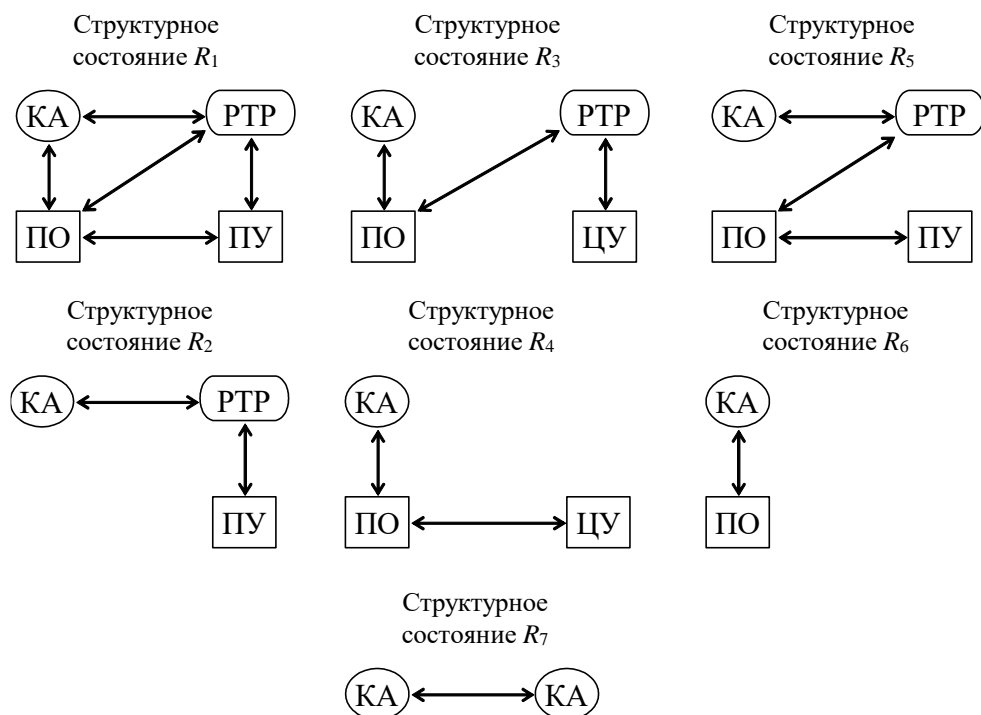


Рисунок 70. Примеры сравниваемых структурных состояний элементов и подсистем АСУ КА ДЗЗ

Содержательная постановка задачи синтеза технологий управления КА ДЗЗ, а также расчета показателей качества и эффективности распределения функции управления (и соответствующих ПМ) между ТК в АСУ КА ДЗЗ сводится к следующему: необходимо (с учетом перечисленных исходных данных известных пространственно-временных, технических и технологических ограничений) для каждого из заданных структурных состояний  $R_1, R_2, \dots, R_\chi$  АСУ КА ДЗЗ найти наилучшие варианты закрепления функций управления (ПМ) за её элементами и подсистемами, варианты планов выполнения технологических операций, обеспечивающих реализацию функций управления, а также произвести упорядочение перечисленных структурных состояний АСУ КА ДЗЗ в порядке их предпочтительности. Задание отношения предпочтения будет осуществляться с помощью системы показателей, характеризующей целевые и информационно-технологические возможности АСУ КА ДЗЗ, её структурно-технологические характеристики.

#### 5.2.5. Уточненное описание разработанного модельно-алгоритмического обеспечения решаемой задачи

Сформулированная задача относится к классу задач многокритериального оценивания, анализа и упорядочивания конечного множества альтернатив (в качестве которых рассматриваются структурные состояния АСУ КА ДЗЗ). Для её решения воспользуемся двухэтапной процедурой сужения множества альтернативных решений. На I этапе для детерминированных внешних условий проводится расчет показателей качества, характеризующих целевые и информационно-технологические возможности АСУ КА ДЗЗ, её структурно-технологические характеристики, характеристики ПМ. При разработке соответствующего алгоритма воспользуемся основными идеями, заложенными в основу метода вычисления приоритетов на основе парных сравнений (Pairwise prioritization) [237].

Алгоритм решения поставленной задачи на I этапе реализации указанной процедуры включает в себя следующие шаги [233, 235].

**Шаг 1.1.** На аналитических моделях (статических и динамических) для каждой из заданных структурных состояний  $R_1, R_2, \dots, R_\chi$  проводится оптимальное распределение функции управления (и соответствующих ПМ) между различными подсистемами АСУ КА ДЗЗ, планирование выполнения технологических операций и расчет показателей возможностей АСУ КА ДЗЗ, в качестве которых могут быть выбраны:

- общее число функций управлений, реализованных в её подсистемах на интервале  $T$ ;
- общее число КА ДЗЗ, находящихся в заданных макросостояниях;

- общее число технологических операций, выполненных на интервале  $T$ ;
- общая продолжительность реализации всех заданных функций управления на интервале  $T$ ;
- затраты ресурсов АСУ КА ДЗЗ при реализации данного варианта распределения ПМ.

При этом учет факторов неопределенности при расчете данных показателей будет производиться на **II этапе** реализации предложенной общей процедуры.

Для количественного оценивания перечисленных показателей рассмотрим следующую модель, в основу которой положена динамическая интерпретация процессов перераспределения функций управления в АСУ КА ДЗЗ и процессов выполнения соответствующих технологических операций. Данная модель сформирована на базе ранее представленных во 2 главе диссертации логико-динамических моделей:

$$\dot{x}_i^{(\phi)} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) u_{ij}^{(\phi)}; \quad \dot{x}_{i\alpha}^{(0)} = \sum_{\lambda=1}^l b_{i\alpha j\lambda} u_{i\alpha j\lambda}^{(0)}; \quad \dot{y}_{ij}^{(\phi)} = v_{ij}^{(\phi)}; \quad (5.63)$$

$$\sum_{j=1}^m u_{ij}^{(\phi)} \left[ \sum_{\alpha \in \Gamma_{i1}} (a_{\alpha}^{(\phi)} - x_{\alpha}^{(\phi)}) + \prod_{\beta \in \Gamma_{i2}} (a_{\beta}^{(\phi)} - x_{\beta}^{(\phi)}) \right] = 0; \quad (5.64)$$

$$\sum_{\lambda=1}^l u_{i\alpha j\lambda}^{(0)} \left[ \sum_{v \in \Gamma_{i\alpha 1}} (a_{i v j}^{(0)} - x_{i v j}^{(0)}) + \prod_{\mu \in \Gamma_{i\alpha 2}} (a_{i \mu j}^{(0)} - x_{i \mu j}^{(0)}) \right] = 0; \quad (5.65)$$

$$\sum_{i=1}^n u_{ij}^{(\phi)}(t) \leq 1; \quad \forall j; \quad \sum_{j=1}^m u_{ij}^{(\phi)}(t) \leq 1; \quad \forall i; \quad u_{ij}^{(\phi)}(t) \in \{0,1\} \quad (5.66)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{\lambda=1}^l u_{i\alpha j\lambda}^{(0)}(t) \leq 1, \quad \forall i, \forall \alpha; \quad \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^s u_{i\alpha j\lambda}^{(0)}(t) \leq 1, \quad \forall i, \forall \alpha; \quad u_{i\alpha j\lambda}^{(0)}(t) \in \{0, u_{ij}^{(\phi)}\}; \quad (5.67)$$

$$v_{ij}^{(\phi)}(a_{isj}^{(0)} - x_{isj}^{(0)}) = 0; \quad v_{ij}^{(\phi)}(t) \in \{0,1\}; \quad (5.68)$$

$$x_i^{(\phi)}(t_0) = x_{i\alpha}^{(0)}(t_0) = y_{ij}^{(\phi)}(t_0) = 0; \quad (5.69)$$

$$x_i^{(\phi)}(t_f) = a_i^{(\phi)}; \quad (a_{i\alpha j}^{(0)} - x_{i\alpha j}(t_f)) y_{ij}^{(\phi)}(t_f) = 0; \quad y_{ij}^{(\phi)}(t_f) \in \mathbf{R}^1; \quad (5.70)$$

$$J_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij}^{(\phi)}(t_f); \quad J_1^{(n)} = \sum_{j=1}^m v_{nj}^{(\phi)}(t_f); \quad J_2 = T - \sum_{i=1}^m y_{nj}^{(\phi)}; \quad (5.71)$$

где  $x_i^{(\phi)}(t)$  – переменная, значение которой в момент времени  $t$  равняется текущей длительности реализации функции  $A_i$  в подсистеме  $B_j$  для ситуации, когда  $u_{ij}^{(\phi)}(t) = 1$ ;

$x_{i\alpha j}^{(0)}$  – переменная, характеризующая состояние выполнения технологической операции  $D_{\alpha}^{(i)}$ ;  $y_{ij}^{(\phi)}$  – переменная, численно равная длительности интервала времени от момента завершения реализации функции  $A_i$  в подсистеме  $B_j$  до момента  $t = t_f$ ;  $a_{\alpha}^{(\phi)}, a_{\alpha}^{(0)}, a_{\gamma}^{(0)}, a_{i\nu j}^{(0)}, a_{i\mu j}^{(0)}$  – заданные величины (краевые условия), значения которых должны (либо могут) принять соответствующие переменные  $x_i^{(\phi)}(t), x_{\alpha}^{(\phi)}(t), x_{\gamma}^{(\phi)}(t), x_{i\nu j}^{(0)}(t), x_{i\mu j}^{(0)}(t)$  в конце интервала планирования в момент времени  $t = t_f$ ;  $u_{ij}^{(\phi)}, u_{i\alpha j\lambda}^{(0)}, v_{ij}^{(\phi)}$  – управляющие воздействия, при этом  $u_{ij}^{(\phi)}(t) = 1$ , если функция  $A_i$  реализуется в подсистеме  $B_j$ ,  $u_{ij}^{(\phi)}(t) = 0$  – в противоположном случае;  $u_{i\alpha j\lambda}^{(0)}(t) = 1$ , если технологическая операция  $D_{\alpha}^{(i)}$  выполняется на ТК  $C_{\lambda}^{(j)}$ ,  $u_{i\alpha j\lambda}^{(0)}(t) = 0$  – в противоположном случае;  $v_{ij}^{(\phi)} = 1$ , если функция  $A_i$  была реализована в подсистеме  $B_j$ ,  $v_{ij}^{(\phi)} = 0$  – в противоположном случае;  $\Gamma_{i1}, \Gamma_{i2}$  – множество номеров функций управления, непосредственно предшествующих функции управления  $A_i$  (согласно ТЦУ элементами и подсистемами АСУ КА ДЗЗ) и логически связанных с ней с помощью операции «И» и «ИЛИ» соответственно;

$\Gamma_{i\alpha 1}, \Gamma_{i\alpha 2}$  – множество номеров технологических операций  $D_{\nu}^{(i)}$  и  $D_{\mu}^{(i)}$ , непосредственно предшествующих операции  $D_{\alpha}^{(i)}$  и логически связанных с ней с помощью операций «И» и «ИЛИ» соответственно. Для экономии места наряду с перечисленными соотношениями (5.63) – (5.71) при расчете планов распределения функций управления КА ДЗЗ (и соответствующих программных модулей) использовалась и динамическая модель управления потоками в АСУ КА ДЗЗ (модель  $M^{(n)}$ , см. формулу (2.40)).

Таким образом, с помощью ограничений вида (5.64) и (5.65) задаются возможные последовательности реализации функций управления и технологических операций. Согласно ограничениям вида (5.66) и (5.67), в каждый текущий момент времени функция  $A_i$  может реализовываться только в одной подсистеме  $B_j$  ( $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$ ), и наоборот, в каждой подсистеме  $B_j$  может в каждый момент времени реализовываться только одна функция  $A_i$ . По аналогии с данными ограничениями должны выполняться похожие по своему содержанию ограничения применительно к технологическим операциям  $D_{\alpha}^{(i)}$  при их выполнении на ТК  $C_{\lambda}^{(j)}$ .

С помощью соотношения (5.68) задаются условия, при которых происходит срабатывание вспомогательного управляющего воздействия  $v_{ij}^{(\phi)}(t)$ ; соотношения (5.69) и (5.70) задают ограничения на значения фазовых переменных в моменты времени  $t = t_0, t = t_f$  (краевые условия),  $R^1$  – множество положительных вещественных чисел;  $J_0, J_1^{(n)}, J_2$  – показатели качества распределения функций управления (ПМ) в АСУ КА ДЗЗ, при этом  $J_0$  характеризует общее число реализованных функций управления в АСУ КА ДЗЗ в момент

времени  $t = t_f$ ;  $J_1^{(n)}$  характеризует количество подсистем АСУ КА ДЗЗ, в которых была реализована функция управления  $A_n$ ,  $J_2$  – показатель, характеризующий длительность интервала времени, за который в АСУ КА ДЗЗ были реализованы все требуемые функции управления. Для учета факторов неопределенности в построенной модели целесообразно соотношения (5.63)-(5.71) дополнить имитационной моделью процесса реализации плана распределения функций управления. В этом случае в рамках созданного аналитико-имитационного комплекса, основываясь на концепциях, методах и алгоритмах системного моделирования, можно построить соответствующие процедуры межмодельного согласования [237, 238]. Указанный учет проведем на **II этапе** реализации предложенной общей процедуры.

В целом расчет экстремальных значений показателей целевых и информационно-технологических возможностей (Ц и ИТВ) АСУ КА ДЗЗ на основе предложенной модели (5.63)-(5.71) сводится к решению задачи оптимального управления конечномерной дифференциальной динамической системой со смешанными ограничениями. В работах [76, 232, 239-240] подробно изложены конкретные алгоритмы решения такого рода задач, особенности их программной реализации.

На **шаге 1.2** обобщенного алгоритма решения рассматриваемой задачи осуществляется расчет структурно-топологических показателей распределения функций управления (распределения ПМ) АСУ КА ДЗЗ, к которым были отнесены [240]: показатель (коэффициент) достижимости  $J_4$ ; показатели компактности структуры (радиус структуры  $J_5$ , диаметр структуры  $J_6$ , интегральный показатель структурной компактности  $J_7$ ); показатели централизованности (децентрализованности) структуры  $J_8$ . Расчет данных показателей проводится по аналитическим формулам, приведенным в работе [240].

**Шаг 1.3.** На основе экспертного опроса формируется матрица попарного сравнения перечисленных ранее показателей Ц и ИТВ –  $K_{cp}$ .

**Шаг 1.4.** В соответствии с алгоритмом, предложенным в работе [240], по матрице  $K_{cp}$  проводится восстановление относительных весов (коэффициентов важности) показателей, оценивающих варианты распределения функций управления для каждого заданного структурного состояния АСУ КА ДЗЗ. С этой целью осуществляется поиск нормированного к единице собственного вектора этой матрицы  $\bar{\omega}_{cp}$ , соответствующего максимальному собственному числу  $\rho_{max}$ . Для этого должно быть решено уравнение следующего вида:

$$(\mathbf{K}_{cp} - \rho_{max} \mathbf{I}) \bar{\omega}_{cp} = 0, \quad (5.72)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Далее проводится поиск относительного веса каждого варианта структурного состояния ( $R_1, R_2, \dots, R_\chi$ ) АСУ КА ДЗЗ по каждому показателю в отдельности (формирование матрицы  $\mathbf{K}_{\text{отн}}$ ). В каждом столбце матрицы  $\mathbf{K}_{\text{отн}}$  указаны относительные веса, приписываемые соответствующему структурному состоянию по соответствующему показателю. После этого строится взвешенная сумма заданных показателей с заданными коэффициентами для каждой альтернативы  $R_1, \dots, R_\chi$ . Другими словами, производится поиск результирующих наборов весов каждого из структурных состояний. Для этого необходимо умножить матрицу  $\mathbf{K}_{\text{отн}}$  на вектор  $\omega_{\text{ср}}$ :

$$\mathbf{K}_{\text{отн}} \omega_{\text{ср}} = \omega^* . \quad (5.73)$$

**Шаг 1.5.** Производится упорядочение структурных состояний, наилучшим считается то структурное состояние, которому соответствует максимальный элемент вектора  $\omega^*$ . Каждый из указанных элементов вектора  $\omega^*$  можно интерпретировать как результирующий вес каждого структурного состояния.

