

*На правах рукописи*



Павлов Александр Николаевич

Модели и методы планирования реконфигурации сложных объектов  
с перестраиваемой структурой

05.13.01 – Системный анализ, управление и  
обработка информации

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора  
технических наук

Санкт-Петербург - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный консультант доктор технических наук, профессор **Соколов Борис Владимирович**

Официальные оппоненты:

**Кульба Владимир Васильевич** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), заведующий лабораторией

**Анисимов Владимир Георгиевич** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО СПбГПУ), профессор.

**Можяев Александр Сергеевич** доктор технических наук, профессор, ОАО «Специализированная инжиниринговая компания «Севзапмонтажавтоматика» (ОАО «СПИК СЗМА»), ведущий специалист.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ)**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 года в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д.002.199.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук по адресу: 199178, Санкт-Петербург, В.О., 14 линия, 39.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук, [spiras.nw.ru](http://spiras.nw.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_  
(дата)

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.002.199.01  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Баранов Сергей Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В последние годы наблюдается устойчивая тенденция усиления роли факторов сложности в существующих и проектируемых организационно-технических системах, используемых в различных предметных областях таких, как экономика, военное дело, экология и др. К настоящему времени появилось значительное количество сложных объектов (СЛО), исследование, описание, проектирование и управление которыми представляют существенные трудности и проблемы. Сложность современных объектов проявляется в таких аспектах, как структурная сложность, сложность функционирования, сложность выбора поведения, сложность моделирования и сложность развития.

Для успешного решения на практике возложенных на СЛО задач необходимо, чтобы данные системы были управляемы, т.е. способны изменять (перестраивать) свою структуру (структуры), состояния, параметры, способы функционирования в различных условиях обстановки.

Широкое распространение на практике при решении задач обеспечения живучести, катастрофоустойчивости и отказоустойчивости СЛО в рамках развиваемой в настоящее время теории управления структурной динамикой получил такой вариант управления структурами СЛО как *реконфигурация*.

Под *реконфигурацией* СЛО понимается целенаправленный процесс изменения структуры (структур) объекта в целях сохранения, восстановления, а в некоторых ситуациях и повышения уровней надежности и живучести СЛО, либо обеспечения минимального их снижения при возможной деградации и/или выходе из строя элементов и подсистем СЛО.

Кроме того, базируясь на определениях, данных в ГОСТах, в дальнейшем под *надежностью* СЛО будем понимать свойство указанного класса объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. В свою очередь под *живучестью* СЛО в «узком смысле», понимается его свойство, характеризуемое способностью выполнять установленный объем функций в условиях воздействий внешней среды и отказов компонентов системы в заданных пределах. В «широком смысле» под *живучестью* СЛО будем понимать его способность сохранять и восстанавливать свои основные функции после массового (возможно, целенаправленного) уничтожения его компонентов в результате различных катаклизмов, как природно-техногенного характера, так и инспирированных человеком. В последнее время при расширенной трактовке свойства живучесть чаще используют (особенно в зарубежной литературе) термин катастрофоустойчивость СЛО.

Проведенные исследования показали, что для достижения целей реконфигурации СЛО необходимо данный процесс сделать управляемым. При этом управление реконфигурацией СЛО по своей структуре многофункционально. В общем случае функции управления СЛО включают в себя: целеполагание, планирование (стратегическое, долгосрочное, оперативное, календарное и т.п.), регулирование (оперативное управление), а также функции контроля и учёта, мониторинга и координации. Среди них важнейшей функцией является функция *планирования реконфигурации* СЛО.

Под *планированием* будем понимать (согласно Акоффу Р.Л., 1978) процесс принятия предварительного решения об облике СЛО и механизмах его функционирования, обеспечивающих на заданном интервале времени достижение поставленных целей, направленный на предотвращение ошибочных действий и уменьшение неиспользованных возможностей и непосредственно связанный с функциями регулирования и координации.

**Степень научной разработанности проблемы.** Предварительный анализ как рассматриваемой проблемы многокритериального планирования реконфигурации СЛО с перестраиваемой структурой, которую необходимо решать на различных этапах его жизненного цикла, так и существующих теоретических методов и подходов ее решения, показал, что в рамках ранее разработанных теорий и методологий исследования указанного класса объек-

тов эти вопросы, как отдельный предмет исследований, с единой общесистемной точки зрения практически не рассматривались.

Говоря в целом об исследовании задач управления сложными объектами необходимо, прежде всего, отметить, что к настоящему времени значительный опыт накоплен в решении задач логико-вероятностного и статистического анализа свойств надежности, безопасности и живучести данных объектов. Наиболее значимые результаты в исследовании надежности, безопасности и живучести структурно-сложных объектов были получены при разработке методологии вероятностного анализа рассматриваемых свойств объектов с учетом рисков возникновения нештатных и аварийных ситуаций. Соответствующие теоретические разработки нашли свое воплощение в универсальных программных средствах, включающих в себя не только реализацию созданных в 60-х – 90-х годах моделей и методов, но и унифицированные процедуры обработки и расчета интенсивностей отказов элементной базы, средних времен восстановления, а также модули поддержки процедур выявления возможных видов и последствий отказов и т.д. В целом, в рассматриваемой области большим количеством авторских коллективов и соответствующих научных школ выполнен значительный объем НИР, НИОКР, ОКР, посвященных вопросам разработки методологических и методических основ исследования свойств структурно-сложных объектов. К таким научным коллективам можно, в первую очередь, отнести научные школы профессоров ПОЛОВКО А.М., УШАКОВА И.А. (теория надежности систем), МАХУТОВА Н.А. (вероятностный риск-анализ конструкций технических систем), РЯБИНИНА И.А. (логико-вероятностное исчисление), МОЖАЕВА А.С. (общий логико-вероятностный метод), СОЛОЖЕНЦЕВА Е.Д. (логико-вероятностный подход для групп несовместных событий), СЕВЕРЦЕВА Н.А. (теория системной безопасности), ИСЛАМОВА Р.Т., ОСТРЕЙКОВСКОГО В.А. (вероятностный анализ безопасности АЭС), СМИРНОВА А.В. (интеллектуальное управление конфигурациями виртуальных и сетевых организаций), КАЛЯЕВА И.А. (коллективное управление объектами при их групповом применении), КУРДЮМОВА С.П., МАЛИНЕЦКОГО Г.Г., КУЛЬБЫ В.В. (синергетика, когнитивное моделирование), УТКИНА Л.В. (анализ риска и принятие решений при неполной информации), ШУБИНСКОГО И.Б. (анализ структурно-функциональной надежности информационных систем), АНИСИМОВА В.Г. (адаптивное планирование и ресурсно-временная оптимизация сложных систем), ИМАЕВА Д.Х., ШЕСТОПАЛОВА М.Ю. (системы отказоустойчивого управления технологическими процессами), АХМЕТОВА Р.Н., МАКАРОВА В.П., СОЛЛОГУБА А.В. (система управления живучестью космических аппаратов дистанционного зондирования Земли), СОКОЛОВА Б.В., ОХТИЛЕВА М.Ю. (проактивное управление структурной динамикой сложных объектов), ЮСУПОВА Р.М. (информационная безопасность) и др.

Как показывает анализ, при исследовании в указанных направлениях в основном использовались модели оценивания и анализа показателей надежности, безопасности и живучести СЛО, которые, с одной стороны, предполагают вероятностную интерпретацию обрабатываемых данных и полученных статистических выводов, с другой стороны, сводятся к построению соответствующих структурных функций путем ортогонализации функций алгебры логики (ФАЛ) и замещением логических аргументов в ФАЛ вероятностями их истинности, а логических операций соответствующими арифметическими операциями. Во многих работах исследование надежности, безопасности и живучести систем осуществлялось с применением монотонных ФАЛ. Тем не менее, в практике исследования СЛО встречаются случаи, когда логическая функция, связанная с моделированием свойств СЛО, является немонотонной.

Хотя вероятностные методы широко и успешно применяются в научных исследованиях для моделирования аспектов неясности и неопределенности при управлении СЛО, проявляется повышенный интерес к не вероятностным подходам при описании случайности, нечеткости и неопределенности.