В табл. 10 представлены результаты расчета показателей примера. В качестве исходных данных в данном примере были выбраны следующие величины: максимальное число КА ДЗЗ – 18, число ОКИК – 10, РТР – 4, ПУ – 1. Моделирование и анализ проводился для структурных состояний АСУ КА ДЗЗ, изображенных на рис. 70, матрица  $K_{\text{ср}}$  представлена на рис. 71. При сравнении и выборе вариантов распределения функций управления в АСУ КА ДЗЗ использовались целевые функции:  $J_1, J_2, \dots, J_8$ .

$$\mathbf{K}_{\text{ср}} = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 & 3 & 6 & 5 & 7 & 7 \\ 0,5 & 1 & 2 & 1 & 2 & 4 & 7 & 5 \\ 0,25 & 0,5 & 1 & 5 & 6 & 4 & 6 & 4 \\ 0,33 & 1 & 9,2 & 1 & 1 & 3 & 6 & 3 \\ 0,16 & 0,5 & 0,16 & 1 & 1 & 3 & 5 & 3 \\ 0,2 & 0,25 & 0,25 & 0,33 & 0,33 & 1 & 5 & 2 \\ 0,14 & 0,14 & 0,16 & 0,16 & 0,2 & 0,2 & 1 & 1 \\ 0,14 & 0,2 & 0,25 & 0,33 & 0,33 & 0,5 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Рисунок 71. Матрица попарного сравнения показателей качества распределения функций управления в АСУ КА ДЗЗ



Таблица 10 – Значение показателей качества синтеза технологии и плана

Варианты структурных состояний	Показатели качества синтеза технологии и плана	
	J0	J2
1	10	19
2	6	30
3	13	15
4	12	17
5	10	20
6	15	18
7	15	12

В результате проведенных расчетов рассматриваемые структурные состояния АСУ КА ДЗЗ были упорядочены следующим образом:

$$R_1 \succ R_3 \succ R_5 \succ R_4 \succ R_6 \succ R_2 \succ R_7.$$

На полученное распределение структурных состояний АСУ КА ДЗЗ существенное влияние оказывала конкретная навигационно-баллистическая обстановка, складывающаяся на конкретном интервале времени в рамках заданного сценария. В частности, для низкоорбитальных КА ДЗЗ, решающих задачи дистанционного зондирования Земли, количество зон взаимодействия с наземными пунктами обслуживания (ОКИК) и управления (ЦУП) на интервале являются весьма ограниченными. Это относится и к зонам взаимной видимости КА ДЗЗ друг друга.

При этом для каждого из структурных состояний удалось получить оптимальный вариант распределения функций управления (ПМ) между элементами АСУ КА ДЗЗ, характеристики ПМ и соответствующий план выполнения технологических операций. В самом деле, если внимательно рассмотреть содержание моделей представленных выше (5.63) – (5.71), становится ясно, что с помощью управляющих воздействий вида  $u_{ij}^{(\phi)}$ ,  $u_{i \in j \lambda}^{(0)}$ ,  $v_{ij}^{(\phi)}$  определяется план закрепления функций управления (и соответствующих программных модулей) за узлами (подсистемами АСУ КА ДЗЗ), а с помощью управляющих воздействий вида  $u_{i \phi j \rho}^{(n,1)}$ , характеризующих интенсивность передачи (приема) данных и информации  $\rho$  от узла  $A_i$  к узлу  $A_j$ , а также обработки данных и информации в указанных узлах, могут быть предъявлены требования к качеству соответствующих моделей, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих передачу (прием) данных и информации.

Данный результат можно рассматривать как пример варианта решения задачи формирования требований к качеству моделей сложных объектов (модель здесь трактуется широко, включая в себя и алгоритмическую составляющую).

На *II этапе* решения рассматриваемого примера постараемся учесть при оценивании предложенных вариантов распределения функций управления влияния факторов неопределенности, связанных с воздействием внешней среды.

#### 5.2.6. Результаты решения задачи синтеза технологии и комплексного плана функционирования АСУ космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ)

В завершение данной главы приведем еще один пример решения задачи выбора управляющих воздействий и структурных параметров, обеспечивающих многокритериальный структурно-функциональный синтез текущего облика АСУ КА ДЗЗ (в том числе технологии автоматизированного управления КА ДЗЗ) и его модельно-алгоритмического и программного обеспечения, а также оптимальное управление её структурами. Данный класс задач в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов (ПМК) получил название «обратные задачи квалиметрии» (в отличие от прямых задач квалиметрии).

Постановка задачи данного класса применительно к рассматриваемому примеру состоит в следующем. Заданы технологические, топологические и функциональные структуры АСУ КА ДЗЗ, а также соответствующие пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с решением задач управления КА ДЗЗ. На рис. 72 представлен пример задания технология (функциональной структуры) сбора, обработки информации и формирования управляющих воздействий в АСУ КА ДЗЗ. Каждому блоку на рисунке соответствует своя функция управления и соответствующий программный модуль. Применительно к перспективным системам сбора и обработки информации, создаваемым в настоящее время в отечественной космической отрасли на базе киберфизических систем и облачных сервисов содержание перечисленных блоков представлено на рис. 73.

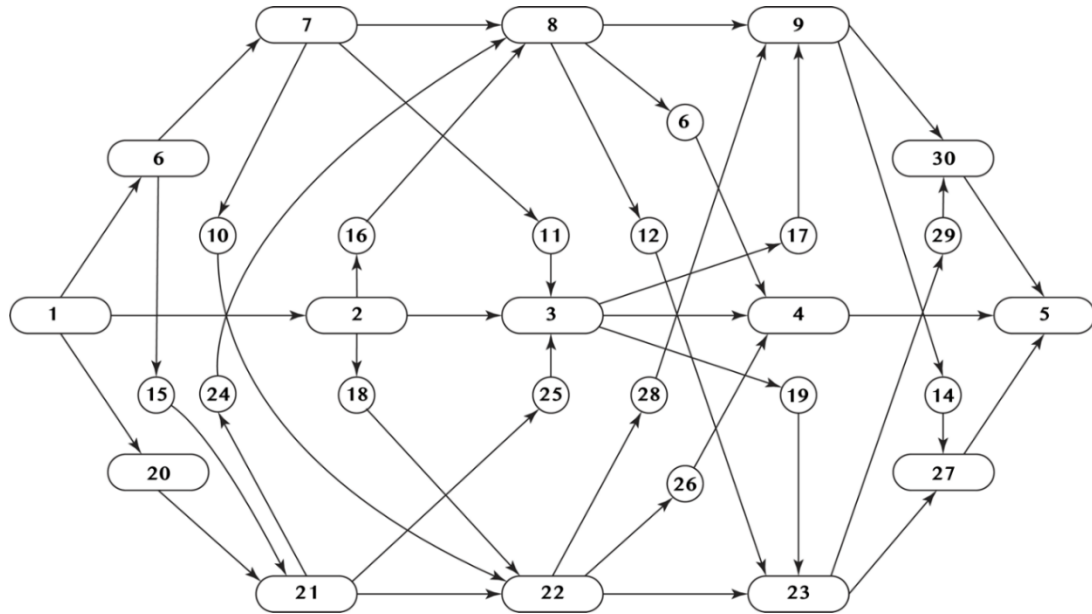


Рисунок 72. Технология решения задач сбора, обработки данных и формировании управляющих воздействий в АСУ КА ДЗЗ

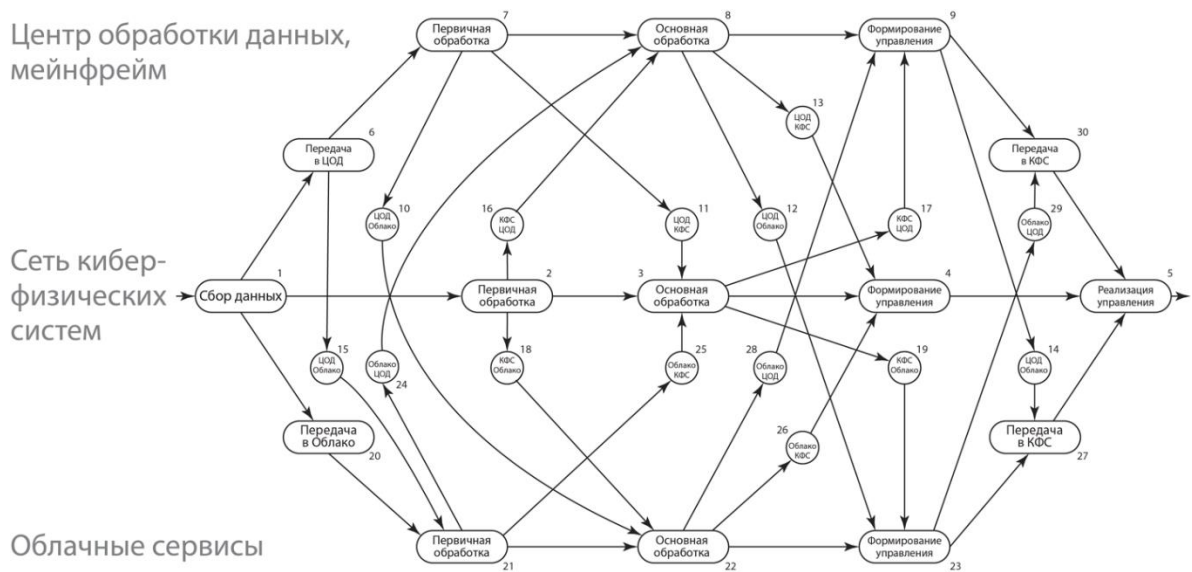


Рисунок 73. Перечень и взаимосвязь выполняемых в АСУ КА ДЗЗ функций управления, а также программных модулей, их реализующих на основе концепции киберфизических систем

Требуется найти наилучший вариант распределения функций управления и соответствующих программных модулей в АСУ КА ДЗЗ. В отличие от задачи класса А в данном случае мы рассматриваем не какие-то фиксированные варианты распределения функций, а все

возможное множество указанных вариантов. Другими словами, решается задача синтеза, которую с помощью разработанного полимодельного комплекса и комбинированных методов оптимизации удалось свести к задаче оптимального программного управления, а ее, в свою очередь, к двухточечной краевой задаче [76, 126, 57, 241].

В табл. 11 приведены результаты машинных экспериментов с разработанным комплексом программ для двух сценариев распределения функций управления и программных модулей в АСУ КА ДЗЗ на интервале времени, равном 1440 минут (1 сутки).

Таблица 11 – Результаты машинных экспериментов

Показатель	Программные модули																														Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Сценарий 1	Алгоритм: FIFO																														
	Время	2			2				2												1	4	4						2	5	22
	Энергия	20			20				30												30	120	120					60	75	475	
	Алгоритм: Оптимизация																														
Время	2		4	4	2	4	4				3																			23	
Энергия	20		40	40	20	40	60				45																			265	
Сценарий 2	Алгоритм: FIFO																														
	Время	4		8		4	8	8			6									12								8		8	66
	Энергия	40		80		40	80	120			90									120								240		240	1050
	Алгоритм: Оптимизация																														
Время	4	5		4	4			6	2				4			4					1	4					3			5	46
Энергия	40	50		40	40			90	30				60			40					30	120					90			75	705

В рамках первого сценария осуществлялось конфигурирование программных модулей, общее число которых равнялось 30 (для одного космического аппарата). Для второго сценария рассматривались уже два КА ДЗЗ (общее число программных модулей, которые могли в этом случае быть распределены, равнялось 60). В качестве показателей оптимизации рассматривались

показатель затрат времени на сбор, обработку, анализ информации и формирование управляющих воздействий, а также показатель затрат ресурсов (энергетики) при реализации соответствующих планов распределения функций (программных модулей).

На рис. 74 – 77 в графическом виде представлены (эвристические) и оптимальные планы распределения функций управления (программных модулей) для рассматриваемых сценариев изменения внешней обстановки. Из анализа результатов машинных экспериментов следует, что за счет оптимизации могут быть улучшены значения соответствующих показателей на 25–30%.

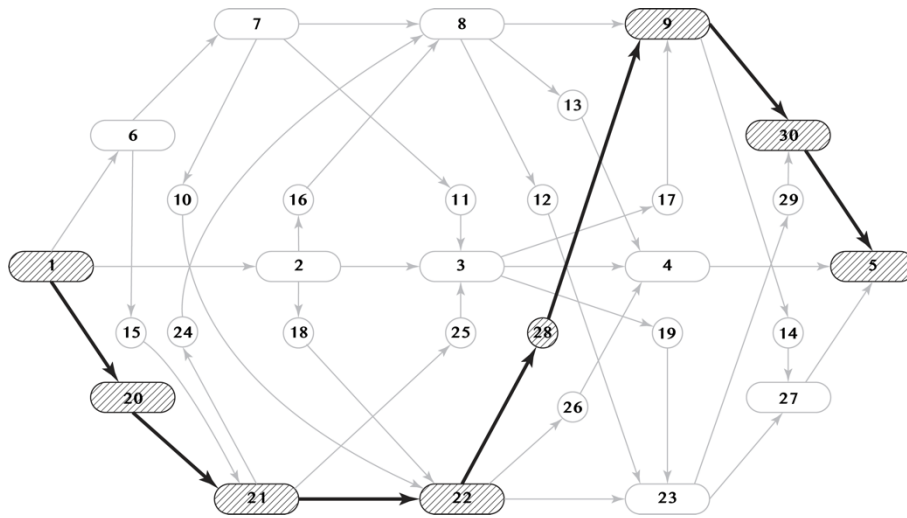


Рисунок 74. Конфигурирование программных модулей по первому сценарию (эвристический план)

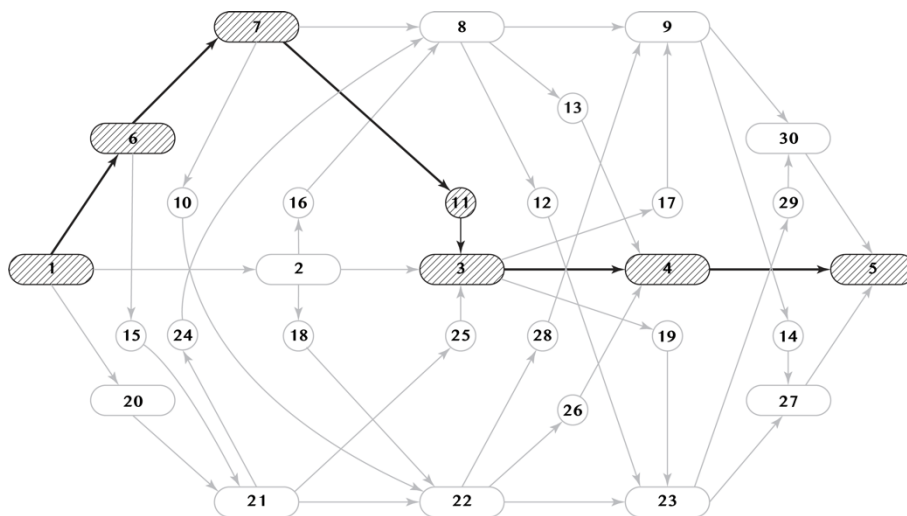


Рисунок 75. Конфигурирование программных модулей по первому сценарию (оптимальный план)

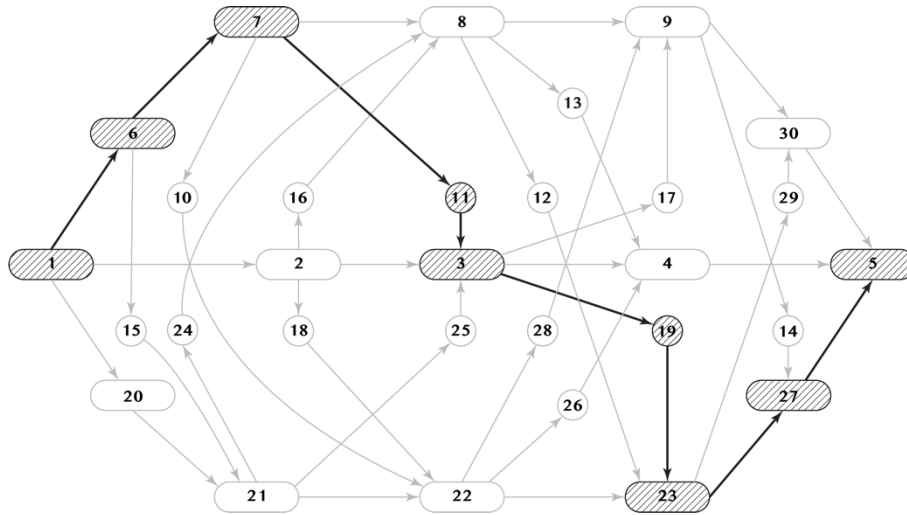


Рисунок 76. Конфигурирование программных модулей по второму сценарию  
(эвристический план)

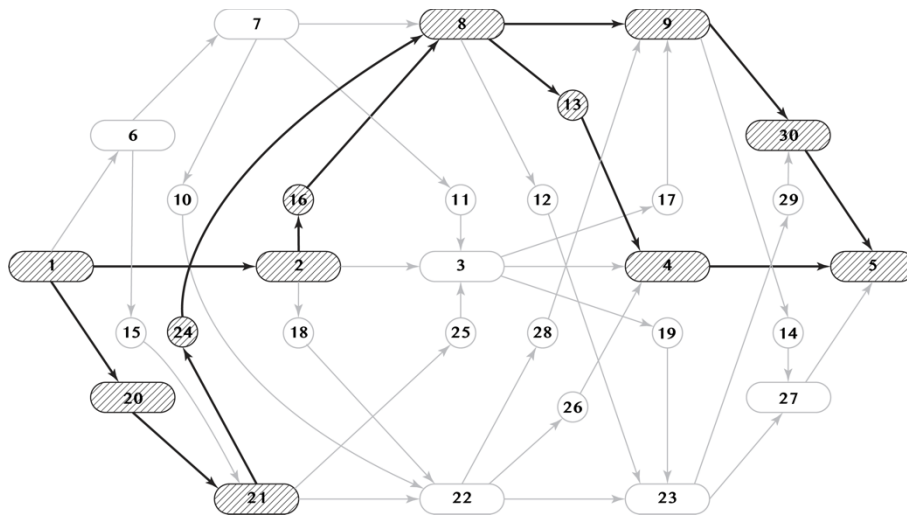


Рисунок 77. Конфигурирование программных модулей по второму сценарию  
(оптимальный план)

Основное отличие и достоинство предложенного подхода к формированию (синтезу) требуемых значений показателей качества моделей, методов и программ автоматизированного управления космическими аппаратами состоит в том, что через предложенный полимодельный комплекс данные показатели в явном виде связаны многочисленными причинно-следственными отношениями с множеством параметров и характеристик, определяющих облик АСУ КА ДЗЗ. Это открывает широкие перспективы по проведению дальнейшей многокритериальной многоструктурной оптимизации как самой АСУ КА ДЗЗ, так и технологий её функционирования.

### 5.2.7. Программное обеспечение решения задачи синтеза технологии и комплексного плана функционирования АСУ космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ)

Аналогично примеру, описанному в п. 5.3, в данном случае используется исследовательский режим работы созданного программного комплекса. Кроме того, модуль генератора исходных данных дополнен новой функциональностью – реализована возможность задания степени альтернативности технологического процесса с помощью трёх параметров: «ветвление» отвечает за количество параллельных дуг графа, выходящих из одной вершины, «минимальная длина ветви» и «максимальная длина ветви» определяют разницу в количестве операций на параллельных ветвях альтернативном графе.

При формировании модели происходит валидация её параметров, а также процедура фильтрации дуг графа с целью приведения его к простому ориентированно связному виду.

Основной пользовательский интерфейс, реализованный в виде веб-приложения с использованием фреймворка React, представлен на рисунке 78.

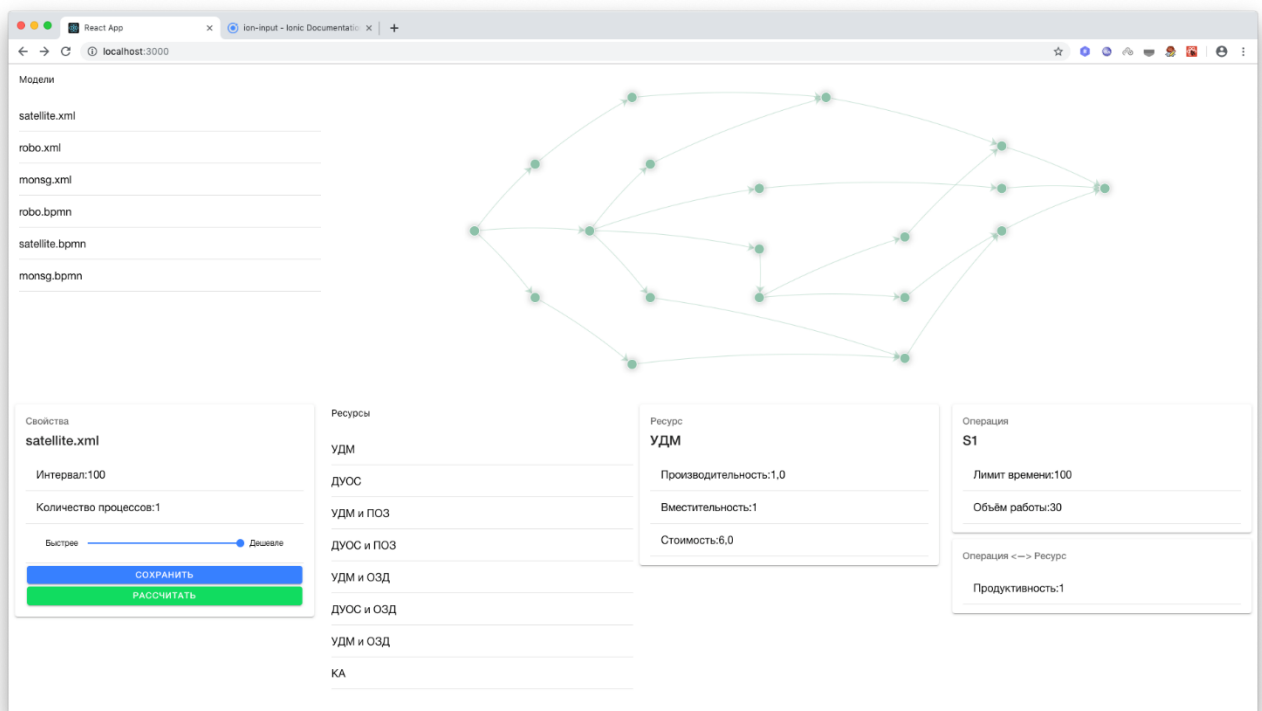


Рисунок 78. Пример пользовательского интерфейса разработанного программного комплекса

Разработанный программный комплекс обеспечивает решение следующих задач:

1. Загрузка и отображение альтернативного графа реализации технологий и комплексных планов функционирования центра управления полётом навигационными космическими аппаратами, а также перечня исполнительных подсистем и их параметров.
2. Редактирование параметров операций и исполнительных подсистем, задание коэффициентов перед частными показателями качества, а также характеристик их взаимосвязи.
3. Расчёт дополнительных контуров управления реконfigurацией навигационных космических аппаратов за счёт перераспределения функций обработки и анализа информации между узлами НКУ.
4. Отображение расчётов и вывод графической и текстовой информации о ходе вычислений.
5. Выделение цветом на альтернативном графе синтезированной технологии функционирования ЦУП НКА.
6. Отображение показателей качества синтезированной технологии.

Для начала работы пользователю предлагается выбрать исходную модель, содержащую альтернативный технологический граф, а также параметры операций и ресурсов. При этом модель может быть как во внутреннем разработанном формате XML, так и в формате BPMN с набором необходимых расширений, описанным выше в п. 4.2.

После выбора модели выполняется загрузка и отображение в интерфейсе соответствующих исходных данных:

- альтернативный граф выполнения операций в ЦУП НКА;
- параметры всех операций, входящих в альтернативный граф;
- перечень исполнительных подсистем;
- параметры всех исполнительных подсистем;
- параметры взаимосвязи операций и исполнительных подсистем.

В пользовательском интерфейсе предусмотрена специальная цветовая индикация для привлечения внимания к узлам графа с отсутствующими или некорректными значениями параметров, которые могут быть скорректированы с помощью соответствующих веб-форм.

Параметры операций могут быть изменены из пользовательского интерфейса. Для этого необходимо на графе нажать требуемую вершину. В появившемся окне доступны для редактирования два параметра: лимит времени и объём работы.

Для редактирования параметров исполнительных подсистем необходимо выбрать одну из них в списке «Ресурсы». В открывшемся окне доступны для редактирования три параметра:



производительность подсистемы, вместимость (количество параллельно обрабатываемых задач), стоимость (энергетические затраты в единицу времени работы).

Если одновременно выбрана операция и исполнительная подсистема, то появляется третье окно параметров – взаимодействие операции и подсистемы. Доступен один параметр – продуктивность, ограничивающий производительность подсистемы при выполнении выбранной операции.

После задания исходных данных расчётная процедура запускается кнопкой «Расчитать» в нижней части интерфейса. При этом интерфейс переходит в режим отображения расчётов (рисунок 79).

В ходе вычислений в оперативном режиме обновляются графики частных показателей качества и внутренних показателей качества вычислений. Также наглядно на графе отображается синтезируемая технология в виде подсвеченных вершин и дуг.

В левой нижней части экрана выводится служебная информация о состоянии вычислений. Справа – список показателей качества на каждой итерации вычислительного процесса.



Рисунок 79. Вывод консоли вычислительного модуля в процессе расчётов.

Так, альтернативный граф является основным средством отображения результатов работы программного комплекса.

Синтезированная технология реконфигурации ЦУП записывается в текстовый файл в XML структуре. Данный файл может использоваться другими модулями программного комплекса в дальнейшей работе. Обобщённые результаты проведённого моделирования также сохраняются в общий текстовый файл в формате CSV (comma-separated values) для проведения их дальнейшего анализа [236].

Проведение экспериментов с целью оценивания робастности реализуется с помощью сценариев на языке Python. В указанных сценариях допускается задавать допустимые границы показателей качества планов функционирования ЦУП НКА и диапазоны вариаций возмущающих воздействий для построения областей достижимости рассматриваемой динамической системы в пространстве показателей качества. В результате данной процедуры в общий текстовый файл результатов экспериментов вносятся данные о рассчитанных показателях робастности для каждой синтезированной технологии и соответствующих планов.

### **5.3. Математическое и программное обеспечение решения задач управления информационными процессами в системе оперативного прогнозирования речных наводнений**

#### **5.3.1. Содержательное описание задачи**

Задача управления информационными процессами в системе прогнозирования речных наводнений в классификации, используемой Консорциумом промышленного интернета, относится к разделу «Умный город» и по значимости не уступает остальным областям применения киберфизических систем. Это вызвано тем, что по повторяемости и величине наносимого ущерба наводнения представляют наибольшую опасность среди всех природных катастроф: более половины жертв всех стихийных бедствий и минимум треть наносимого ими экономического ущерба связаны с наводнениями. На территории Российской Федерации общая площадь паводкоопасных районов достигает 400 тыс. кв. километров, из которых ежегодно затапливаются до 50 тыс. кв. километров. Затоплению подвержены отдельные территории 746 городов, в том числе более 40 крупных, тысячи населенных пунктов с населением около 4,6 млн. человек, хозяйственные объекты и более 7 млн. гектаров сельскохозяйственных угодий [242-244].

В рамках проекта, в котором часть работ выполнена диссертантом, был разработан и успешно апробирован на практике полнофункциональный прототип системы оперативного многомодельного прогнозирования речных наводнений, эксплуатируемый при наводнении 2018

года на участке русла реки Северная Двина от г. Великий Устюг до г. Котлас (проект №17-11-01254, осуществлялся при финансовой поддержке Российского научного фонда).

В ходе работ над проектом было установлено, что для достижения высокого качества прогнозов принципиально важным является использование при расчетах не одной, а комплекса (ансамбля) гидрологических и гидродинамических моделей с возможностью выбора их типа и параметров в зависимости от особенностей участка моделирования, характера движения воды по руслу и пойме, состава исходных данных и ряда других факторов [245-247]. Это связано с тем, что, как правило, не существует универсальной модели, пригодной для описания процессов развития наводнений на различных по протяженности и конфигурации участках рек. В зависимости от протяженности участка мониторинга и наличия исходной информации возможен выбор между одномерными гидродинамическими моделями для протяженных (100 – 1000 км) участков, и двумерными моделями для участков речных долин длиной менее 100 км при значительной ширине русел и пойм, их сложной конфигурации, расположении различных сооружений в руслах и на поймах [248].

Вместе с тем, для каждой модели, входящих в рассматриваемый полимодельный комплекс (ПМК) были целенаправленно введены две группы параметров, позволяющих осуществлять на конструктивном уровне их параметрическую и структурную адаптацию к изменяющейся обстановке: параметры моделей, настраиваемые на основе реально поступающих данных от соответствующих измерительных средств (например, гидропостов либо со смартфонов); параметры моделей, настраиваемые на основе аналитико-имитационных экспериментов, в ходе которых проигрываются возможные сценарии развития будущих событий. Примерами таких параметров могут быть коэффициенты гидрологического сопротивления для различных участков потенциально затопляемых территорий, геометрические размеры расчетной области затопления, значения требуемой точности численных расчетов и другие.

В указанных условиях возникает противоречие, заключающееся в том, что, с одной стороны, использование полимодельного подхода, предполагающего наличие комплекса гидрологических моделей и применение наиболее адекватной из них для каждой конкретной ситуации, а также процедур их структурной и параметрической адаптации существенно повышает качество прогноза, но, с другой стороны требует включения в процесс прогнозирования дополнительных операций выбора типа модели и настройки её параметров, что может препятствовать оперативному получению результатов прогноза [249].

При разработке систем оперативного прогнозирования наводнений кроме гидрологического и гидродинамического моделирования большое значение имеет применение современных информационных технологий, обеспечивающих оперативное получение и ввод

исходных данных, их обработку, интерпретацию результатов моделирования и представление их в доступной форме заинтересованным лицам. Основными компонентами данной системы являются [248]:

- подсистемы получения, ввода и интегрированной обработки данных наземных измерений и материалов аэрокосмосъемки;
- информационно-моделирующая подсистема, включающая комплекс гидрологических и гидродинамических моделей, а также технологии выбора и адаптации указанных моделей;
- подсистема визуализации и доступа к результатам моделирования на основе геопортальных решений и веб-технологий.

Детальная схема используемой в проекте системы представлена на рис. 80.

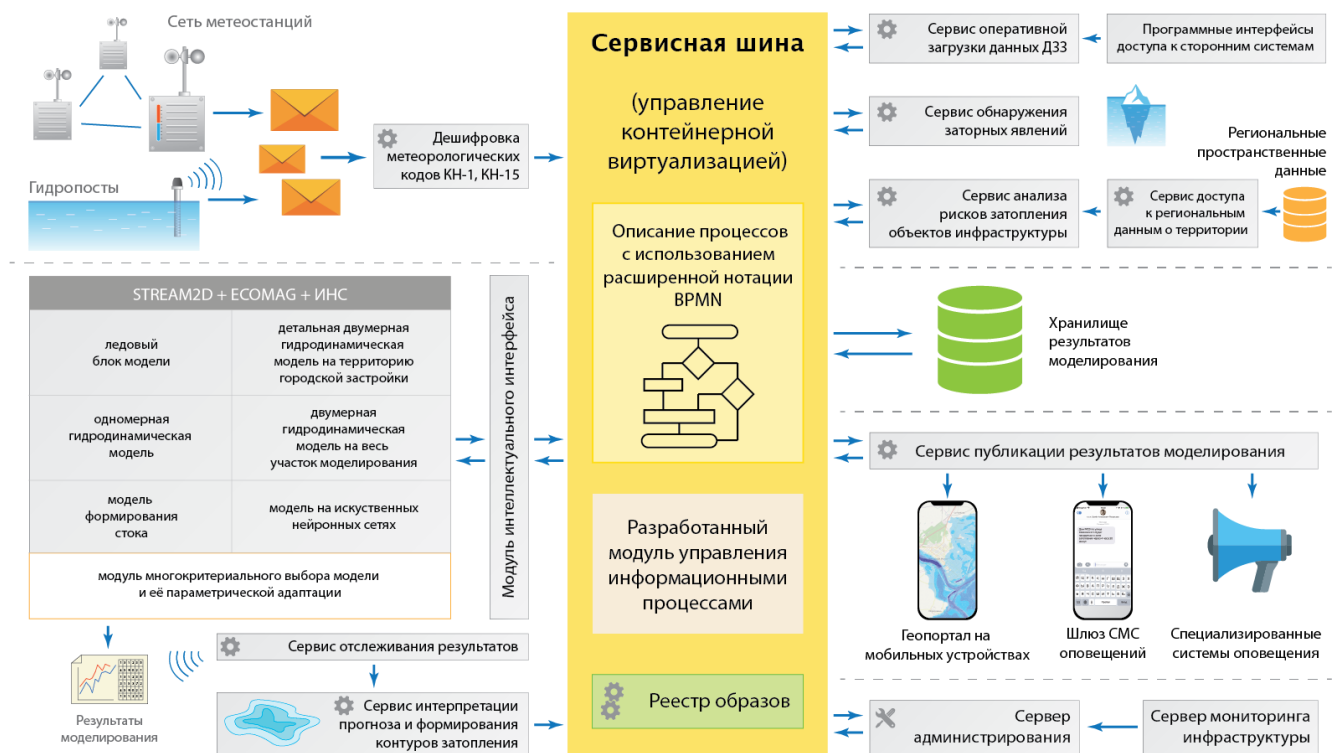


Рисунок 80. Детальная схема системы оперативного прогнозирования наводнений и место в ней разработанного модуля управления информационными процессами

В соответствии с описанной в первой главе диссертации концепцией туманных вычислений можно распределить все элементы, представленные на схеме на рисунке 80 по уровням, описанным в п. 4.3:

1. *Уровень 1.* Автоматизированные гидрологические комплексы (АГК) представляют собой типовую киберфизическую систему, производящую измерения физического мира и передающую данные через сеть интернет. На них возложены функции формирования сообщений в специальных метеорологических форматах и пересылки их на следующие уровни системы. Некоторые АГК также могут выполнять расчёты величин расхода воды по косвенным признакам.
2. *Уровень 2.* Станции приёма данных с АГК и рабочие станции специалистов-гидрологов – представители микроцентров обработки данных. Перечень выполняемых ими задач следующий:
  - дешифровка сообщений от гидропостов;
  - расчёт величин расхода воды;
  - хранение данных с АГК;
  - передача данных на следующие уровни системы.
3. *Уровень 3.* Вычислительное оборудование узлов связи отделений гидрометеорологической службы формирует множество граничных вычислительных устройств. С их помощью реализуются более ресурсоёмкие вычисления, такие как:
  - анализ рисков затопления инфраструктуры;
  - обнаружение заторных явлений;
  - распространение результатов моделирования;
  - обработка метеоданных;
  - хранение данных с АГК и метеоданных;
  - гидрологическое моделирование.
4. *Уровень 4.* Облачная инфраструктура на условиях аренды вычислительных мощностей по запросу в большей степени ориентирована на проведение гидрологического и гидродинамического моделирования. Перечень реализуемых функций выглядит следующим образом:
  - анализ рисков затопления инфраструктуры;
  - обнаружение заторных явлений;
  - прогнозирование уровня воды на основе нейронных сетей;
  - гидрологическое моделирование;
  - гидродинамическое моделирование;
  - параметрическая и структурная адаптация моделей;
  - интерпретация результатов моделирования;
  - распространение результатов моделирования.