К настоящему времени в нашей стране и за рубежом получен целый ряд интересных научных и практических результатов, связанных с учетом, формализацией и анализом недостоверной, неполной, неточной информации в задачах принятия решений, в моделях

управления СЛО. Среди данных результатов можно выделить: способы формализации неопределенности; применение теории нечетких отношений, мер неопределенности и нечетких интегралов для решения слабо структурированных задач анализа сложных систем; нечеткие модели оптимизации и принятия решений (модели нечеткого математического программирования, нечеткой ожидаемой полезности, нечеткие модели коллективных решений, нечеткие модели многокритериальных задач, нечеткие динамические и лингвистические модели принятия решений и др.). В получении перечисленных теоретических и практических результатов выдающуюся роль сыграли такие учёные как ЗАДЕ Л.А., КОФМАН А., БОРИСОВ А.Н., АЛЕКСЕЕВ А.В., КРУМБЕРГ О.А., ОРЛОВСКИЙ С.А., ЯГЕР Р.Р., ДЮБУА Д., ПРАД А., СААТИ Т.Л., БЕЛЛМАН Р., АВЕРКИН А.Н., БЛИШУН А.Ф., ТАРАСОВ В.Б., ПОСПЕЛОВ Д.А., ФИШБЕРН П., КАНДЕЛЬ А., СУГЕНО М., НЕГОЙЦЭ К., ЯЗЕНИН А.В., КАЦПШИК Я., ТАНАКА К., ЗАЙЧЕНКО А.Л., ГУДМЭН И., НГУЕН Ф.Т., ЦУКАМОТО Я. и др.

В целом указанные подходы и модели позволяют отразить отдельные аспекты неопределенности СЛО. Однако, как показывает анализ, решение задач управления структурной динамикой СЛО в рамках одного класса моделей (аналитических, имитационных, детерминированных, стохастических, нечетких и т.п.) приводит к недостоверным, а в ряде случаев к ошибочным результатам, к снижению устойчивости управления рассматриваемым классом объектов.

В этих условиях значительно возрастает потребность в новых подходах к математическому описанию процессов управления структурной динамикой СЛО в условиях существенной неопределенности. Один из перспективных путей решения задач указанного класса может основываться на обобщении понятия меры и построения мер неопределенности, свободных от ряда ограничений вероятностной меры. Указанный нечетко-возможностный подход, как показали исследования, позволяет проводить комплексное моделирование различных факторов неопределенности при решении задач планирования реконфигурации СЛО, повышения уровня их информационно-технологических возможностей, а также устойчивости управления.

Применительно к современным СЛО реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления параметрами и структурами СЛО для парирования отказов функциональных элементов (классическая реконфигурация), но и как технологию управления, направленную на повышение надежности и живучести функционирования СЛО, обладающих структурно-функциональной избыточностью и функционирующих в динамически изменяющихся условиях. Данную технологию в отличие от *стандартной («слепой»)* реконфигурации будем называть *структурно-функциональной* реконфигурацией.

В дальнейшем в рамках диссертационной работы под *функциональным элементом (ФЭ)* СЛО будем понимать абстрактную (виртуальную) или реальную его часть, имеющую один или несколько входов и выходов, через которые осуществляется информационное, энергетическое, материальное взаимодействие с внешней средой и выполняющую одну или несколько функций, связанных с реализацией заданных алгоритмов управления объектом.

А под *динамически изменяющимися условиями* будем понимать условия, формируемые внешней средой, которая под действием объективных (субъективных), внутренних (внешних) причин, постоянно оказывает возмущающие воздействия на СЛО. Для парирования указанных воздействий с целью обеспечения требуемых уровней надежности и живучести СЛО необходимо осуществлять целенаправленное изменение во времени структур, параметров, характеристик, способов функционирования рассматриваемых объектов или, другими словами, необходимо осуществлять управление структурной динамикой СЛО.

Актуальность решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО чрезвычайно велика. Ее содержание определяется, с одной стороны, объективным противоречием между необходимостью совершенствования процесса многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурацией СЛО как основной

функции управления, и, с другой стороны, недостаточностью теоретического и методического обоснования данного процесса.

Таким образом, на основании анализа основных тенденций создания и развития современных СЛО можно сделать вывод о том, что проблема многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, обладающих структурно-функциональной избыточностью и функционирующих в динамически изменяющихся условиях является весьма *актуальной*.

**Целью диссертационной работы** является разработка методологических основ, комплекса моделей, комбинированных методов и алгоритмов многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов с перестраиваемой структурой для повышения уровней надежности и живучести их функционирования.

В соответствии с поставленной целью в работе были сформулированы следующие основные **задачи диссертационных исследований**:

1. Системный анализ проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО с перестраиваемой структурой.
2. Задачи исследования структурно-топологических и структурно-функциональных свойств монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных, равноценных и неравноценных структур СЛО.
3. Задачи формального описания и многокритериального анализа сценариев структурной реконфигурации СЛО.
4. Задача многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях.
5. Задача параметрического синтеза СЛО, обеспечивающего гарантированный уровень значений интегрального показателя качества планов его структурно-функциональной реконфигурации в динамически изменяющихся условиях.
6. Задача аналитико-имитационного моделирования условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО.
7. Задача проверки работоспособности и реализуемости разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО на основе создания и исследования соответствующего экспериментального образца программного комплекса.

**Объектом исследования** являются сложные организационно-технические объекты с перестраиваемой структурой.

**Предметом исследования** являются полимодельное описание, методы, алгоритмы и методики решения задач многокритериального анализа и синтеза программ структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях.

**Методы исследования.** В качестве основных методов исследования использованы методы системного анализа, методы декомпозиции и агрегирования, алгебры логики, теории вероятностей, теории нечетких множеств, отношений и мер, теории возможностей, теории графов и мографов, теории иерархической кластеризации, теории логико-вероятностного исчисления, нечеткой логики, теории планирования эксперимента, теорий линейного и динамического программирования, случайного поиска, теории многокритериального выбора.

**Научная новизна** полученных в диссертационной работе результатов, выводов и рекомендаций заключается в следующем:

1. Разработаны агрегативно-декомпозиционный подход и методология решения проблемы многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях. **В отличие от известных теоретических результатов** в диссертации проведено обобщение и развитие теоретических и методологических основ планирования реконфигурации СЛО, с помощью которых удалось, во-первых, учесть текущие характеристики решаемых в СЛО задач и выполняемых функций, во-вторых, осуществить анализ и синтез облика СЛО, обеспечивающего гарантированный уровень качества планов перераспределения операций обработки, сохранения, приема-передачи информации

онных и/или материальных разнотипных потоков между работоспособными или частично работоспособными ФЭ.

2. Предложена **оригинальная концепция генома монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур** СлО, основанная на уникальном представлении структуры объекта в виде вектора коэффициентов полинома структурной функции надежности (работоспособности, отказа). Применение данной концепции позволяет не только проводить исследование структурно-топологических свойств монотонных объектов, но и на основе логико-вероятностного и нечетко-возможностного подходов осуществлять оперативное **вычисление оптимистических и пессимистических оценок показателей структурной надежности однородных и неоднородных объектов**, показателей значимости, положительных и отрицательных вкладов отдельных ФЭ в показатель структурной надежности как монотонных, так и немонотонных СлО. Получено **новое аналитическое выражение** для вычисления показателя структурной живучести объекта, имеющего сложную комбинированную монотонную структуру. Показано, что использование генома структуры и его двойственного аналога позволяет определить верхнюю границу показателя структурной живучести монотонных СлО и приближенную оценку (для ряда структур нижнюю оценку) показателей их структурной живучести. На основе концепции генома структуры системы **впервые разработана обобщенная математическая модель** построения сценариев (траекторий) структурной реконфигурации **как монотонных, так и немонотонных** СлО. **Модель представляет собой задачу безусловной или условной оптимизации** соответственно при отсутствии, либо при наличии структурно-топологических ограничений.