Особенности созданного программного обеспечения и организации вычислений на его основе состоят в том, что одни и те же модели, методы, алгоритмы и программы можно реализовывать на различных уровнях системы оперативного прогнозирования наводнений, но с разными вычислительными затратами. Это и создаёт функциональную избыточность, позволяющую на этапе реализации гибко реагировать на складывающуюся обстановку и распределять задачи по уровням данной системы. На рисунке 81 представлен пример альтернативного графа технологического цикла оперативного моделирования наводнений, с помощью которого конструктивно задаётся указанная выше функциональная избыточность.

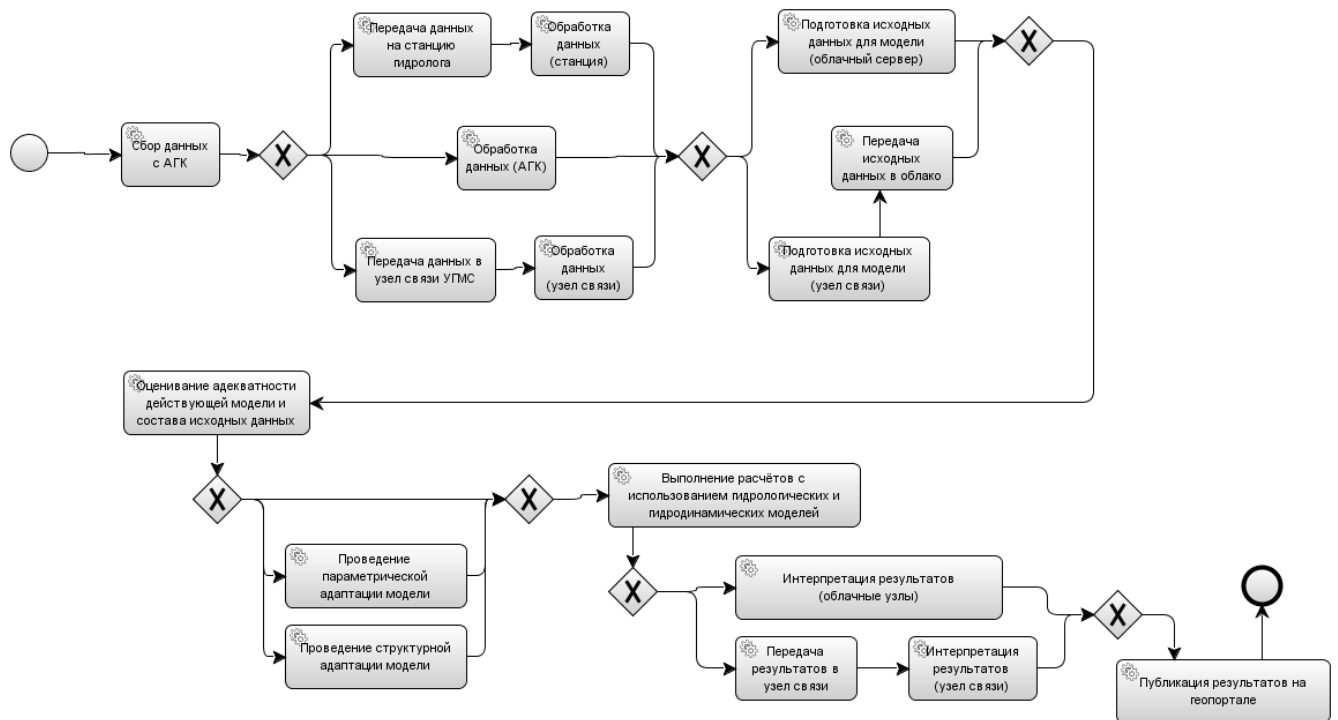


Рисунок 81. Агрегированный альтернативный граф технологического цикла оперативного моделирования наводнений

Таким образом, возникает актуальная научно-техническая задача выбора и оптимизации такой технологии обработки данных и информации и соответствующего комплексного плана управления информационными процессами, при которых бы обеспечивался наилучший уровень адекватности моделирования и точности прогнозирования паводка при заданных временных ограничениях.

Элементы рассматриваемой системы прогнозирования наводнений, как типичного представителя класса киберфизических систем, изменяют свои характеристики под действием внешних и внутренних факторов (доступность узлов системы, разрушение гидростов, разрыв каналов связи, исчерпание ресурсов автономных источников энергии). Кроме того, согласно

[247], при проведении оперативного прогнозирования речных наводнений необходимо постоянно вести учёт значений набора признаков физического процесса (движения водных масс), выбирая в зависимости от динамики развития ситуации величину промежутка времени, на который осуществляется прогнозирование, требуемую точность прогноза и директивный срок получения прогноза. Вследствие изменений доступности вычислительных ресурсов и требований к точности и оперативности прогноза возникает необходимость регулярного решения задачи синтеза технологии и планов управления информационными процессами в системе оперативного прогнозирования наводнений.

### 5.3.2. Программное обеспечение решения задачи

Разработанное диссертантом в соответствии с требованиями и общей концепцией, изложенной в 4-й главе диссертации, программное обеспечение для решения задач, рассматриваемых в данном примере, позволяет синтезировать наилучшую технологию и соответствующие планы функционирования информационной системы оперативного прогнозирования наводнений с учётом заданных требований к оперативности и достоверности результатов, а также организовать выполнение этой технологии в инфраструктуре туманных вычислений.

В качестве базового подхода при для построения системы использована сервис-ориентированная архитектура (COA) [246, 254], обеспечивающая гибкое взаимодействие существующих программных модулей, реализующих гидродинамические и гидрологические модели, модулей сбора и обработки разнородных данных, включающих данные с гидропостов и данных ДЗЗ, управляющих модулей, и т.д. При этом все компоненты системы реализуются как веб-сервисы, они могут быть территориально распределены и локализованы в различных организациях, городах и странах [250, 253, 255].

Согласно разработанной общей архитектуре программного обеспечения синтеза технологий и планов функционирования КФС, «оркестровку» всех веб-служб осуществляет интерпретатор языка BPEL 2.0, встроенный в сервисную шину. Как отмечалось выше, применение этого языка позволяет организовать логику взаимодействия модулей и веб-сервисов при решении каждой конкретной прикладной задачи, используя, в том числе, визуальный редактор. Тем самым обеспечивается визуальное конструирование алгоритмов работы с данными с задействованием различных источников и сервисов [250].

В целом, в составе реализованной системы можно выделить следующие архитектурные и программные решения, которые являются элементами соответствующей киберфизической системы и позволяют наилучшим образом реализовать технологию прогнозирования наводнений под управлением разработанного диссертантом координирующего программного модуля [250, 251]:

- сервисная шина, представленная свободно распространяемым программным продуктом WSO2 Enterprise Integrator (<https://wso2.com/integration/>);
- интерпретатор сценария на языке BPMN 2.0, встроенный в сервисную шину WSO2;
- программное обеспечение для отображения данных по стандартам веб-картографии GeoServer;
- система управления базой пространственных данных PostgreSQL с дополнением PostGIS;
- сервер администрирования на базе Python;
- сервис сбора данных с гидрологических датчиков;
- сервис получения, обработки и загрузки данных ДЗЗ;
- сервис прогнозирования значений параметров гидродинамических процессов;
- сервис, управляющий работой расчётной гидродинамической модели;
- сервис прогнозирования уровня и расхода воды на гидростаях;
- сервис обработки и интерпретации результатов расчётов;
- пользовательский веб-интерфейс в виде прогрессивного веб-приложения, адаптированного для работы на стационарных и мобильных пользовательских терминалах и обеспечивающего выполнение принципиального требования о необходимости минимизации специальных знаний потребителя для работы с информационными системами.

Созданный вариант системы оперативного прогнозирования наводнений выполняет в *автоматическом режиме*, согласно синтезированной технологии, полный цикл моделирования: от сбора исходных данных с гидрологических датчиков, до обновления результатов прогнозирования в пользовательском интерфейсе. В результате работы системы в базе пространственных данных формируются записи, которые преобразуются геосервером в формат WMS и поставляются в пользовательский интерфейс. Сам интерфейс предоставляет конечному пользователю необходимый минимум инструментов для работы с результатами прогнозирования: строка поиска пространственных данных, перечень отображаемых в данный момент данных, временная шкала для работы с темпоральными данными. Таким образом, вся сложность, связанная с использованием разнородных территориально распределённых информационных систем, скрыта от пользователя за счёт полной автоматизации



вычислительного процесса. Это позволяет использовать систему не только специалистам с высоким уровнем знаний в области ГИС и информационных технологий, но и специалистам в предметной области (гидрологии), а также другим пользователям, заинтересованным в результатах прогноза наводнений (службы по чрезвычайным ситуациям, органы исполнительной власти, коммерческие организации и граждане) [251].

Результаты экспериментальных исследований подтвердили необходимость комплексного использования различных моделей для повышения точности прогнозирования значений уровней воды, а значит и обоснованного учёта альтернативности в информационном процессе оперативного прогнозирования наводнений при синтезе конкретной технологии обработки данных и информации в заданных условиях. Конструктивно это проявляется во введении в логико-динамическую модель синтеза технологии оперативного прогнозирования наводнений некоторой вспомогательной переменной, которая изменяет своё значение при проведении операций структурной и параметрической адаптации гидрологических и гидродинамических моделей, а затем учитывается в одном из частных показателей качества синтезированной технологии и соответствующих планов функционирования рассматриваемой системы.

В результате применения разработанного диссертантом 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. Для оценки точности прогноза применялась методика, изложенная в [252]. 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 моделей.

Созданное модельно-алгоритмическое и программно-информационное обеспечение успешно используется в интересах исполнительных органов государственной власти Ленинградской, Архангельской и Вологодской областей для оперативного прогнозирования весенних паводков и в ходе упреждающих действий по их ликвидации, начиная с 2017 года и по настоящее время. Достоверность и обоснованность прогнозов базируется на уникальных методиках интеграции и обработки данных, информации и знаний, поступающих от разнородных наземных, аэрокосмических средств и экспертов. Разработанные методология и технология реализованы в системе мониторинга и оперативного прогнозирования речных наводнений ПРОСТОР (Прогнозирование Развития Опасных Ситуаций на Территории в Оперативном Режиме), свидетельство о регистрации в реестре программ для ЭВМ №2017612937 от 06.03.2017 «Распределенный программный комплекс автоматизации моделирования и прогнозирования».

#### 5.4. Выводы

1. В результате выполненных исследований были разработаны концептуальная и формальная модели функционирования судостроительного предприятия (ССП), в основу которых были положены основные концепты (операция, изделие, среда, ресурсы, задача, поток, структура), соответствующие описанным в первой главе диссертации аналогам, а также заданы различные классы отношений между ними. Построенная концептуальная модель функционирования судостроительного предприятия позволила существенно унифицировать и упростить формальное описание рассматриваемой в данной главе задачи.
2. Проанализировано содержание и основные особенности задач УСД технологическими процессами СПП, проведена их классификация, обоснована необходимость применения комплексного подхода к решению рассматриваемых задач на основе комплексного и имитационного моделирования. В качестве базовой математической структуры выбран альтернативный системный граф (АСГ) с управляемой структурой, с помощью которого удалось описать многомодельную структурную динамику ССВ.
3. Показано, что применение исследуемых в диссертации логико-динамических моделей для решения задачи УСД СПП позволяет: существенно сократить размерность задач УСД, решаемых в каждый момент времени; конструктивно проводить согласование и взаимную интерпретацию результатов, полученных на аналитических и имитационных моделях УСД как на концептуальном, так и на алгоритмическом, информационном, программном уровнях описания; успешно решать проблему унификации программного обеспечения УСД ССВ.
4. Определен и обоснован базовый состав моделей ССВ, используемых при расчете и многокритериальном оценивании её основных характеристик и показателей качества. Построена обобщенная динамическая модель УСД ССВ, которая представляет собой конечномерную нестационарную нелинейную дифференциальную динамическую систему с переменной областью допустимых управляющих воздействий, с частично-фиксированными краевыми условиями в начальный и конечный моменты времени. Это позволило сформулировать основные классы задач УСД ССВ как задачи поиска оптимальных управлений указанной обобщенной динамической моделью.
5. Проведено обобщенное описание состава, структуры, архитектуры и алгоритмов взаимодействия комплекса аналитико-имитационных моделей функционирования ССВ в рамках разработанной имитационной системы.

6. Разработаны методы и алгоритмы оценивания выполнимости производственных программ ССВ для детерминированных сценариев изменения внешних воздействий и оценивания показателей робастности и динамической устойчивости производственных программ ССВ для интервально заданных сценариев изменения внешних воздействий, позволившие существенно сократить затраты времени и повысить оперативность решения задач ССВ.

7. На практике продемонстрировано, что принятая за основу в четвёртой главе диссертации сервис-ориентированная архитектура разработанного программного комплекса позволила провести полноценную «бесшовную» интеграцию со сторонними информационно-аналитическими системами на высоком технологическом уровне, что отразилось в конечном итоге на удобстве использования гетерогенного распределённого программного комплекса посредством единого пользовательского интерфейса.

8. Применение нотации BPMN дало возможность привлечь главного технолога предприятия к процессу моделирования как на самом раннем этапе – при задании исходных данных о технологических процессах ССП, так и на всех последующих этапах, не вовлекая его в технические подробности функционирования программного комплекса. Это позволило значительно сократить цикл разработки за счёт непрерывного взаимодействия технолога, аналитика и разработчика на базе понятного всем участникам единого языка описания технологических процессов и логико-динамических моделей. Вместе с тем, описание процессов в нотации BPMN стало технической основой для интеграции гетерогенных приложений и сервисов в транзакционные информационные процессы при проведении распределённого моделирования в рамках судостроительной корпорации.

9. Исследования, проведённые с использованием разработанного программного комплекса, в целом подтвердили целесообразность применения предложенных в диссертационной работе методов и алгоритмов синтеза технологий и планов комплексного управления киберфизическими системами применительно к организации функционирования центра управления полётом навигационными космическими аппаратами. Кроме того, были выявлены закономерности, характеризующие зависимость целесообразности использования разработанных подходов от исходных данных. Так, было предложено разделить исходные данные на четыре класса по количеству и объёму операций в технологическом цикле. На основе данной классификации автоматически может производиться ситуационный выбор алгоритма планирования в зависимости от исходных данных.

10. Результаты машинных экспериментов с использованием разработанного программного комплекса показали, что скорость сходимости алгоритма оптимизации комплексных планов функционирования КФС в наибольшей степени зависит от диспетчерского решения (первого приближения в задачах численной оптимизации программного управления операциями и распределения ресурсов системы). При этом, были выявлены следующие закономерности: если наблюдается дефицит вычислительных ресурсов КФС (пять и более операций претендуют на ресурс), то время сходимости алгоритма возрастает и возможны случаи расходимости численных процедур. В том случае, если в модели вычислительных ресурсов достаточно (не более трёх операций на ресурс), то предлагаемый алгоритм оптимального планирования обеспечивает близкую к 100%-м сходимость.

11. Анализ результатов показал перспективность использования предложенных в диссертации логико-динамических моделей в качестве теоретической основы для реализации широко используемой в настоящее время концепции контейнерной виртуализации информационно-вычислительных ресурсов. В этом случае на конструктивном уровне могут ставиться сложные задачи глобальной оптимизации распределённых информационных процессов, присущих современным информационным системам на базе распределённых КФС. Полученные в результате решения задачи комплексного планирования операций и распределения ресурсов динамические приоритеты можно использовать не только на этапе планирования, но и на этапе диспетчеризации операций и ресурсов в промышленном интернете в реальном масштабе времени.

12. Разработано оригинальное модельно-алгоритмическое, программно-информационное обеспечение решения задачи управления информационными процессами в системе оперативного прогнозирования речных наводнений, научную основу которого составила развиваемая автором теория синтеза технологий и программ управления сложными объектами. Применение разработанного модуля управления информационными процессами в системе прогнозирования наводнений позволило повысить точность прогноза на 16,7% по сравнению с применением традиционного эвристического диспетчера, используемого при распределении вычислительных операций по узлам промышленного интернета.

## 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.

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.



## Список сокращений

ИКТ	информационные и коммуникационные технологии
КФС	киберфизическая система
ЛПР	лицо, принимающее решение
ВРМН	Business Process Model and Notation, нотация и модель бизнес-процессов
ССВ	судостроительная верфь
АСУ	автоматизированная система управления
ТП	технологический процесс
ПП	производственный процесс
АСУП	автоматизированная система управления предприятием
ERP	Enterprise Resource Planning, планирование ресурсов предприятия
MES	manufacturing execution system, система управления производственными процессами
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, диспетчерское управление и сбор данных
ИС	информационная система
ИоТ	Industrial Internet of Things, промышленный интернет вещей
ФП	физический процесс
ИС	Industrial Internet Consortium, индустриальный интернет-консорциум
ИоТ	интернет вещей
ИИ	искусственный интеллект
SDN	Software Defined Networks, программно-определяемые сети
СТО	сложный технический объект
СУ	система управления
СКПУ	система координатно-параметрического управления
САУТ	системы с активной управляемой технологией
ИСАУ	интегрированная система активного управления
ЛА	летательный аппарат
ОУ	объект управления
УП	управляющая подсистема
АПО	активный подвижный объект
ОБО	объекты обслуживания
КСр	космическое средство
ПУ	пункт управления
ПО	пункт обслуживания

ЦУ	центр управления
ЦПУ	центральный пункт управления
СО	система обслуживания
АСОД	автоматизированная система обмена данными
КСА	комплекс средств автоматизации
ВЗУ	внешнее звено управления
ОВ	операция взаимодействия
ЦА	целевая аппаратура
ОА	обеспечивающая аппаратура
СВЗ	средства взаимодействия
СХ	средства хранения
СВ	средства воспроизведения
СрО	средства отображения
СД	средства документирования
АРМ	автоматизированное рабочее место
ТВМ	типовой вычислительный модуль
ТМА	типовой модуль автоматизации
ЛВС	локальная вычислительная сеть
АУ	автоматизированное управление
СТС	сложная техническая система
ДАМГ	динамический альтернативный мультиграф
ПЦУ	программно-целевое управление
ИСППР	интегрированная система поддержки принятия решений
СПМО	специальное программно-математическое обеспечение
СПМИО	специальное программно-математическое и информационное обеспечение
АСГ	альтернативный системный граф
ИмС	имитационная система
ЗВ	зона взаимодействия
УСД	управление структурной динамикой
ТЦУ	технологический цикл управления
ПМПП	простейший метод последовательных приближений
МПП	метод последовательных приближений
НИР	научно-исследовательская работа
ОКР	опытно-конструкторская работа

НИОКР	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
ТАУ	технология автоматизированного управления
НКУ	наземный комплекс управления
ОКИК	отдельный командно-измерительный комплекс
ИД	исходные данные
Ц и ИТВ	целевые и информационно-технологические возможности
ОД	область достижимости
ВСр	вычислительные средства
РТС	радиотехнические средства
СОА	сервис-ориентированная архитектура
АИПК	аналитико-имитационный программный комплекс
ЦОД	центр обработки данных
ODE	Orchestration Director Engine
BPЕL	Business Process Execution Language, язык исполнения бизнес-процессов
ПрП	производственные процессы
ВПП	вспомогательные производственные процессы
ПЦ	производственный цикл
ТехО	технологическая операция
СОТС	сложная организационно-техническая система
ТЦУ	технологический цикл управления
СлО	сложный объект
ПМК	полимодельный комплекс
ЭО	экспериментальный образец
ПМ	программный модуль
КА	космический аппарат
СОТО	сложный организационно-технический объект
ОрКСр	орбитальные космические средства
НКСр	наземные космические средства
ОрС	орбитальные системы
ССПД	система связи и передачи данных
ЦУП	центр управления полетом
БКУ	бортовой комплекс управления
НКУ	наземный комплекс управления
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли

ОКИК	отдельный командно-измерительный комплекс
КО	канал обслуживания
ТЦУ	технологический цикл управления
НКА	навигационный космический аппарат
ППО	природно-технологический объект
ЦМР	цифровая модель рельефа
ИАС	информационно-аналитическая система
ГГМ	гидрологические и гидродинамические модели
КМПН	комплексное моделирование и прогнозирование речных наводнений
РС	развивающаяся ситуация
ТМД	темпоральная модель данных
ГИС	геоинформационная система
АГК	автоматизированный гидрологический комплекс
ИНС	искусственная нейронная сеть

## Список литературы

1. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0 -- Securing the Future of German Manufacturing Industry. München: acatech -- National Academy of Science and Engineering, 2013.
2. Evans, P & Annunziata, Marco. Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines. General Electric, Report, 2012.
3. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Полимодельное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами. Труды СПИИРАН. 2010. Вып. 4(15), с. 7-52.
4. Heiko Meyer. Manufacturing Execution Systems: Optimal Design, Planning, and Deployment. McGraw-Hill, 2009, 248 p.
5. Lu, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. Journal of Industrial Information Integration 6, 2017: pp. 1-10.
6. Соколов Б.В., Цивирко Е.Г., Юсупов Р.М. Анализ влияния информатики и информационных технологий на развитие теории и систем управления сложными объектами // Труды СПИИРАН. 1. № 11. С. 11-51.
7. Teilans A.A., Romanovs A.V., Merkurjev 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. H. Boyes, A security framework for cyber-physical systems, WMG CSC WorkingPaper, Coventry, University of Warwick, 2017.
9. Hugh Boyes, Bil Hallaq, Joe Cunningham, Tim Watson, The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework, Computers in Industry, Volume 101, 2018, pp. 1-12.
10. Jay Lee, Behrad Bagheri, Hung-An Kao, A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems, Manufacturing Letters, Volume 3, 2015, pp. 18-23.
11. M. Chiang and T. Zhang, "Fog and IoT: An Overview of Research Opportunities," in IEEE Internet of Things Journal, 2016, vol. 3, no. 6, pp. 854-864.
12. 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.
13. Kevin Ashton. That 'Internet of Things' Thing. In the real world, things matter more than ideas. RFID Journal. 2009.
14. Shi, Weisong; Cao, Jie; Zhang, Quan; Li, Youhuizi; Xu, Lanyu (October 2016). "Edge Computing: Vision and Challenges". IEEE Internet of Things Journal. 3 (5): pp. 637–646.

15. F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli. Fog computing and its role in the Internet of Things. In Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing, pp. 13–16, ACM, August 2012.
16. OpenFog Consortium. OpenFog Reference Architecture for Fog Computing. Technical Report, February 2017.
17. IEEE Standard Association. FOG – Fog Computing and Networking Architecture Framework, [Online] <http://standards.ieee.org/develop/wg/FOG.html> (дата обращения 17.11.2019).
18. K. Tammemäe, A. Jantsch, A. Kuusik, J.-S. Preden, and E. Õunapuu. Self-aware fog computing in private and secure spheres. Fog Computing in the Internet of Things, Springer International Publishing, 2018, pp. 71–99.
19. A. C. Baktir, A. Ozgovde, and C. Ersoy. How can edge computing benefit from software-defined networking: A survey, Use Cases & Future Directions. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(4): pp. 2359–2391.
20. Open Networking Foundation. OpenFlow Switch Specification Version 1.5.1, <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/> (дата обращения 07.09.2019).
21. Geni, <http://groups.geni.net/geni/wiki/OpenFlowDiscoveryProtocol/> (дата обращения 10.10.2019).
22. Mohammed Alsaeedi, Mohd Murtadha Mohamad, Anas A. Al-Roubaiey, "Toward Adaptive and Scalable OpenFlow-SDN Flow Control: A Survey", Access IEEE, vol. 7, 2019, pp. 107346-107379.
23. G. Merlino, S. Arkoulis, S. Distefano, C. Papagianni, A. Puliafito, and S. Papavassiliou. Mobile crowdsensing as a service: a platform for applications on top of sensing clouds. Future Generation Computer Systems, 56, 2016: pp. 623–639.
24. R. K. Lomotey, J. Pry, and S. Sriramoju. Wearable IoT data stream traceability in a distributed health information system. Pervasive and Mobile Computing, 40: 692–707, September 2017.
25. T. Gomes, D. Fernandes, M. Ekpanyapong, J. Cabral. An IoT-based system for collision detection on guardrails. 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Taipei, Tawan, May 14–17, 2016.
26. B. Karakostas. Event prediction in an IoT Environment using Naïve Bayesian models. Procedia Computer Science, 83: 11–17, 2016.
27. F. Renna, J. Doyle, V. Giotsas, Y. Andreopoulos. Query processing for the Internet-of-Things: Coupling of device energy consumption and cloud infrastructure billing. 2016 IEEE First

- International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI). Berlin, Germany, April 4–8, 2016.
28. W. Li, I. Santos, F.C. Delicato, P.F. Pires, L. Pirmez, W. Wei, H. Song, A. Zomaya, S. Khan. System modelling and performance evaluation of a three-tier cloud of things. *Future Generation Computer Systems* 70 (2017): pp. 104–125.
  29. K. E. Desikan, M. Srinivasan, and C. Murthy. A Novel Distributed Latency-Aware Data Processing in Fog Computing-Enabled IoT Networks. In *Proceedings of the ACM Workshop on Distributed Information Processing in Wireless Networks*, Chennai, India, July 10–14, 2017.
  30. F. Renna, J. Doyle, V. Giotsas, Y. Andreopoulos. Query processing for the Internet-of-Things: Coupling of device energy consumption and cloud infrastructure billing. *2016 IEEE First International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)*. Berlin, Germany, April 4–8, 2016.
  31. Y. Lyu, F. Yan, Y. Chen, et al, High-performance scheduling model for multisensor gateway of cloud sensor system-based smart-living. *18th International Conference on Information Fusion (Fusion) 21*: 42–56, January 2015.
  32. H. Madsen, B. Burtschy, G. Albeanu, F. Popentiu-Vladicescu. Reliability in the utility computing era: Towards reliable fog computing. *20th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, pp. 43–46, 2013.
  33. I. Kocsis, Z. Á. Mann, D. Zilahi. Optimised deployment of critical applications in infrastructure-as-a-service clouds. *International Journal of Cloud Computing*, 6(4): 342–362, 2017.
  34. S. Yi, Z. Qin, Q. Li. Security and privacy issues of fog computing: A survey. *International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications*, pp. 685–695, 2015.
  35. X. Chen, L. Jiao, W. Li, and X. Fu. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 24(5): 2795–2808, 2016.
  36. J. Oueis, E. C. Strinati, S. Barbarossa. The fog balancing: Load distribution for small cell cloud computing. *81st IEEE Vehicular Technology Conference*, 2015.
  37. R. Deng, R. Lu, C. Lai, and T.H. Luan. Towards power consumption-delay tradeoff by workload allocation in cloud-fog computing. *IEEE International Conference on Communications*, pp. 3909–3914, 2015.
  38. J. O. Kephart, D. M. Chess. The vision of autonomic computing. *Computer*, 36(1): 41–50, 2003.
  39. Микони С. В., Соколов Б. В. Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография С. В. Микони, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.

40. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), 2011. – 222 с.
41. Аничкин А.С., Семенов В.А. Современные модели и методы теории расписаний. Труды Института системного программирования РАН, том 26, вып. 3, 2014, стр. 5-50.
42. Емельянов А.В., Левко И.В., Легков К.Е. Методика оперативного решения информационно-расчетных задач программно-техническим комплексом на основе рационального распределения информационно-вычислительных ресурсов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №4.
43. Соколов Н.А. Задачи планирования сетей электросвязи. – СПб.: Техника связи, 2012. – 432 с.
44. Соколов Б.В., Охтилев М.Ю., Потрясаев С.А., Юсупов Р.М. Методы и алгоритмы адаптации моделей планирования промышленного производства. Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем (ИКМ МТМТС-2019). Пятая международная научно-практическая конференция. Труды конференции. 2019. С. 166-172.
45. Мурашкина Т. И., Назарова И. Т. Этапы измерительного эксперимента // НиКа. 2012.
46. Б. В. Соколов Динамические модели и алгоритмы комплексного планирования работы наземных технических средств с навигационными космическими аппаратами // Труды СПИИРАН, №13 (2010), с. 7–44.
47. Ackoff, R.L., 1978. The Art of Problem Solving. Wiley-Interscience, New York., Klir, G.J., 1985. Architecture of Systems Problem Solving. Plenum Press, New York.
48. Vikhar, P. A., Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects". Proceedings of the 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC). Jalgaon, 2016, pp. 261-265.
49. Marco Dorigo, Gianni Di Caro, and Luca M. Gambardella. Ant Algorithms for Discrete Optimization. Artificial Life 1999 5:2, 137-172.
50. Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C.D. & Vecchi, M.P. 1983, Optimization by simulated annealing, Science, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680.
51. Baptiste Ph., Le Pape C., Nuijten W. Constraint-based scheduling: applying constraint programming to scheduling problems // Kluwer Academic Publishers, 2001.– 198 p.
52. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. – М.: Радио и связь, 1990.
53. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления, 2001, № 1. – С.5-22, № 2 – С.5-21.



54. Добановский С.А., Озерянный Н.А. Системы автоматического управления с реконфигурацией // Измерение, контроль, автоматизация, 1990, № 4(76). – С.62-80.
55. Соколов Б.В., Палицын В.А. Математическая модель планирования перемещений подвижных объектов в локальной акватории // Информатизация и связь. - 2014, №4. - С.108-115.
56. Соколов Б.В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. – МО, 1992.
57. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов – М.: Наука, 2006. – 410 с.
58. Потрясаев С.А. Синтез сценариев моделирования структурной динамики АСУ активными подвижными объектами // Приборостроение. 2014. №11.
59. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1982.
60. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых системы. – М.: Мир, 1973.
61. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем. – М.: Мир, 1978.
62. Холл А. Опыт методологии для системотехники. – М.: Сов. радио, 1975.
63. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. – М.: ИЛ, 1959.
64. Ackoff, R.L., 1978. The Art of Problem Solving. Wiley-Interscience, New York.
65. Касти Дж. Большие системы: связность, сложность, катастрофы. – М.: Мир, 1982.
66. Атанс М., Фалб П. Оптимальное управление. М.: Машиностроение, 1968.
67. Брайсон А., Хо-Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. – М.: Наука, 1972.
68. Флеминг У., Ришел Р. Оптимальное управление детерминированными и стохастическими системами. – М.: Мир, 1978.
69. Заде Л. Теория линейных систем. Метод пространства состояний. – М.: Наука, 1970.
70. Табак Д., Куо Б. Оптимальное управление и математическое программирование. М. – Наука, 1975.
71. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: ИЛ, 1960.
72. Беллман Р. Процессы регулирования с адаптацией. – М.: Наука, 1964.
73. Neustadt, L.W., 1976. Optimization. A Theory of Necessary Conditions. Princeton Univ. Press. Princeton, New Jersey.
74. Astrom K.J., 1970. Introduction to Stochastic Control Theory. Academic Press, New York.
75. Понтрягин Л., Болтянский В., Гамкредидзе Р., Мищенко Е. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Физматгиз, 1961.

76. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1975.
77. Barlow, R.E., Hunter, L.G., 1960. System Efficiency and Reliability. In: Technometrics. – V.2. – N 1.
78. Henley, E.J. and H. Kumamoto., 1981. Reliability Engineering and Risk Assessment. N.-J., Prentice-Hall, Inc.
79. Henley, E.J., and H. Kumamoto., 1985. Designing for Reliability and Safety Control. N.-J., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
80. Ryabinin, I.A. Reliability of Engineering Systems. Principles and Analysis. – Moscow: Mir, 1976 (in Russian).
81. Sato, S., and H. Kumamoto, 1995. RE-engineering the Environment. Vantage Press, New York.
82. Ljung, L., 1987. System Identification: Theory for the User. Prentice-Hall, Inc., Sweden, 1987.
83. Anderson, T., and P.A. Lee., 1985. Fault tolerants. Principles and Practice. Prentice-Hall International Inc., New York.
84. Ringland, G. Software Functional Variability – a methodology for building modifiable reliable real-time systems // Eurocomp. Conf. Proc., 1974, pp.211-225.
85. Clarke E.M., and Niholaon C.N. Distributed Reconfiguration Strategies for Fault-tolerant Multiprocessor Systems // Ibid, 1984, 33, N 8, pp.771-783.
86. Randell B., System Structure for Fault Tolerance // IEEE Trans. Software. Eng., 1975, SE-1, pp.220-232.
87. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И., Филимонов В.А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем: Оптимизационно-имитационный подход. – М.: Наука, 1985.
88. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). – М.: Наука, 1993.
89. Цурков В.И. Динамические задачи большой размерности. – М.: Наука, 1988.
90. Военная системотехника и системный анализ. – Учебник /Под ред. проф. Б.В. Соколова. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999.
91. Wanguer, H.M., 1969. Principles of Operations Research. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
92. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978.
93. Форрестер Дж. Мировая динамика. – М.: Наука, 1978.
94. Coodman, M.R., 1974. Study Notes in System Dynamic. Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Massachusetts.

95. 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. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIX Международной конференции. Под редакцией Е.А. Федосова, Н.А. Кузнецова, В.А. Виттиха. 2017. С. 508-513.
96. 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.
97. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Силаев А.В. Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах // Автоматика и телемеханика, 1996, № 2. – С.3-20.
98. Barron R.L. Alternative Strategies for Reconfigurable Flight Control // Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conf., 1984, pp.1313-1320.
99. Napolitano M.R., Swaim R.L. An Aircraft Flight Control Reconfiguration Algorithm // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., 1989, pp.323-332.
100. Van der Velde W.E. Control System Reconfiguration // Proc. American Control Conf., 1984, v.3, pp.1741-1745.
101. Weiss J.L., Looze D.P., Eterno J.S. Simulation Results of Automatic Restructurable Flight Control System Concepts // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., 1986, pp.190-197.
102. Mahanian S. Multiple Mode Failure Detection, Identification and Reconfiguration: the evaluation // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., Pt.1, pp.466-471.
103. Vassilyev, S.N., Doganovski, S.A. et al. Integrated Control Systems with Reconfiguration of Active Plants. Design and Applications // Proc. 2nd IFAC Workshop on New Trends in Design of Control Systems. Smolenice: Publ. House "Vydavatel'stvo STU v Bratislave", 1997.
104. Nerode A., Kohn W. Models for Hybrid Systems: Automata, Topologies, Controllability, Observability // Hybrid Systems / Ed. by R.L. Grossman, Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 1993.
105. Singh, M., and A. Titli, 1978. Systems: Decomposition, Optimization and Control, Pergamon Press, Oxford.
106. Гир Дж. Ван. Прикладная общая теория систем. – М.: Мир, 1981.
107. Siliak, D.D., 1990. Decentralized Control of Complex Systems, Academic Press, New York.
108. Russell, S.J., Norvig, P., 1995. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice-Hall, Inc., A Simon & Schuster Company, Upper Saddle River, New Jersey.

109. Intelligent Control Systems: Theory and Applications / Eds. M.M. Gupta, N.K. Sinka. N.Y.: IEEE Press, 1996.
110. Rauch H.E. Intelligent Fault Diagnosis and Control Reconfiguration // IEEE Control Systems Mag. 1994. N 1.
111. Moore C.G., Harris C.J. Indirect Adaptive Fuzzy Control // Intern. J. Control. 1992. v.56, N 2.
112. Yusupov R., Rozenwasser E., 1999. Sensitivity of Automatic Control Systems. CRS. Press, London, New York.
113. Yusupov R., Problems of model adequacy. Proceedings of the 5 Inter. Conf. "Advanced Computer Systems" November, 19-29, Poland, 1995.
114. Yusupov R., Kisilev V., Kouznetsov V. The Model of Economical Regulation of Industrial Emissions. Environmental indices: Systems analysis approach, EOLSS. Publ., Co, Ltd, Oxford, UK, 1999, pp.519-528.
115. Hammer, M., 1996. Beyond Reengineering. Harper Collins Business, London.
116. Marco, D.A., McGovan K.L., 1988. Structured Analysis and Design Technique. McCrawHill, New York.
117. Калянов Г.Н. CASE-технологии. Консалтинг при автоматизации бизнес-процессов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2000.
118. Иконникова А.В., Петрова И.А., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы // Приборостроение. 2008. №11.
119. Соколов Б.В., Калинин В.Н. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления, 1995, № 1. – С.149-156.
120. Соколов Б. В., Малюгин К. А. Комплексное моделирование процессов управления структурной динамикой информационной системы // Информационно-управляющие системы. 2003. №2-3, С. 19-29.
121. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Потрясаев С.А. Модель и алгоритмы оценивания робастности плана функционирования информационной системы. Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого). Материалы XIII Международной конференции. 2016. С. 270-271.
122. Ivanov D., Sokolov B., Potryasaev S., Solovyeva I. Dynamic analysis of supply chain robustness and adaptation with the help of attainable sets and positional optimization. Sequencing and Scheduling with Inaccurate Data. 2014. С. 225-252.
123. Laudon, Kenneth c., 1997. Essential of Management Information Systems: organization and technology, Prentice-Hall, New Jersey.

124. Потрясаев С.А. Динамическая модель и алгоритмы комплексного планирования операций и распределения ресурсов в корпоративной информационной системе: диссертация ... кандидата технических наук. Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, 2009.
125. Соколов Б.В., Потрясаев С.А., Малышева И.В., Назаров Д.И. Алгоритм адаптации моделей управления структурной динамикой сложной технической системы к воздействию возмущающих факторов. Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. 2015. № 1. С. 3-6.
126. Соколов Б.В., Калинин В.Н. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика, 1985, № 5. – С.106-114.
127. Морозов В.П., Дымарский Я.С. Элементы теории управления ГАП: математическое обеспечение. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984.
128. Ross, R.G., 1987. Entity Modeling: Techniques and Applications. Data Base Research Group, Boston.
129. Roy, B., 1996. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
130. Winterleldt, D. von and W. Edwards, 1986. Decision Analysis and Behavioral Research. Cambridge University Press, Cambridge.
131. Perosjan, L.A., and N.A. Zenkevich, 1996. Game Theory. World Scientific Publ., Singapore, London.
132. Basar, T., Olsder, G.J.D., 1982. Dynamic Noncooperative Game Theory, Academic Press, London.
133. Chernousko, F.L., Zak, V.L. On Differential Games of Evasion from Many Pursuers // J. Optimiz. Theory and Appl. 1985. Vol.46, N 4, pp.461-470.
134. 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.
135. Соколов Б.В., Гришин В.Д., Павлов Д.А., Потрясаев С.А. Устройство для определения значения характеристик готовности изделия к применению. Патент на изобретение RUS 2580099 27.05.2014.
136. 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.
137. Cohon, J.L/. 1978. Multi-objective Programming and Planning, Academic Press, New York.
138. Yusupov R.M., Ohtilev M.U., Potryasaev S.A., Sokolov B.V., Pavlov A.N. Theoretical and technological foundations of complex objects proactive monitoring management and control. Proceedings of the Symposium Automated Systems and Technologies. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Leibniz Universität Hannover. 2015. С. 103-110.
139. Зеленцов В.А., Соколов Б.В., Цивирко Е.Г. Варианты учета факторов неопределенности в моделях катастрофоустойчивых информационных систем. Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», № 1, 2012, С. 165-166.
140. Rosenwasser E.N., and Yusupov R.M. Sensitivity of Control Systems. Moscow, Nauka, 1981.
141. Соколов Б.В., Охтилев М.Ю., Зайчик Е.М., Иконникова А.В. Методы и алгоритмы оперативного решения задач оценивания показателей возможностей и устойчивости функционирования информационной системы. Труды СПИИРАН, (4), 2007. С. 255-269.
142. Зеленцов В.А., Миронов А.Н., Павлов А.Н., Пащенко А.Е., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Сорокин Л.Н. Программное обеспечение для расчета и многокритериального анализа показателей надежности и живучести бортовой аппаратуры космических аппаратов. Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD2016). Материалы Девятой международной конференции: в 2-х томах. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. 2016. С. 262-263.
143. Зеленцов В.А., Миронов А.Н., Павлов А.Н., Пащенко А.Е., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Сорокин Л.А. Программный комплекс для расчета и многокритериального анализа показателей надежности и живучести бортовой аппаратуры космических аппаратов: состояние разработки и направления использования. Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016). Материалы 9-ой Мультиконференции по проблемам управления. Председатель президиума мультиконференции В.Г. Пешехонов. 2016. С. 408-415.
144. И. А. Крылов, Ф. Л. Черноусько, “Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления”, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 12:1 (1972), 14–34
145. Н. Н. Войтович, А. И. Ровенчак, “Модификация метода последовательных приближений для однородных задач”, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 22:2 (1982), 348–357
146. Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И. Теория систем и оптимального управления. – МО СССР, 1979. Ч.1. – 319 с.

147. Зимин И.Н., Иванилов Ю.П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // ЖВМ и МФ, 1971. – Т. 11. – № 3.
148. Соколов Б.В. Задача оптимального распределения ресурсов и выбора структуры математического обеспечения модульной системы обработки данных // Методы синтеза типовых модульных систем обработки данных: Тез. докл. III Всесоюзной научно-технической конференции 18-21 октября 1988 г. Кишинёв. – М.: ИПУ, 1988 – С. 57 – 58.
149. Соколов Б.В. О структуре имитационной системы для планирования применения технических средств в АСУ активными подвижными объектами // Методы и алгоритмы исследования и разработки систем автоматического управления: Учебное пособие – МО СССР, 1989. – С.116-118.
150. Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В. и др. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В.Емельянова. И.: Машиностроение, 1988.
151. Дяченко С.А., Соколов Б.В. Исследование многокритериальных задач теории расписаний с использованием динамической модели: Руководство к лабораторной работе. – Л.: ВИКИ, 1983. – 44 с.
152. Танаев В.С., Шкурба В.В. Введение в теорию расписаний. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
153. Юдин Д.Б. Задачи и методы стохастического программирования. – М.: Сов.радио, 1979. – 392 с.
154. G.E.P.Box, K.W.Wilson. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. – J.Roy.Statist.Soc., Ser.B, 1951,13, No 1.
155. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. –СПб.: КОРОНА принт. – 2004. – 384 с.
156. Иванов Д.А. Управление цепями поставок / Д.А. Иванов. - СПб.: Изд-во Политехн, ун-та, 2009. - 660 с.
157. А. А. Любушин, “Модификация и исследование сходимости метода последовательных приближений для задач оптимального управления”, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 19:6 (1979), 1414–1421
158. Скурихин В.И. и др. Адаптивные системы управления машиностроительным производством / Скурихин В.И., Забродский В.А., Копейченко Ю.В. М.: Машиностроение, 1989.-208 с.
159. Скурихин В.И., Забродский В.А. и Копейченко Ю.В. Проектирование систем адаптивного управления производством.-Х.: Вища школа, 1984.

160. 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.
161. Савин Г. И. Системное моделирование сложных процессов/Г. И. Савин.– М.: ФА- ЗИС: ВЦ РАН, 2000. – 276 с.
162. Тынянский Н. Т., Жуковский В. И. Дифференциальные игры с ненулевой суммой (бескоалиционный вариант) // Итоги науки и техники. Математический анализ. – 1977. – Т. 15. – С. 199–266.
163. Браун Р. Х. Решение одной антагонистической игры // Бесконечные антагонистические игры / Под ред. Н. Н. Воробьева. М.: Физматгиз, 1963. С. 419-425.
164. Робинсон Дж. Итеративный метод решения игр // Матричные игры / Под ред. Н. Н. Воробьева. М.: Физматгиз, 1961. С. 110-118.
165. Советов Б.Я., Водяхо А.И., Дубенецкий В.А., Цехановский В.В. Архитектура информационных систем // М.: Издательский центр «Академия», 2012. 288 с.
166. Гринфилд Дж., Шорт К., Кук С., Кент С., Крупи Дж. Фабрики разработки программ: потоковая сборка типовых приложений, моделирование, структуры и инструменты: пер. с англ. // М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2007. 592 с.
167. Gouigoux J. P., Tamzalit D. From Monolith to Microservices: Lessons Learned on an Industrial Migration to a Web Oriented Architecture // Proceedings of IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW'2017). 2017. pp. 62–65.
168. Календарев А. Современная веб-архитектура. От монолита к микросервисам // Системный администратор. 2017. №1-2. С. 80–83.
169. Richards M. Software Architecture Patterns // O'Reilly Media, Inc. 2015. 47 p.
170. Oluwatosin H.S. Client-Server Model // IOSRJ Comput. Eng. 2014. vol. 16, no. 1, pp. 2278–8727.
171. Papazoglou, M.P. & Van Den Heuvel, W.-. 2007, "Service oriented architectures: Approaches, technologies and research issues", VLDB Journal, vol. 16, no. 3, pp. 389-415.
172. Ньюмен С. Создание микросервисов // СПб.: Питер. 2016. 304 с.
173. Kwan A., Jacobsen H.-A., Chan A., Samooj S. Microservices in the modern software world // Proceedings of the 26th Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering (CASCON '16). 2016. pp. 297–299.
174. Bakshi K. Microservices-based software architecture and approaches // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. 2017. pp. 1–8.



175. Артамонов Ю. С., Востокин С. В. Разработка распределенных приложений сбора и анализа данных на базе микросервисной архитектуры // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. №4-4. С. 688–693.
176. Потрясаев С.А. Решение задачи комплексного планирования реконфигурации катастрофоустойчивых систем. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 11. С. 54-59.
177. Малышева И.В., Назаров Д.И., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Методологические и методические основы адаптивного структурно-функционального синтеза облика информационной системы. Управление развитием крупномасштабных систем, MLSD2015. Материалы Восьмой международной конференции. Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова Российской академии наук. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. 2015. С. 120-122.
178. Потрясаев С.А. Постановка и пути решения задачи комплексного планирования реконфигурации катастрофоустойчивых систем. Труды СПИИРАН. 2006. Т. 2. № 3. С. 374-382.
179. Pavlov, A.N. The Technique of Multi-Criteria Decision-Making in the Study of Semi-Structured Problems / A.N. Pavlov, D.A. Pavlov, A.A. Pavlov, A.A. Slin'ko // Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). April 2017. – Springer International Publishing Switzerland 2017, Vol 2: Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. P.131-140.
180. Макконнелл, Стив. Совершенный код. 2-е изд = Code Complete. – М.: Русская редакция, 2010. – 896 с.
181. Павлов А.Н., Павлов А.А., Павлов Д.А., Слин'ко А.А. Комбинированный метод многокритериального выбора управленческих решений на основе моделей представления знаний и планирования эксперимента // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2017. Вып. 656. С.9-17.
182. Потрясаев С. А. Математическое и программное обеспечение синтеза технологий и планов работы киберфизических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, No 11. С. 939–946.
183. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова // М.: Наука. 1986. 312 с.
184. Пытьев Ю.П. Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 464 с.