3. Разработаны **новый** метод и реализующий его алгоритм решения оптимизационной задачи построения сценариев структурной реконфигурации СлО. **Новизна метода заключается** в комбинированном использовании метода случайного направленного поиска эволюционного типа и метода отсечений неперспективных вариантов структурной реконфигурации СлО, что **позволяет осуществить оперативное построение** серий оптимистических и пессимистических сценариев структурной реконфигурации СлО.

4. Разработаны два метода решения задачи многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СлО, один из которых ориентирован, **в отличие от известных**, на использование нечетко-возможностного подхода к построению результирующих показателей. Для учета нелинейного характера влияния частных показателей критичности ФЭ друг на друга и в целом на обобщенный показатель критичности отказов ФЭ СлО и **нечетко-возможностное представление частных показателей критичности**, предложено при построении обобщенного показателя использовать свертку в виде нечеткого интеграла по нечеткой мере. Вторым **новым методом** многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СлО основан на синтезе методов теории планирования эксперимента и нечеткого лингвистического описания высказываний. **Предложенный метод** анализа критичности отказов **позволяет** формализовать опыт эксперта (группы экспертов) в виде прогностических моделей в многомерном пространстве лингвистических показателей, минимизировать количество обращений к экспертам в процессе опроса и учесть комплексный нелинейный характер влияния различных групп частных показателей на результирующий показатель критичности ФЭ СлО. **Метод универсален**, т.к. реализует обобщенный подход к снятию критериальной неопределенности в задачах принятия решений, характеризующихся наличием множества частных показателей, информация о которых недостаточно точна или носит качественный характер. Введены **новые частные показатели критичности** ФЭ, учитывающие структурные и функциональные особенности СлО.

5. Разработан **способ снижения размерности** анализируемого пространства сценариев структурной реконфигурации СлО путем его кластеризации и выделения ядер полученных кластеров. Предложена **обобщенная методика многокритериальной кластеризации** множества сценариев структурной реконфигурации СлО (в частности, оптимистических и пессимистических) с использованием различных мер сходства и процедур сгущения кластеров,

а также с привлечением мер включения, позволяющая выявлять типовые (эталонные) сценарии структурной реконфигурации СЛО построенных кластеров.

6. Разработана обобщенная математическая модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, основанная на *оригинальной динамической интерпретация процессов* выполнения операций обработки, приема-передачи и хранения информационного и/или материального обмена между ФЭ. Модель *относится* к классу билинейных нестационарных дифференциальных динамических моделей с разрывными функциями в правых частях дифференциальных уравнений, определяющих структурную динамику объекта, и *отличается* от ранее известных учетом разнотипных информационных и/или материальных потоков, а также многокритериальным описанием альтернативных сценариев структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

7. Разработан *способ сведения* многокритериальной задачи оптимального управления с разрывными правыми частями к однокритериальной статической модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО с двусторонними ограничениями, основанный на предположении наличия временных интервалов постоянства структур СЛО.

8. Разработано *модельно-алгоритмическое обеспечение* решения задач параметрического синтеза СЛО, с помощью которого удалось *учесть деструктивные воздействия* в рамках оптимистического и пессимистического сценариев структурной реконфигурации СЛО и *обеспечить гарантированный уровень* значений интегрального показателя качества планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях.

**Практическая значимость и реализация результатов работы.** Полученные в диссертации результаты являются в достаточной степени универсальными и обеспечивают необходимые методологические и методические основы для решения важной и актуальной проблемы автоматизации процессов многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов. Диссертационные исследования выполнялись в рамках Программы фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН в 2007-2008 г. проект №О-2.5/03; в 2009-2011 г. проект №О-2.3; в 2012 г. проект № 2.11; а также грантов РФФИ 08-08-00346 (2008-2010 гг.), 08-08-00403 (2008-2010 гг.), 09-08-00259 (2009-2011 гг.), 10-07-00311 (2010-2012 гг.), 10-08-90027 (2010-2011 гг.), 11-08-00641 (2011-2013 гг.), 11-08-00767 (2011-2013 гг.).

Результаты диссертационной работы получили практическую реализацию в таких предметных областях как:

1. **Государственное управление.** В ВГУП СПб ИАЦ реализован комплекс моделей, методов и алгоритмов многокритериального оценивания и анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде в различных субъектах РФ.

2. **Управление космическими средствами.** В ЗАО «СКБ Орион» в рамках ОКР «Русь-М» и при выполнении СЧ ОКР «Разработка автоматизированной системы управления подготовкой и пуском ракет космического назначения» реализован метод многокритериального анализа критичности отказов элементов сложных технических систем и применен структурно-функциональный показатель «интенсивности применения элементов технических систем» при оценивании интегрального показателя готовности ресурсов операций технологического графика подготовки и пуска ракет космического назначения.

3. **Судостроение.** В СПбГМТУ в рамках НИР по теме «ЦКСУ-ИП» (х-442) разработаны и реализованы математическая модель и методики многокритериального исследования критичности отказов функциональных элементов, структурной надежности и живучести общесудовых систем и канализации электроэнергетики судна.

4. **Управление войсками и оружием.** В ЦНИИЭИСУ в рамках ОКР «Заря-22» разработаны и реализованы модели, методы и алгоритмы многокритериального оценивания и анализа критичности отказов функциональных элементов сложных технических систем при создании программного обеспечения системы поддержки принятия решений для АСУ специального назначения.

5. **Проектирование ракетно-космической техники.** В ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга в рамках СЧ ОКР «Разработка комплекса методик и моделей для оценки вероятностно-временных характеристик функционирования АСУ КА в штатных и заданных условиях работы» разработаны и реализованы модельно-алгоритмическое и методическое обеспечение формирования сценариев структурной реконфигурации объектов для расчета и многокритериального оценивания основных характеристик и показателей качества функционирования АСУ космическими аппаратами (КА) в штатных и заданных условиях.

6. **Образовательная деятельность.** Берлинская школа экономики и права (Германия), ГУАП (Санкт-Петербург, РФ). Для специалистов и магистров разработан комплекс теоретических и практических занятий по тематике: модельно-алгоритмическое и методическое обеспечение параметрического синтеза структур сложного объекта и робастности планов его реконфигурации в динамически изменяющихся условиях.

Практическая значимость перечисленных результатов подтверждена актами о реализации, полученными из соответствующих организаций.

Решение сформулированной проблемы и обобщение полученных научных результатов определило следующие **положения, выносимые на защиту**:

1. Агрегативно-декомпозиционный подход и методология решения проблем многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО.
2. Модели, методы и алгоритмы многокритериального оценивания и анализа критичности отказов ФЭ СЛО.
3. Модельно-алгоритмическое обеспечение формирования сценариев структурной реконфигурации СЛО.
4. Модели, методы и алгоритмы многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях.
5. Модельно-алгоритмическое и методическое обеспечение параметрического синтеза СЛО, обеспечивающего гарантированный уровень качества планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях.

**Достоверность и обоснованность** научных положений, основных выводов и результатов диссертации обеспечиваются всесторонним анализом современного состояния исследований в проблемной области, подтверждаются корректностью предложенных моделей и алгоритмов, согласованностью результатов численного моделирования и экспериментальных данных, апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на российских и международных научных и научно-практических конференциях, семинарах и симпозиумах.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на всероссийских, международных научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах: II, III международных конференциях «Системный анализ и информационные технологии» (САИТ-2007), Обнинск, 2007 г., (САИТ-2009), Звенигород, 2009 г.; V Санкт-Петербургской межрегиональной конференции «Информационная безопасность России (ИБРР)», г. Санкт-Петербург, 2007 г.; 5-я, 6-я научных конференциях «Управление и информационные технологии» (УИТ-2008), Санкт-Петербург, 2008 г., (УИТ-2010), Санкт-Петербург, 2010 г.; XI международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008), г. Санкт-Петербург, 2008 г.; XI, XII, XIII Санкт-Петербургских международных конференциях «Региональная информатика-2008, 2010, 2012» (РИ-2008, РИ-2010, РИ-2012), г. Санкт-Петербург, 2008 г., 2010 г., 2012 г.; XV международной конференции "Проблемы управления безопасностью сложных систем", г. Москва, 2008 г.; VIII, X, XI международных научно-практических конференциях «Логистика: современные тенденции развития», Санкт-Петербург, 2009 г., 2011 г., 2012 г.; X, XI, XII, XIII международных научно-технических конференциях «Кибернетика и высокие технологии XXI века», Воронеж, 2009 г., 2010 г., 2011 г., 2012 г.; IX, X, XI международных научных школах МА БР-2009, МА БР-2010, МА БР-2011 «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах», Санкт-Петербург, 2009 г., 2010 г., 2011 г.; IV, V всероссийских научно-практических конференциях по имитационному моделированию и его при-