185. Павлов А.Н., Соколов Б.В. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие / ГУАП – СПб., 2006 – 72 с.
186. Чернов А.В., Ананьин В.И., Авдошин С.М., Песоцкая Е.Ю. Управление информатизацией предприятия с использованием архитектурных подходов. Книга 1. Формирование и оценка архитектуры предприятия. – М.: Издательство АСИТЭКС, 2018. – 468 с.
187. Oliphant, T.E. 2007, "Python for scientific computing", Computing in Science and Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 10-20.
188. Ayer, Vidya M., et al. Why Scientists Should Learn to Program in Python. Powder Diffraction, vol. 29, no. S2, 2014, pp. S48–S64,
189. Harvey, P. A., C. Wall, S. W. Luckey, S. Langer, and L. A. Leinwand. The python project: A unique model for extending research opportunities to undergraduate students. CBE Life Sciences Education 13, 2014, no. 4: 698-710.
190. <https://www.gnu.org/software/glpk/> (дата обращения 15.01.2018)
191. Mitchell, Stuart et al. "PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python." (2011).
192. Johansson, R. 2018, "Numerical python: Scientific computing and data science applications with numpy, SciPy and matplotlib, Second edition" in Numerical Python Scientific Computing and Data Science Applications with Numpy, SciPy and Matplotlib, Second Edition, pp. 1-700.
193. Brown S. Software architecture for developers. – Barnes & Noble, 2014.
194. Tim Berners-Lee, «Information Management: A Proposal» CERN (March 1989, May 1990). W3.org
195. <https://www.w3.org/Style/CSS/> (дата обращения 22.05.2017).
196. Axel Rauschmayer. The Nature of JavaScript // Speaking JavaScript. – First Edition. – O'Reilly Media, 2014. – P. 41.
197. <https://angular.io> (дата обращения 27.11.2019).
198. <https://ru.reactjs.org> (дата обращения 27.11.2019).
199. <https://vuejs.org> (дата обращения 27.11.2019).
200. <https://ionicframework.com> (дата обращения 27.11.2019).
201. <https://echarts.apache.org> (дата обращения 27.11.2019).
202. Пащенко А.Е., Потрясаев С.А., Ковалёв А.П. Использование сервисной шины предприятия при модульной архитектуре приложений. Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016). Материалы 9-й конференции по проблемам управления. Председатель президиума мультikonференции В. Г. Пешехонов. 2016. С. 533-535.
203. Potryasaev S.A. Integrated modelling of complex processes on basis of BPMN. Proceedings – 31st European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2017. 31. 2017. С. 209-214.

204. Троцкий Д.В., Городецкий В.И. Сценарная модель знаний и язык описания процессов для оценки и прогнозирования ситуаций // Труды СПИИРАН. 2009. Вып. 8. С. 94-127.
205. Г. П. Мельников Системология и языковые аспекты кибернетики, М.: Советское радио, 1978. – 368 с.
206. Потрясаев С.А. Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN // Приборостроение. 2016. №11. С. 913-920.
207. Потрясаев С.А. Комплексное моделирование АСУ производством с использованием нотации BPMN. Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016). Материалы 9-й конференции по проблемам управления. Председатель президиума мультikonференции В. Г. Пешехонов. 2016. С. 218-223.
208. 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.
209. Чичинадзе, В.К. Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. Метод преобразования. М.: Наука, 1983
210. Brent, R. P. Algorithms for minimization without derivatives. USA, NJ: Prentice-Hall Inc., 1973, pp 195
211. Guinard D., Trifa V., Karnouskos S., Spiess P., Savio D. Interacting with the SOA-based internet of things: Discovery, query, selection, and on-demand provisioning of web services. IEEE Transactions on Services Computing 3, no. 3, 2010, p. 223-235
212. Chen Y, Du Z, García-Acosta M. Robot as a service in cloud computing. In: Proceedings – 5th IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering, SOSE 2010; 20102010. p. 151-158.
213. J. Turnbull. The Docker Book, 2014, Bernstein D. Containers and cloud: From LXC to docker to kubernetes. IEEE Cloud Computing, 2014, 1(3),7036275, с. 81-84
214. Wohed, P., W. M. P. Van Der Aalst, M. Dumas, and A. H. M. Ter Hofstede Analysis of web services composition languages: The case of BPEL4WS. Lecture notes in computer science. Volume 2813, 2003, p. 200-215
215. Технология судостроения: уч. для вузов/Александров В.Л. и др.: под общ. Ред. А.Д. Гармашева – Спб.: профессия, 2003.-342 с
216. Васильев А. А., Долматов М. А., Плотников А. М., Попов В. И. Разработка организационно-технологических проектов технического перевооружения и реконструкции

- судостроительных предприятий Санкт-Петербурга с применением методов имитационного моделирования//Морской вестник. СПб., 2007. № 3 (6).
217. Korolev O., Potryasaev S., Parfenov V. Program system for solving problems of monitoring social and economic development of Saint-Petersburg. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. Т. 466. С. 347-358.
218. Бураков В.В., Охтилев М.Ю., Потрясаев С.А., Кулаков Ф.М., Плотников А.М. Технология комплексного моделирования АСУ производственными процессами. Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2017). Труды XVII Международной научно-практической конференции. Под ред. А.В. Толока, Институт проблем упр. им. В.А. Трапезникова. 2017. С. 271-275.
219. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. Учебник. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 368 с.
220. Соколов Б.В., Зайчик Е.М., Иконникова А.В., Потрясаев С.А. Комплексное планирование модернизации информационных систем: методологические и методические основы. Труды СПИИРАН, 1(3), 265-278.
221. Павловский Ю.А. Имитационные модели и системы. – М.: Фазис, 2000. – 132 с.
222. Имитационное моделирование производственных систем / А.А. Вавилов, Д.Х. Имаев, В.И. Плескунин и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983.
223. Калинин В.Н., Соколов Б.В. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1987. №1. С.106–114.
224. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2001.
225. Кравец В.Г., Любинский В.Е. Основы управления космическими полётами. – М.: Машиностроение, 1983.
226. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Космические системы наблюдения: Синтез и моделирование. – М.: Машиностроение, 1991.
227. Лебедев В.В., Кругов В.А. Техническая эффективность пилотируемых космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1985.
228. Малышев В.В., Красильщиков М.Н., Карлов В.И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1989.
229. Ханциверов Ф.Р., Остроухов В.В. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. – М.: Машиностроение, 1989.

230. Калинин В.Н, Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами //Теория и системы управления.-.1995.-№1. – С. 56 – 61.
231. An application of the Global Positioning System to search and rescue and remote tracking/ F.H. Raab, G.W. Board, S.SD. Arling et al. // Navigation (USA). – 1977. – Vol. 24, № 3. – Н.216-228.
232. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики.-2002.-№5. – с. 103–117.
233. Кулаков А.Ю., Кулаков Ф.М., Павлов А.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Модельно-алгоритмическое обеспечение планирования реконфигурации бортовой аппаратуры маломассоразмерных космических аппаратов. Информационные технологии в управлении (ИТУ-2018). Материалы конференции. 2018. С. 123-130.
234. Кулаков А.Ю., Матьяш В.А., Павлов А.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Модели, методы и алгоритмы реконфигурации бортовой аппаратуры космических аппаратов в динамически изменяющейся обстановке. Имитационное моделирование. Теория и практика. восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 438-442.
235. 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.
236. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Скобцов В.Ю., Коренько 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.
237. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М. : Радио и Связь, 1993. – 278 с.
238. Анфилатов В. С., Емельянов А. Л., Кукушкин А. А. Системный анализ в управлении. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 367 с.
239. Siliak D. D. Decentralized Control of Complex Systems, Academic Press, N.-Y. 1990.
240. 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 проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. 2016. Т. 8. № 3. С. 6-12.
241. Athans, M., Falb P.L. 1966. Optimal control: An Introduction to the Theory and Its Applications. McGraw-Hill Book Company. New York, San Francisco, Sidney.
242. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Опыт разработки и тестирования информационных технологий автоматизации комплексного моделирования речных наводнений. Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов. 2019. С. 140-144.
243. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Использование данных космического радиолокационного зондирования при анализе зон затопления в половодье. Инженерные изыскания. 2018. Т. 12. № 7-8. С. 54-60.
244. Sokolov B., Potryasaev S., Benyamna K., Sokolova I., Ivanov D. Methodological and technical basis for interdisciplinary investigation in the field of cyber-physical-socio systems. 15th International Conference on Modeling and Applied Simulation, MAS 2016. 15. 2016. С. 104-111.
245. Zelentsov, V.A., Alabyan, A.M., Krylenko, I.N., Pimanov, I.Y., Ponomarenko, M.R., Potryasaev, S.A., Semenov, A.E., Sobolevskii, V.A., Sokolov, B.V., Yusupov, R.M. A Model-Oriented System for Operational Forecasting of River Floods. (2019) Herald of the Russian Academy of Sciences, 89 (4), pp. 405-417.
246. Васильев О.Ф. Создание систем оперативного прогнозирования половодий и паводков // Вестник РАН. 2012. № 3. С. 237–242.
247. Зеленцов В.А., Пиманов И.Ю., Потрясаев С.А., Семенов А.Е., Алабян А.М., Крыленко И.Н. Опыт создания и тестирования региональной системы мониторинга и анализа гидрологической обстановки на примере участка реки Северная Двина. Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. 2018. С. 207-214.
248. 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.
249. Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Оперативное прогнозирование наводнений на основе комплексного упреждающего моделирования и интеграции разнородных данных // Труды СПИИРАН. 2015. № 4. С. 5-33.
250. 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.
251. В.А. Зеленцов, С.А. Потрясаев. 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.
252. Зеленцов В.А. Петухова Ю.Ю., Потрясаев С.А., Рогачёв С.А. Технология оперативного автоматизированного прогнозирования разлива реки в период весенних паводков // Тематический выпуск журнала “Труды СПИИРАН”, Технологии и примеры решения задач автоматизации и интеллектуализации процессов наземно-аэрокосмического мониторинга. 2013. Вып. 6 (29). С. 40–57.
253. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Автоматизация мониторинга и комплексного моделирования гидрологической обстановки в бассейнах рек. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 55. С. 74-85.
254. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Семенов А.Е. Мониторинг и моделирование наводнений на базе системы с сервис-ориентированной архитектурой. Геориск. 2016. № 1. С. 12-15.
255. 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.

## Приложения

### Приложение 1. Обобщённое графическое представление динамики некоторых переменных разработанного программного комплекса управления структурной динамикой КФС

При разработке программного обеспечения для управления структурной динамикой КФС на основе комплекса логико-динамических моделей (см. главу 2 диссертации) был введён ряд переменных, позволяющих наглядно представлять состояние и динамику исследуемой модели.

Прежде всего, отметим три значимых состояния операции и соответствующих момента времени:

- начальное: состояние операции в потоковой и основной моделях равны нулю (см. формулы (2.7), (2.40) в основном тексте диссертации),  $x^{(П)} = x^{(O)} = 0$ ;
- завершение обработки потока: в потоковой модели операция является завершённой, но в основной модели – нет,  $x^{(П)} = a^{(П)}$ ,  $x^{(O)} \neq a^{(O)}$ ;
- завершение операции: в основной и потоковой моделях операция является завершённой,  $x^{(O)} = a^{(O)}$ .

На рисунке П1.1 схематично представлено изменение следующих введённых переменных:  $u^{(O)}$  – управляющее воздействие, соответствует основному управлению модели, характеризует процесс фактического (либо планового) выполнения операции, то есть, обработку соответствующего ей информационного потока;

$v$  – вспомогательное управление, которое включается в момент завершения операции в основной модели, и используется при оценивании времени, прошедшего с момента окончания выполнения операции в основной модели и до конца интервала планирования;

$\omega^{(O)}$  – вспомогательное управление, которое включается в момент окончания обработки информационного потока и выключается в момент завершения операции в основной модели, и используется для оценивания точности задания граничных условий в основной модели;

$u^{(B,1)}$  – вспомогательное управление, которое принимает значение 1 от начального момента времени до момента окончания обработки информационного потока, и используется при оценивании размера очереди ожидания обработки информационного потока;



$u^{(B,2)}$  – вспомогательное управление, которое включается в момент окончания обработки информационного потока, выключается в конечный момент времени и используется при оценивании равномерности распределения операций по интервалу планирования;

$z$  – переменная состояния, зависящая от управлений  $u^{(O)}$  и  $\omega^{(O)}$ ;

$h$  – переменная состояния, зависящая от управлений  $u^{(O)}$ ,  $v$  и  $\omega^{(O)}$ ;

$g$  – переменная состояния, зависящая от управления  $v$ ;

$x^{(B,1)}$  и  $x^{(B,2)}$  – переменные состояния, зависящие, соответственно, от управлений  $u^{(B,1)}$  и  $u^{(B,2)}$ .

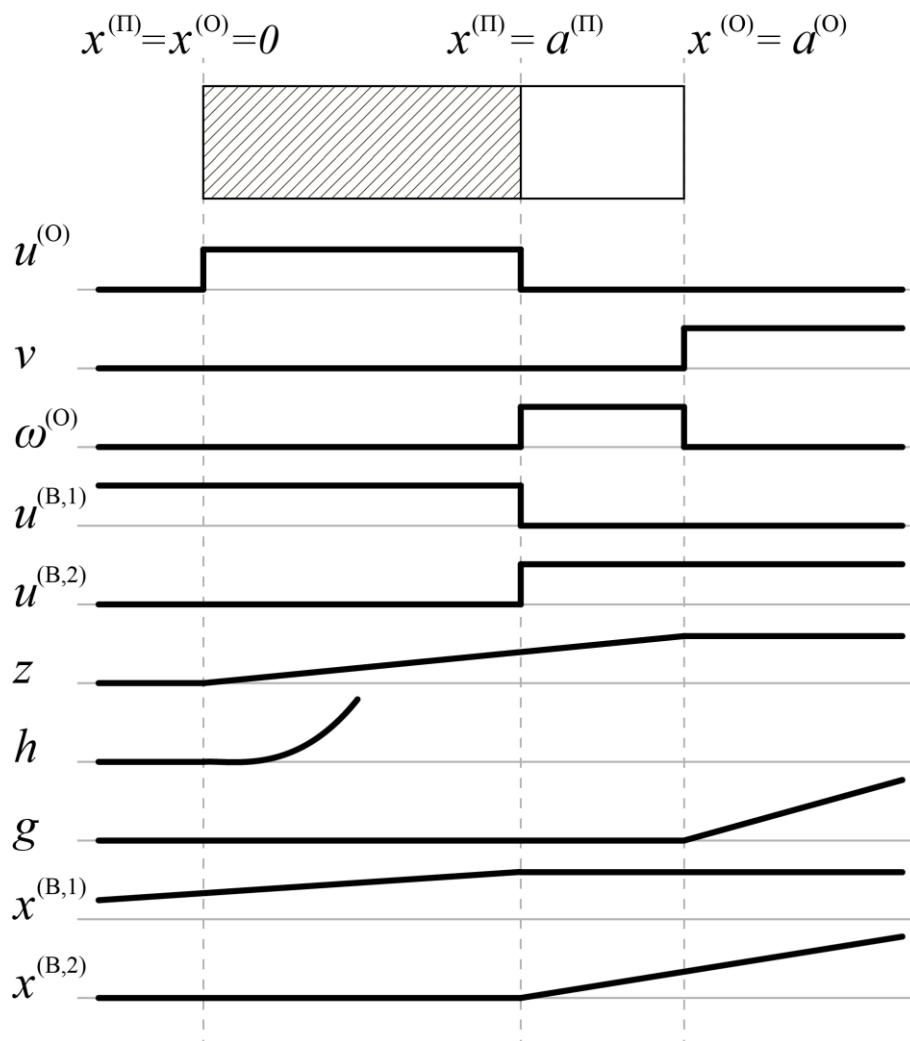


Рисунок П1.1. Схематичное представление изменений дополнительных переменных

## Приложение 2. Разработанная структура xml файла для хранения логики-динамических моделей и альтернативного мультиграфа

```

<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<dynamicmodel>
  <name>DYNO</name>..... произвольное название
  <duration>80</duration>..... интервал планирования
  <cluster>..... описание группы ресурсов
  <id>1</id>
  <name>test</name>
  <resource>..... описание каждого ресурса в группе
  <id>RS_1</id>..... идентификатор ресурса
  <name>Сенсор 1</name>..... читаемое название ресурса
  <capacity>1</capacity>..... число параллельно выполняемых
  операций
  <power>5.0</power>..... максимальная производительность
  ресурса, которая
  распределяется между
  <capacity>, если их несколько
  <price>10.0</price>..... стоимость единицы
  производительности ресурса
  в единицу времени

  </resource>
  ...
</cluster>
<coefficients>..... значимость частных показателей
качества
<integrity>0.0</integrity>..... полнота выполнения операций
<uniform>0.0</uniform>..... равномерность использования
ресурсов
<fine>0.0</fine>..... штрафы за нарушения директивных
сроков
<cost>0.5</cost>..... стоимость реализации плана
<flow>0.0</flow>..... полнота обработки потока
<time>0.5</time>..... время реализации плана
<interrupt>0.0</interrupt>..... число прерываний операций
</coefficients>
<process>..... описание технологического
процесса

  <id>1</id>
  <operation>..... описание операции
  <id>3</id>..... идентификатор
  <name>Сбор данных</name>..... читаемое название
  <volume>7.0</volume>..... предельное время выполнения
  <stream>6.0</stream>..... объём потока
  </operation>
  ...
  <graph>..... граф связанности операций
  <edge from="3" to="7">..... дуга от одной операции к другой
  <fwd>1</fwd>..... номер группы логической связи:
  дуги с одинаковым номером группы
  и общей вершины реализуют
  «альтернативное ИЛИ»

  <rev>1</rev>
  </edge>
  ...
</graph>
</process>
<productivity>

```

```
<resource ID="RS_1">
  <job ID="3">
    <value>3.0</value>..... максимальная производительность
                                ресурса при выполнении операции
  </job>
                                ...
  </productivity>
</dynamicmodel>
```

### Приложение 3. Характер изменения динамических приоритетов в большеразмерных задачах

В ходе решения ряда практических задач возникают ситуации стремительного изменения переменных в сопряжённой системе уравнений логико-динамической модели. Эти величины характеризуют так называемый динамический приоритет операции и играют значительную роль в алгоритмах оптимизации. При этом значимым является не их абсолютное, а относительное значение в сравнении с другими операциями. Так, на рисунке ПЗ.1 приведён график изменения значений динамических приоритетов в задаче управления структурной динамикой судостроительного предприятия.

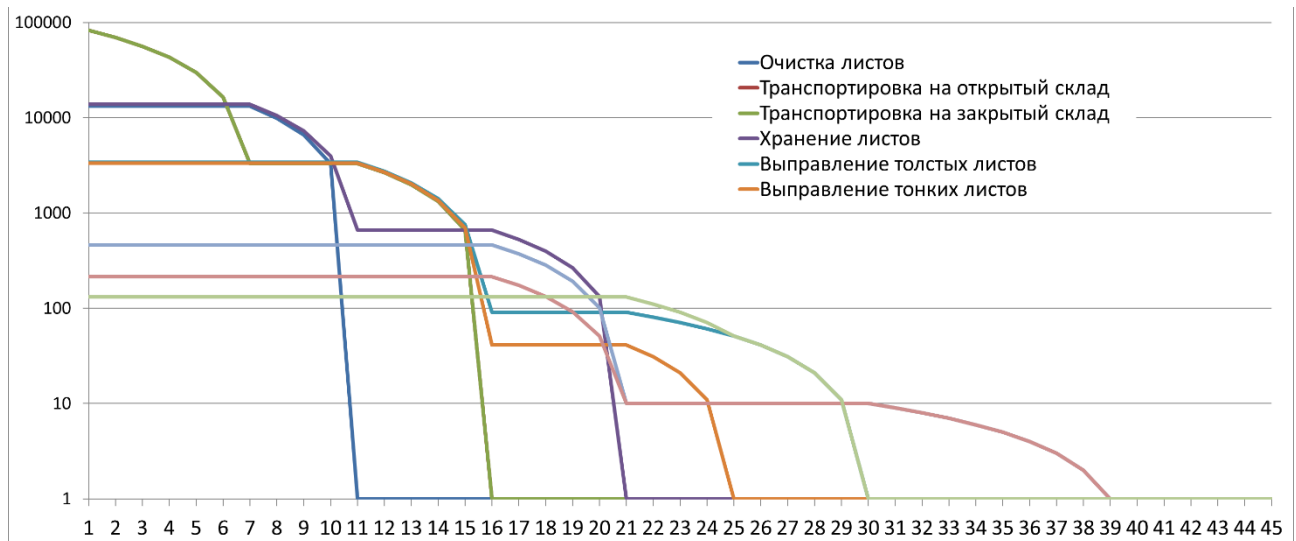


Рисунок ПЗ.1. График изменения динамических приоритетов

Уже при десяти операциях в процессе, приоритет первой из них становится порядка  $10^6$ , а при 25 операциях –  $10^{25}$  и так далее.

Использовать подобные величины при машинной реализации нецелесообразно из-за неэкономичного использования оперативной памяти и возможного внесения дополнительных погрешностей вычислений. В таблице ПЗ.1

Таблица представлены типы данных, принятые во многих современных средах разработки программного обеспечения.

Таблица ПЗ.1. Типы данных

Тип данных	Диапазон значений	Количество значащих цифр	Длина, байт
<b>Single</b>	$-1.5 \times 10^{45} \dots 3.4 \times 10^{38}$	7-8	4
<b>Double</b>	$-5.0 \times 10^{324} \dots 1.7 \times 10^{308}$	15-16	8
<b>Extended</b>	$-3.6 \times 10^{4951} \dots 1.1 \times 10^{4932}$	10-20	10

Для обеспечения возможности сравнения величин, различающихся на 40 и более порядков, необходимо использовать тип *Extended*, длиной 10 байт. Кроме того, работа с этим типом данных приводит к повышенной вычислительной ресурсоёмкости.

Анализ проведённых экспериментов показал, что для большинства типов исходных данных нарастание приоритетов близко к функции  $y = 10^x$ . Для преодоления указанных ранее трудностей было эмпирически принято решение вместо рассчитанных приоритетов использовать их десятичные логарифмы.

Исходя из того, что  $\log_{10} x < 0$  при  $x < 1$ , «поднимем» исходные приоритеты на единицу, чтобы избежать отрицательных значений (см. рис. ПЗ.2). Данная операция является правомерной, так как при вычислении гамильтониана (см. формулу (3.6) в основном тексте диссертации) одновременное увеличение всех элементов вектора  $\vec{\psi}(t)$  на единицу не скажется на выборе управляющего воздействия  $\vec{u}^*(t)$ .

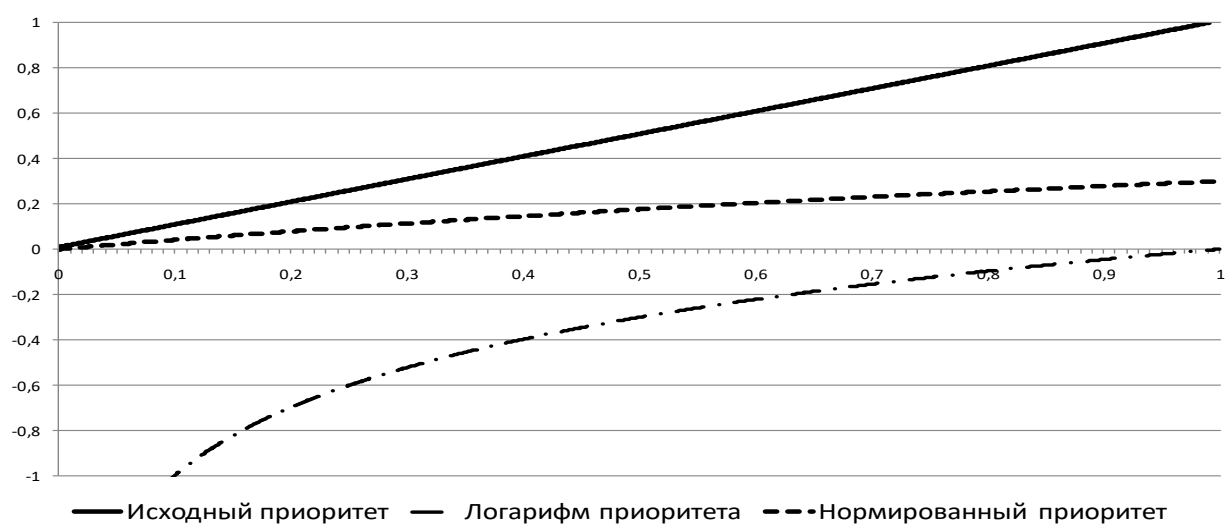


Рисунок ПЗ.2. График нормированных приоритетов

Таким образом, при реализации на ЭВМ алгоритма решения большеразмерных задач синтеза технологии и программ управления КФС, вместо  $\vec{\psi}_i^{(0)}$  будем использовать следующую формулу:

$$\vec{\psi}_i^{(0)} = \log_{10}(\vec{\psi}_i^{(0)} + 1).$$

Благодаря использованию данной формулы снижается вычислительная ресурсоёмкость и повышается точность работы предложенного в диссертации алгоритма.

#### Приложение 4. Графическое представление вариантов детализации архитектуры информационной платформы

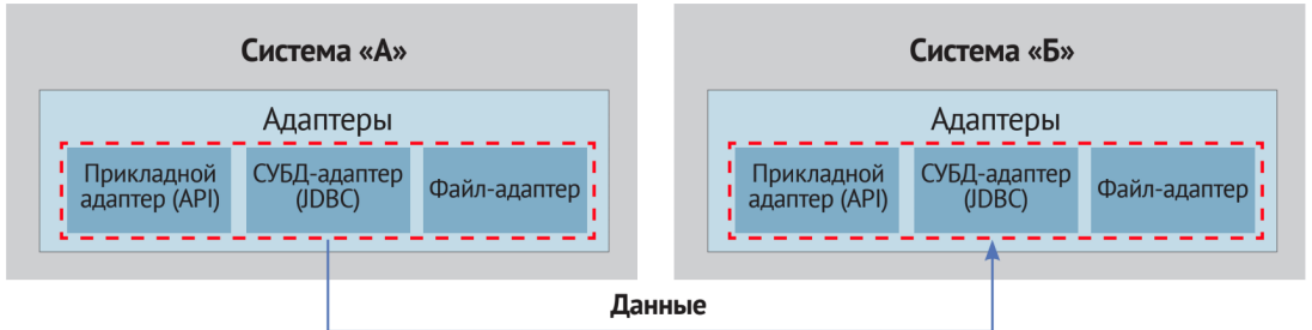


Рисунок ПЗ.1. Вариант взаимодействия компонентов «Точка-точка» (P2P)

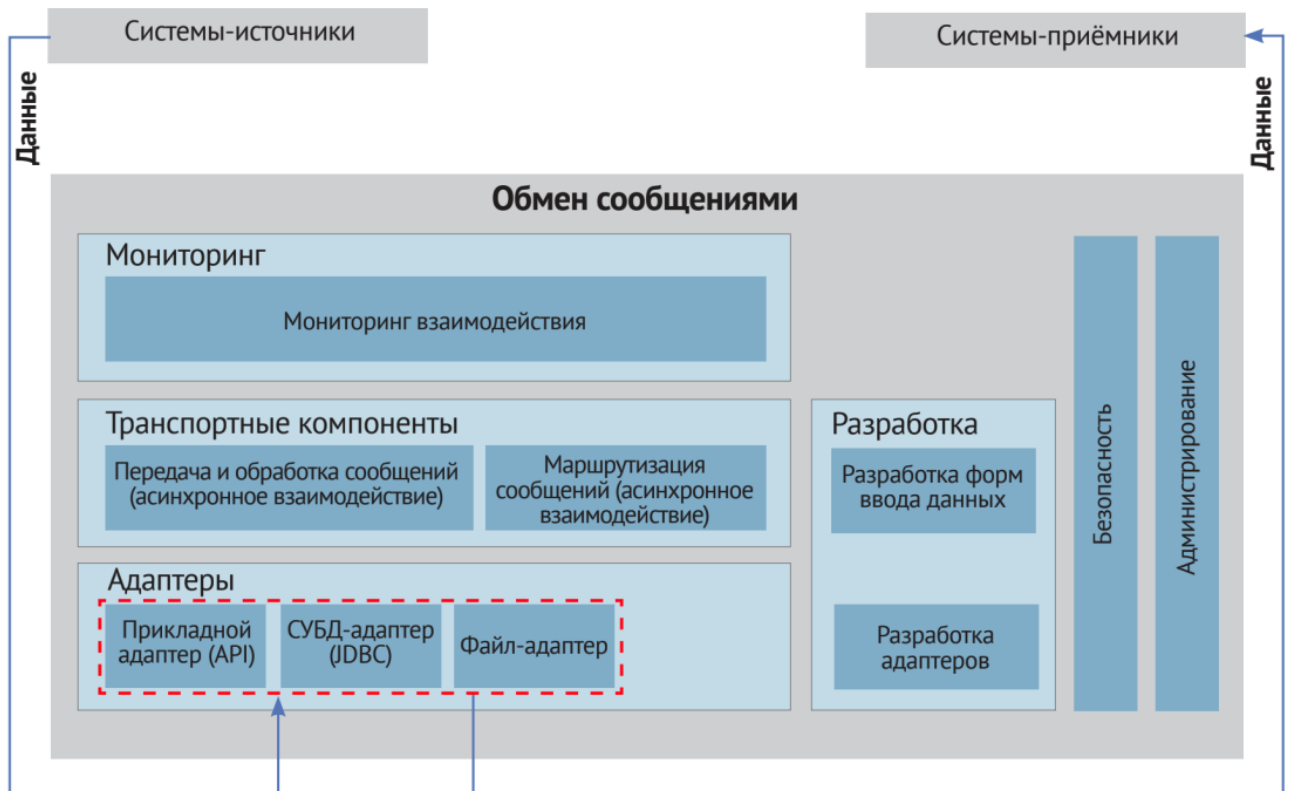


Рисунок ПЗ.2. Вариант взаимодействия компонентов «Обмен сообщениями» (Message queue)

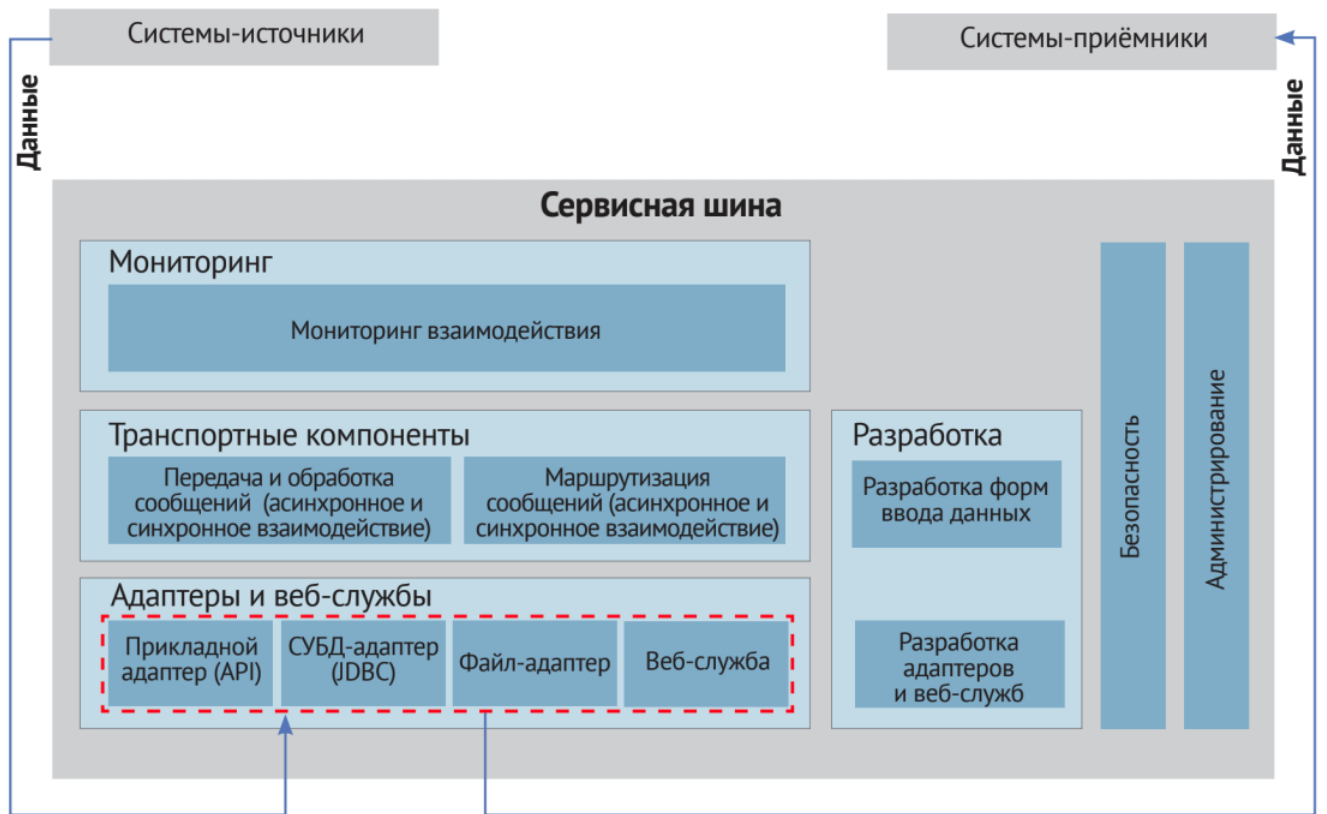


Рисунок П3.2. Вариант взаимодействия компонентов «Обмен сообщениями» (Message queue)