менению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009), (ИММОД-2011), Санкт-Петербург, 2009 г., 2011 г.; V российско-немецкой конференции "Логистика и управление цепями поставок: перспективы в России и Германии", г. Санкт-Петербург, 2010 г.; 10-ой, 11-ой, 12-ой международных конференциях «Reliability and Statistics in Transportation and Communication» (RelStat'10, RelStat'11, RelStat'12), Рига, Латвия, 2010 г., 2011 г., 2012 г.; III всероссийской научно-практической конференции «Территориально-распределенные системы охраны», г. Калининград, 2010 г.; VIII всероссийской школе-семинаре «Прикладные проблемы управления макросистемами», Апатиты, 2010 г.; Первой международной конференции «Автоматизация управления и интеллектуальные системы и среды», Терскол, 2010 г.; научной конференции в честь 20-летия ФГУП «Концерн «Системпром» «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения», Москва, 2011 г.; XIII международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 2011 г.; Пятой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2011)», Москва, 2011 г.; VII российско-немецкой конференции "Гибкость и адаптивность глобальных цепей поставок", Санкт-Петербург, 2012 г.; международном симпозиуме «Надежность и качество-2012», Пенза, 2012 г.; 26-й Европейской конференции по имитационному моделированию (ECMS 2012), Германия, Кобленц, 2012 г.; Всероссийской конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2012), Санкт-Петербург, 2012 г.; Первой научно-практической конференции «Современные технологии автоматизации процессов борьбы за живучесть» (АПБЖ-2012), Санкт-Петербург, 2012 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения», Санкт-Петербург, 2013 г.; Второй международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2013), Санкт-Петербург, 2013 г.

**Публикации.** По результатам исследования опубликовано более 80 печатных работ, из них: 14 в периодических журналах, рекомендованных ВАК, 5 в зарубежных изданиях, входящих в систему цитирования Web of Science и Scopus, издано 3 учебника и 5 учебных пособий (в соавторстве), получено три патента на изобретение Российской Федерации.

**Личный вклад автора** в основных публикациях с соавторами кратко характеризуется следующим образом: в публикациях [50,53] ему принадлежит агрегативно-декомпозиционный подход и методология решения проблемы многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях; в [2,4,6,9,16,18,22,29,34-36,38,41,44,48,56] предложена оригинальная концепция генома монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СЛО и рассмотрены подходы к оперативному вычислению оптимистических и пессимистических оценок структурной надежности и структурной живучести СЛО; в [4,9,18,24,34,35] разработаны математическая модель, метод и алгоритм оптимизационной задачи построения сценариев (траекторий) структурной реконфигурации как монотонных, так и немонотонных СЛО; в [7,8,20,25,28,30,31,40,42,56] - методы многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СЛО с показателями, представленными в виде нечетких чисел или лингвистических переменных; в [4,5,9,21-23,26,27,29,33,38,49] разработана методика многокритериальной кластеризации множества сценариев структурной реконфигурации СЛО; в [1,13,14,15,19,43,52-55] - математическая модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО и результаты работы прототипа комплекса программ; в [15,17] - математическая модель параметрического синтеза структуры СЛО и результаты работы прототипа комплекса программ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы из 297 наименований. Работа содержит 381 страницу текста с 112 рисунками и 45 таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, проведен анализ исследуемой научной проблемы и обоснован подход к ее решению, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, определена научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту, аргументированы обоснованность и достоверность полученных результатов, а также приведены сведения об их реализации и апробации.

**В первом разделе** проведен системный анализ обеспечения непрерывности технологических процессов, а также повышения уровня надежности и живучести современных СЛО. В ходе исследований установлено, что для нейтрализации угроз и минимизации потерь, вызываемых нештатными, аварийными, чрезвычайными и катастрофическими ситуациями, приводящими к лавинообразному нарастанию деградационных процессов и разрушений СЛО, требуется разработка новых принципов, подходов, способов и методов оперативного мониторинга, анализа и прогнозирования ситуаций, разработка вариантов управляющих решений, процедур их выбора и реализации в рамках теории управления структурной динамикой. Для успешного решения возложенных на СЛО задач необходимо управлять изменением их структурных состояний, параметров, способов функционирования в различных условиях обстановки. Широкое распространение на практике при решении задач обеспечения надежности, отказоустойчивости, живучести и катастрофоустойчивости СЛО получил такой вариант управления структурами СЛО как реконфигурация.

Проведенный анализ современных подходов к планированию реконфигурации СЛО позволил выявить основные существующие варианты классической («слепой») реконфигурации.

**Вариант I (Кравец В.Г., Любинский В.Е. – 1983 г.).** В качестве ФЭ СЛО рассматривали многофункциональные унифицированные (однородные) вычислительные средства. Процедура реконфигурации СЛО заключается в следующем. Множество решаемых задач разбивается на группы задач с близкими (одинаковыми) характеристиками. Каждая группа задач решается на одном ФЭ. При отказе ФЭ выполняемая им группа задач передается на ФЭ, где решаются задачи с наиболее низкими приоритетами. Если не удастся решить задачи объединенных групп, то задачи группы с низкими приоритетами снимаются с решения.

**Вариант II (Турута Е.Н. – 1983 г., Богатырев В.А. – 2002 г., Бородакий Ю.В., Тарасов А.А. – 2006 г.).** В отличие от рассмотренного варианта I в данном случае ФЭ взаимодействуют посредством некоторой телекоммуникационной подсистемы. Каждый ФЭ содержит процессоры, оперативное и долговременное запоминающее устройство, соответствующие интерфейсы, взаимодействует с внешней средой (объектами управления, операторами и др.) с помощью выделенных для этого аппаратно-программных средств. Для начального состояния осуществляется построение плана распределения задач и информационных потоков с учетом технологических, технических, стоимостных, временных, ресурсных и т.п. ограничений. В случае перехода СЛО (вызванного отказом некоторой совокупности ФЭ) в другое состояние осуществляется перераспределение решаемых СЛО задач между работоспособными ФЭ. Обеспечение требуемого уровня отказоустойчивости СЛО осуществляется путем итогового размещения в различных ФЭ резервных копий алгоритмов решаемых задач.

**Вариант III.** Проведенный анализ показал, что при решении задачи реконфигурации функционирования СЛО в рамках предлагаемых выше вариантов I, и II, как правило, требуется сформировать множество промежуточных состояний, переход в которые приводит к потере управления рассматриваемыми объектами, либо множество всех состояний, не допускающее перерывов в функционировании СЛО из-за необходимости его перестройки при отказах ФЭ, либо, как правило, множество всех состояний, вероятности перехода в которые из начального состояния не менее заданной величины. При указанных предпосылках целесообразно задачу реконфигурации СЛО в условиях действия случайных возмущений представ-

лать с использованием подходов, базирующихся на идеях двухэтапного или многоэтапного стохастического программирования.

Таким образом, в рамках существующих подходов к реализации стандартной реконфигурации при отказах и нарушениях правильности функционирования соответствующего СЛО для сохранения наиболее приоритетных функций указанного объекта или допустимых условий работоспособности “жертвуют” другими функциями или частью работоспособных элементов.

Однако в реальных ситуациях отказ одного вида ресурса СЛО может вести к отказу или снижению эффективности функционирования других его ресурсов. При этом замена отказавшего ресурса требует *оперативного формирования на этапе применения новых работоспособных конфигураций СЛО*, обеспечивающих заданный уровень надежности и живучести функционирования СЛО в динамически изменяющихся условиях. Таким образом, применительно к современным СЛО реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления структурами СЛО для компенсации отказов, но и как технологию управления, направленную на повышение *живучести и надежности* функционирования СЛО. Причем под свойством *живучести* будем понимать способность СЛО сохранять и восстанавливать свои основные функции после массового (возможно, целенаправленного) уничтожения его компонентов в результате различных катаклизмов, как природно-техногенного характера, так и инспирированных человеком. Учитывая выше сказанное, концепцию реконфигурации СЛО следует рассматривать в узком смысле («слепая» реконфигурация) как процесс для обеспечения свойства *отказоустойчивости* (в трактовке научных школ Туруты Е.Н., Богатырева В.А., Бородакия Ю.В., Тарасова А.А.) системы и в широком смысле (*структурно-функциональная реконфигурация*) – для обеспечения свойства *живучести* системы.

На основании результатов проведенного системного анализа, на *содержательном уровне* суть решаемой в диссертации проблемы многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО с перестраиваемой структурой сводится к следующему: известно исходное структурное состояние СЛО, известен состав, допустимые варианты структурного построения СЛО, варианты сценариев изменения входных воздействий на элементы и подсистемы СЛО, известны пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с процессом его применения по целевому назначению в различных условиях обстановки, задан интервал времени, на котором проводится процесс планирования реконфигурации СЛО, определён перечень показателей, с помощью которых оцениваются различные аспекты структурной динамики СЛО (структурно-функциональные, структурно-топологические показатели).

*Требуется найти* такую последовательность плановых воздействий на параметры, элементы, подсистемы и в целом на СЛО, при которой для каждого заданного сценария изменения возмущающих воздействий на СЛО обеспечивался рациональный переход данной системы из текущего в требуемое макросостояние.

В дальнейшем под *макросостоянием* будем понимать многоструктурное состояние СЛО, характеризующее состояние основных элементов подсистем и структур СЛО и отношений между ними.

Для формализации проблемы многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО было проведено ее обобщенное теоретико-множественное описание.

В ходе диссертационных исследований были приняты следующие *предположения*.

Проведенный анализ структурной динамики СЛО показывает, что, как правило, *структуры* СЛО не изменяются непрерывно, а *являются постоянными на некоторых временных интервалах (первое предположение)*.

В дальнейшем будем предполагать, что заданный интервал времени  $T = (t_0, t_f]$ , на котором проводится управление структурной динамикой (УСД) СЛО, можно разбить на неко-

торое число  $L$  подынтервалов  $T = \{(t_0, t_1], (t_1, t_2], \dots, (t_{L-1}, t_L = t_f]\}$  постоянства структуры СЛО. В каждом подынтервале  $T_k = (t_{k-1}, t_k]$  СЛО находится в неизменном состоянии  $S_{V_k} \in S$ .

Планирование структурно-функциональной реконфигурации СЛО будет проводиться, исходя из предположения (**второе предположение**), что нерасчетная нештатная ситуация, авария и, в самом общем случае, катастрофа в отличие от отказа (события прогнозируемого, вероятного) являются возможными событиями, не имеющими событийно-частотной интерпретации, и не могут быть обоснованно оценены и спрогнозированы на различных этапах жизненного цикла СЛО в рамках классической теории вероятностей.

Особенность постановки задачи планирования реконфигурацией СЛО, в первую очередь, связана с тем, что *совокупность частных показателей*  $F(S_v) = (F_1(S_v), F_2(S_v), \dots, F_H(S_v))$ , характеризующих различные свойства СЛО, может быть *декомпозирована на две группы показателей* (**третье предположение**): структурно-топологические показатели; структурно-функциональные показатели.

Причем следует отметить, что критериальная неопределенность в рассматриваемой задаче реконфигурации СЛО обуславливает необходимость использования соответствующих методов решения задач многокритериального выбора. При этом основу таких методов составляет доопределение (уточнение) задачи путем привлечения дополнительной качественной и количественной информации о свойствах критериальных функций, об альтернативах, о принципах оптимальности и т.п., что позволит построить результирующее отношение предпочтения (интегральный показатель информационно-технологических возможностей СЛО).

Помимо указанных особенностей при исследовании структурной динамики СЛО (в частности, реконфигурации СЛО) важным и неотъемлемым условием изучения возможностей СЛО является проведение анализа и оценивания архитектуры структурных состояний СЛО. Одним из возможных подходов к изучению структурных состояний СЛО является таксономия структур, базирующаяся на таких понятиях, как «*однородность-неоднородность*», «*равноценность-неравноценность*», «*монотонность-немонотонность*».

Приведенные особенности требуют разработки методологических основ исследования однородных и неоднородных, монотонных и немонотонных, равноценных и неравноценных структур СЛО.

Кроме указанных проблем при решении задачи планирования реконфигурации СЛО даже в условиях введенных предположений возникают частные проблемы, вызванные следующими обстоятельствами.

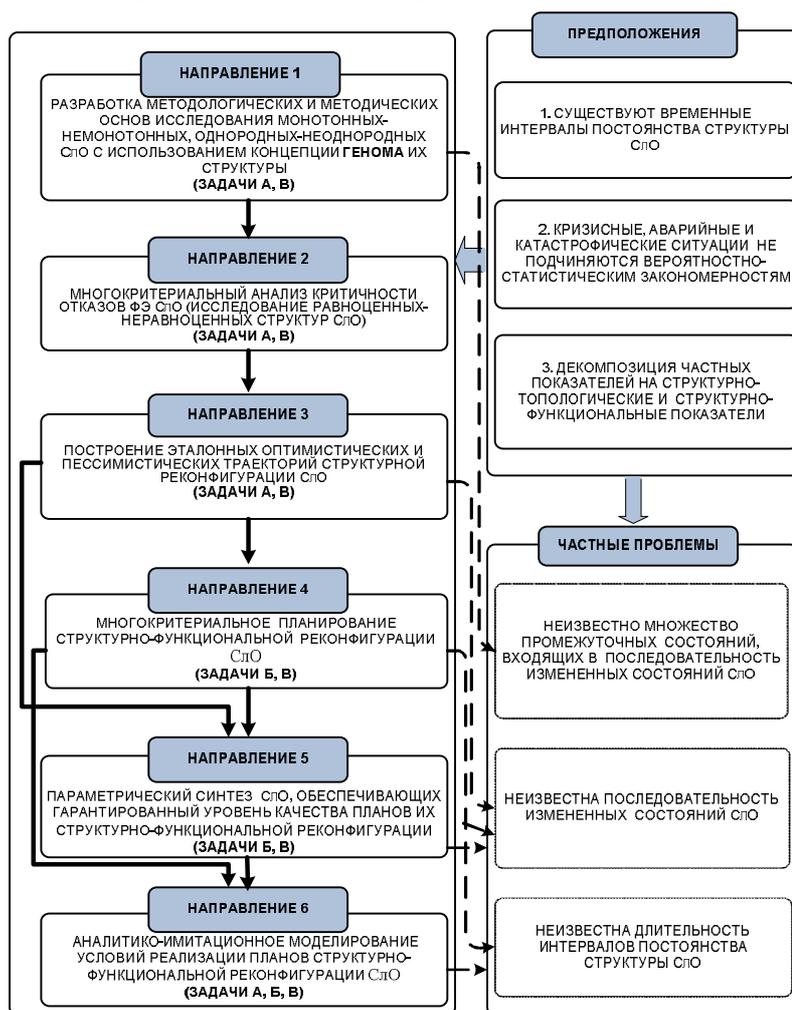


Рисунок 1 – Направления диссертационных исследований

**Во-первых**, неизвестна последовательность измененных состояний СЛО  $S_0 \rightarrow S_{v_1} \rightarrow \dots \rightarrow S_{v_L}$ , вызванных деструктивными воздействиями различной природы.

**Во-вторых**, заранее неизвестно множество промежуточных состояний  $\{S_{v_k}\} \subseteq S$ , входящих в указанную последовательность в реальных условиях.

И, **наконец**, неизвестна длительность интервалов постоянства структур СЛО.

Для преодоления создавшихся трудностей, предлагается применить агрегативно-декомпозиционный подход к решению задачи планирования реконфигурации СЛО, включающий в себя следующие **направления** (рисунок 1).

С учётом вышеизложенного проблема комплексного моделирования и многокритериального оценивания, анализа и выбора структурно-функциональной реконфигурации СЛО на этапе его применения по целевому назначению предполагает формулировку и решение трёх основных классов задач.

**Задачи класса А** – задачи анализа структурной динамики СЛО. Данный класс задач включает в свой состав *вторую* и *третью* задачи диссертационного исследования.

**Задачи класса Б** – задачи разработки, анализа и многокритериального синтеза планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях. В состав данного класса входят *четвертая* и *пятая* задачи диссертационного исследования.

**Задачи класса В** – вспомогательные задачи вычисления структурно-топологических и структурно-функциональных показателей, проведения экспертного опроса и экспертного оценивания, многокритериального анализа критичности отказов ФЭ СЛО, кластеризации сценариев структурной реконфигурации СЛО, а также *шестая* и *седьмая* задачи диссертационного исследования. В диссертации определены исходных данных для указанных классов решаемых задач.

В результате проведенного системного анализа решаемой в диссертационной работе проблемы были выявлены особенности современных СЛО, обладающих перестраиваемой структурой и структурно-функциональной избыточностью и функционирующих в динамических условиях. Указаны концепции, принципы, подходы, требования, которым должны удовлетворять исследования проблемы многокритериального планирования реконфигурации СЛО. Особое внимание уделе-

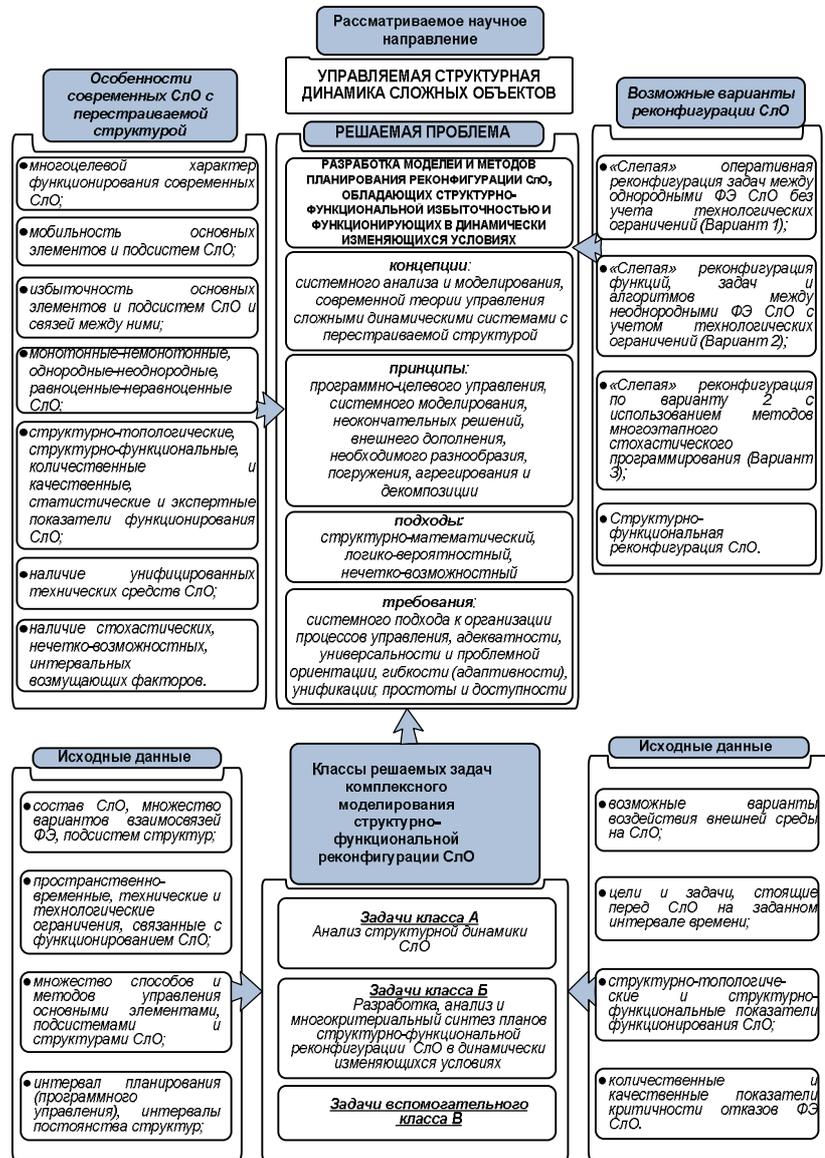


Рисунок 2 – Методологические основы решения проблемы

но основным возможным вариантам реконфигурации СЛО. Все вышеуказанные аспекты представляют методологические основы решения поставленной в диссертации проблемы и представлены на рисунке 2.

**Во втором разделе** подробно рассмотрено *первое направление* диссертационных исследований, посвященное изучению монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СЛО.

Проведен анализ современных методов структурного моделирования сложных монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных систем. Предложена классификация структур СЛО на монотонные и немонотонные структуры первого и второго типа, представленная на рисунке 3. К монотонным (немонотонным) структурам второго типа относятся структуры взаимодействия ФЭ СЛО, которые можно описать монотонными (немонотонными) логическими функциями, но нельзя представить связными графами (нечеткими когнитивными картами).

В случае отнесения структуры СЛО к монотонной или немонотонной структуре первого типа для комплексного исследования качества функционирования СЛО можно дополнительно применять соответственно математический аппарат теории нечетких отношений или методы когнитивного моделирования.

В результате проведенного в диссертации исследования предложена оригинальная концепция обобщенного генома структурного построения различных объектов. Данный подход позволяет с использованием генома в обобщенном виде хранить топологические свойства структуры, проводить классификацию структур на монотонные и немонотонные, выполнять оперативный анализ свойств структурной надежности и структурной живучести, осуществлять исследования структурной реконфигурации СЛО.

Так для монотонных и немонотонных структур введено обобщенное понятие генома структуры и его двойственного аналога, представляющих соответственно собой вектора  $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$  и  $\eta = (\eta_0, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$ , компонентами которых являются коэффициенты полинома функции структурного отказа  $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$  (структурной надежности  $R(P) = \eta_0 + \eta_1 P + \eta_2 P^2 + \dots + \eta_n P^n$ ) объекта, составленной из однородных элементов.

Используя предложенную концепцию генома структуры системы, проведены исследования структурной надежности и структурной живучести СЛО.

Так при вероятностном описании отказов ФЭ СЛО вычисление значений интегрального показателя структурного отказа СЛО, имеющего однородную (монотонную или немонотонную) структуру (одинаковая вероятность отказа ФЭ СЛО), осуществляется по формуле

$$F_{\text{однор}}(\chi) = \int_0^1 T(Q) dQ = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1}\right)^T, \text{ а в случае неоднородной структуры}$$

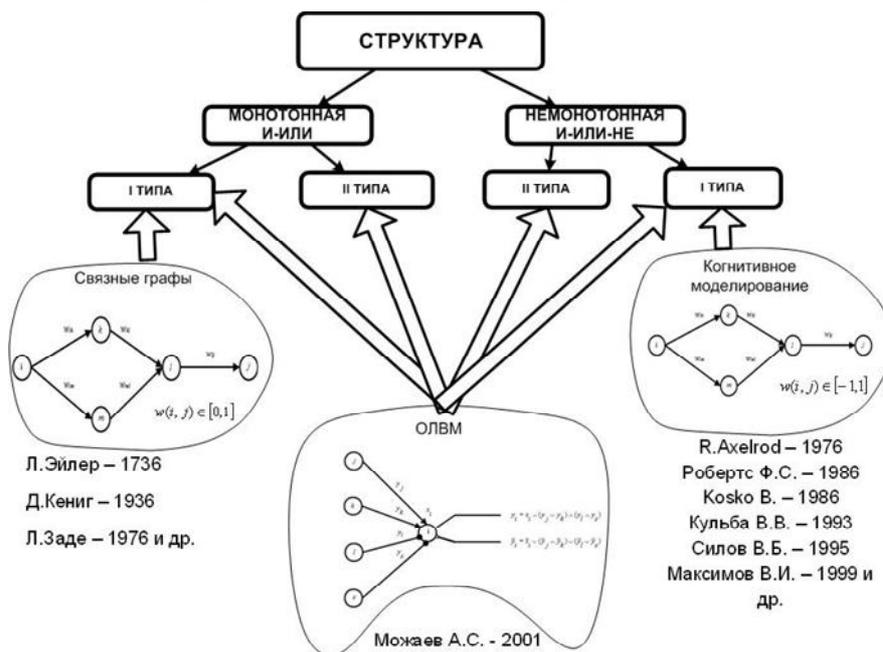


Рисунок 3 – Классификация способов описания структур систем

(разная вероятность отказа ФЭ СЛО) по формуле

$$F_{\text{неоднор}}(\chi) = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) dQ_1 dQ_2 \dots dQ_n = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n})^T.$$

При нечетко-возможностной интерпретации отказов ФЭ СЛО интегральный показатель возможности отказа структуры можно вычислять по следующим формулам:

- для монотонных структур  $F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}) = 1 - \mu_*$ , где  $\mu_*$  — решение уравнения  $(\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot (1, \mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = 1 - \mu_*$ ;
- для немонотонных структур (полином отказа не сохраняет «0» и «1») по формуле  $F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}) = \mu_*$ , где  $\mu_*$  — решение уравнения  $(\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot (1, \mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = \mu_*$ ;
- для немонотонных структур (полином отказа либо не сохраняет «0», либо не сохраняет «1») используется формула

$F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}) = \sup_{\mu \in [0,1]} \min\{T(\mu), g(\mu)\} = \sup_{\alpha \in [0,1]} \min\{\alpha, P(\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\})\}$ , причем мера возможности

в случае  $T(1) = 0$  есть  $P(\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}) = \sup_{A \subseteq H_\alpha} |A| = \sup\{\mu^{\max} - \mu^{\min}\}$

( $\mu^{\max} = \sup\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}$  и  $\mu^{\min} = \inf\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}$ ), а в случае  $T(0) = 1$  равна  $P(\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}) = \sup_{A \subseteq H_\alpha} |A| = \sup\{1 - (\mu^{\max} - \mu^{\min})\}$  ( $\mu^{\max} = \sup\{\mu | T(\mu) \leq \alpha\}$  и  $\mu^{\min} = \inf\{\mu | T(\mu) \leq \alpha\}$ ).

При вычислении значений интегральных показателей структурной надежности требуется использовать двойственный генетом структуры.

Наряду с вычислением показателей структурного отказа (структурной надежности) СЛО, предлагаемый подход можно использовать для определения значимости, положительного и отрицательного вкладов отдельных ФЭ объекта в интегральный показатель его структурного отказа (структурной надежности). Для вычисления значимости  $i$ -го элемента в структурный отказ СЛО следует воспользоваться следующим полиномом

$$\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1} - T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0}.$$

Полиномы для вычисления положительных и отрицательных вкладов элементов имеют следующий вид

$$B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1} - T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n),$$

$$B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = -(T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1} - T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0}).$$

Здесь  $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1}$  - полином функции структурного отказа при выходе из строя  $i$ -го элемента,  $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0}$  - полином функции структурного отказа при безотказной работе  $i$ -го элемента.

Далее изложены теоретические основы вычисления значений показателей структурной живучести и деградации СЛО. Известная интегральная оценка  $F_g = \int_0^1 \hat{\Psi}(x) dx$  структур-

ной живучести параллельно-последовательных структур с мажоритарными элементами обобщена для СЛО, имеющих сложную комбинированную монотонную структуру 1 типа.

Для рассматриваемого случая функция структурной живучести  $\hat{\Psi}(x)$  описывается на основе интерполяции функции  $\Psi(i) = 1 - \frac{N_i}{C_n^i}$ , для которой получено **новое аналитическое выра-**

**жение** числа неработоспособных структурных состояний  $N_i$  при обобщенном отказе  $i$ -ой кратности равное

$$\begin{aligned}
N_i = & \sum_{j=1}^k \delta(i - m_j) C_{n-m_j}^{i-m_j} - \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} + m_{j_1 j_2}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}+m_{j_1 j_2}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}+m_{j_1 j_2}} + \\
& + \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \sum_{j_3 > j_2}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - m_{j_3} + m_{j_1 j_2 j_3}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}+m_{j_1 j_2 j_3}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}+m_{j_1 j_2 j_3}} - \dots \\
& \dots (-1)^{k-1} \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - \dots - m_{j_k} + m_{j_1 j_2 \dots j_k}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}+m_{j_1 j_2 \dots j_k}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}+m_{j_1 j_2 \dots j_k}}
\end{aligned}$$

В приведенном выражении  $\delta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$  - дискретная функция Хэвисайда, величины

$m_j$  ( $j=1, \dots, k$ ) характеризуют число элементов в минимальных сечениях отказов, а  $m_{j_1 j_2 \dots j_k}$  - суммарное число общих элементов в минимальных сечениях отказов с номерами  $j_1, j_2, \dots, j_k$ .

Однако, для реальных СЛО вычисление приведенных оценок представляет собой трудную комбинаторную задачу. Показано, что использование генома структуры и его двойственного аналога позволяет определить как верхнюю границу показателя структурной живучести СЛО, так и приближенную оценку показателя структурной живучести

$$\hat{F}_g = \frac{2k-1}{2n} + \left(1 - \frac{\chi_k}{C_n^k} + \frac{\eta_l}{C_n^l}\right) \frac{n-k-l+1}{2n} \quad (\text{где } \chi_k > 0, \chi_i = 0 \forall 0 < i < k; \eta_l > 0, \eta_j = 0 \forall 0 < j < l),$$

которая для ряда структур является также и нижней оценкой рассматриваемого показателя.

Таким образом, использование разработанной в диссертации оригинальной концепции генома монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СЛО позволяет не только проводить исследование структурно-топологических свойств монотонных объектов, но и на основе логико-вероятностного и нечетко-возможностного подходов осуществлять оперативное вычисление оптимистических и пессимистических оценок показателей структурной надежности, значимости, положительных и отрицательных вкладов отдельных ФЭ в показатель структурной надежности как монотонных, так и немонотонных СЛО, а также показателя структурной живучести монотонных систем.

**В третьем разделе** проводится комплексное исследование свойств равноценных и неравноценных структур СЛО на основе многокритериального оценивания и анализа критичных ФЭ СЛО, отказ которых приводит к изменению структурного состояния объекта.

Проведен анализ современного состояния исследований критичности отказов элементов сложных систем. Показано, что критичность отказов элементов СЛО представляет собой комбинированное свойство, для изучения которого требуется использовать различные частные показатели критичности, такие как степень тяжести последствий отказа, вероятность отказа, устойчивость элемента к воздействию внешних неблагоприятных факторов среды, степень резервирования, контролируемость состояния элемента в ходе эксплуатации, продолжительность существования риска отказа, возможность локализации отказа.

Однако применительно к СЛО, которые характеризуются сложностью структурного построения и сложностью входящих в них подсистем и компонент, а также неравномерностью использования ФЭ при выполнении целевых задач, целесообразно учитывать и другие показатели критичности отказов. Так, согласно проведенного в разделе 2 анализа, к таким показателям можно отнести показатели структурной надежности (отказа), структурной значимости ФЭ СЛО, их положительного и отрицательного вкладов в структурную надежность.

Помимо указанных структурно-топологических показателей, в перечень показателей критичности отказов ФЭ СЛО предложено ввести структурно-функциональные показатели, связанные с интенсивностью и равномерностью использования ФЭ СЛО при выполнении различных технологических операций управления. Для анализа интенсивности и равномерности применения ФЭ СЛО предлагается использовать подход, предложенный профессором В.А. Горбатовым, подразумевающий описание сложных систем в виде специальных *модельных графов и вычисления их производных*. Использование такого подхода позволяет прово-

дить анализ структурно-функциональных свойств СЛО и вычислять различные показатели – интенсивность применения элементов в тех или иных процессах, равномерность участия элементов в различных технологических циклах управления и т.д.

В самом общем случае частные показатели критичности отказов элементов СЛО носят как количественный, так и качественный характер. Поэтому в обобщенном виде задача выявления и ранжирования ФЭ СЛО по степени критичности отказов представляет собой задачу многокритериального оценивания с лингвистическими показателями критичности отказов ФЭ СЛО. Проанализированы современные методы многокритериального оценивания, приведены их достоинства и недостатки. Показано, что в современных условиях весьма актуальной как в теоретическом, так и практическом плане становится проблема разработки комплекса новых методов многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СЛО в условиях дефицита числовой информации, а также в условиях некорректной, неточной и противоречивой информации.

Предложен новый метод решения многокритериальной задачи оценивания критичности отказов ФЭ СЛО, учитывающий нелинейный характер влияния частных показателей критичности ФЭ друг на друга и в целом на обобщенный показатель критичности отказов ФЭ СЛО и нечетко-возможностное представление частных показателей (в виде нечетких чисел). В основе метода лежит нечетко-возможностная свертка частных показателей критичности отказов ФЭ СЛО с использованием понятий нечеткой меры и нечеткого интеграла.

Для частного случая, когда показатели критичности отказов из множества  $F = \{f_i, i \in \Gamma\}$  принимают четкие значения, т.е.  $f_i: W \rightarrow R^1$ , методика многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СЛО состоит из следующих шагов.

**Шаг 1.** Построение оценочной функции  $h: F \times W \rightarrow [0,1]$  путем нормировки частных показателей  $f_i, i \in \Gamma = \{1, 2, \dots, m\}$ .

**Шаг 2.** Проведение экспертного опроса для нахождения коэффициентов важности отдельно взятых показателей  $g_i, i = 1, \dots, m, (0 < g_i < 1)$ .

**Шаг 3.** Построение  $\lambda$ -нечеткой меры Сугено, характеризующей важности различных совокупностей показателей из множества  $F$ . Для чего осуществляется нахождение корня  $\lambda^*$  из интервала  $(-1, \infty)$  следующего полинома  $m-1$  порядка

$$\left[ \prod_{i=1}^m (1 + \lambda^* g_i) - 1 \right] / \lambda^* = 1.$$

Доказана теорема о том, что рассматриваемые полиномы имеют ровно один корень в интервале  $(-1, \infty)$ .

**Шаг 4.** Вычисление значения результирующего показателя критичности отказа ФЭ СЛО на основе нечеткой свертки частных показателей

$$f_{pez}(w) = F^{pez}(\{f_i(w)\}_{i=1, \dots, m}) = \int h \circ G_\lambda = \sup_{\alpha \in [0,1]} \min \{ \alpha, G_\lambda(H_\alpha(w)) \}$$

$$\text{где } H_\alpha(w) = \{f_i | h(f_i, w) \geq \alpha\}, G_\lambda(H_\alpha(w)) = \left[ \prod_{f_i \in H_\alpha(w)} (1 + \lambda^* g_i) - 1 \right] / \lambda^*.$$

В случае, когда частные показатели критичности отказов ФЭ заданы лингвистическими переменными, предложен оригинальный метод многокритериального оценивания, в основе которого лежит комбинация методов теории планирования эксперимента и нечеткого логико-лингвистического описания высказываний. Для снятия критериальной неопределенности используются знания экспертов, формально представленные нечеткими продукционными моделями о характере влияния частных показателей друг на друга и на результирующий показатель критичности. Обработка экспертных знаний, минимизация числа обращений к экспертам и построение псевдоуниверсальной свертки частных показателей критичности

отказов в виде  $f_{pez} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} f_i f_j + \dots + \lambda_{12\dots m} f_1 f_2 \dots f_m$  осуществляется методами ортогонального планирования дробного или полного факторного эксперимента.

Методика предложенного подхода к многокритериальному оцениванию критичности отказов ФЭ СЛО состоит из следующих шагов.

**Шаг 1.** Описание интегрального показателя качества выполнения операции с помощью лингвистической переменной вида:  $\langle f_{pez}, W, U \rangle$ , где  $f_{pez}$  – название переменной;  $U=[0,1]$  – универсальное множество;  $W = \{W_j | j = \overline{1, w}\}$  – терм-множество, элементы которого представлены как нечеткие множества на  $U$ ;  $w$  – количество термов.

**Шаг 2.** Формирование матрицы опроса эксперта в крайних значениях частных показателей качества в соответствии с продукционными правилами:

$$P = \{P_j | j = \overline{1, 2^m}\}, P_j : \text{Если } f_1 = A_1 \text{ и } f_2 = A_2 \text{ и } f_3 = A_3 \text{ и } \dots \text{ и } f_m = A_m, \text{ то } f_{pez} = W_j.$$

где  $A_i \in \{f_i^{\min}, f_i^{\max}\}$  – крайние значения частных показателей;  $W_j \in W$  – элемент терм-множества  $W$ .

**Шаг 3.** Построение ортогонального плана экспертного опроса и вычисление весовых коэффициентов многочлена свертки.

$$f_{pez} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} f_i f_j + \dots + \lambda_{12\dots m} f_1 f_2 \dots f_m$$

Производится дефаззификация значений лингвистической переменной  $f_{pez}$ , для чего каждому терму ставится в соответствие мода его нечеткого числа. Для определения весовых коэффициентов вычисляются усредненные скалярные произведения соответствующих столбцов ортогональной матрицы на вектор дефаззифицируемых значений результирующего показателя. Если же не проводить дефаззификацию значений результирующего показателя, приведенная методика позволяет осуществлять построение функциональной зависимости результирующего показателя  $f_{pez}$  от  $f_i$  с нечеткими коэффициентами  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{12\dots m}$ .

Предложенные многокритериальные методы анализа критичности отказов, в отличие от известных и ранее разработанных, позволяют формализовать опыт эксперта (группы экспертов) в многомерном пространстве частных показателей критичности, имеющих нечетко-возможностное или лингвистическое представление, и учесть комплексное влияние различных совокупностей частных показателей на результирующий показатель критичности ФЭ СЛО. Построенные интегральные показатели критичности отказов ФЭ СЛО дают основу для сравнения и упорядочивания ФЭ по степени их критичности отказа в условиях существенной неопределенности.

**В четвертом разделе** раскрыто содержание третьего направления диссертационных исследований, связанного с построением эталонных пессимистических и оптимистических сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СЛО. Реализация данного направления исследований предполагает выполнение следующих этапов: введение структурно-топологических показателей  $F_h(S_v)$ ,  $h \in \hat{H}^{str} \subseteq \hat{H}$  и определение области работоспособности СЛО с позиции структурного построения, формирование и выбор вариантов изменения структурных состояний СЛО в области работоспособности при выходе из строя критичных ФЭ, формирование классов эквивалентных траекторий изменения структурных состояний СЛО и выделение эталонных сценариев структурной реконфигурации СЛО (в частности, оптимистических и пессимистических сценариев).

На основе сформированной концептуальной модели планирования реконфигурации СЛО (раздел 1) построена обобщенная математическая модель планирования структурной реконфигурации СЛО (1), которая относится к классу моделей математического программирования с нелинейной целевой функцией и алгоритмически (неявно) заданной областью до-

пустимых альтернатив, с помощью которой учитываются всевозможные вариации изменения структурных состояний СлО.

$$\sum_{i=1}^N \Phi(\{F_h(St_{i-1} + \delta St_i), h \in \hat{H}^{str}\}) \rightarrow \min_{\substack{\delta St_i \in \Xi, \\ i=1,2,\dots,N \\ St_N = St_f}} \quad (1)$$

Реконфигурация структуры СлО представляет в этом случае поэтапный процесс  $St_i = St_{i-1} + \delta St_i, i = 1, 2, \dots, N; St_N = St_f$ , обеспечивающий трансформацию структуры  $St$ , которая переводится из начального состояния СлО  $St_0$ , в структурное состояние  $St_f$ . Сложность решения (1) для реальных задач заключается, прежде всего, в том, что как структурно-топологические показатели  $F_h, h \in \hat{H}^{str}$ , так и функция согласования  $\Phi$  и область допустимых вариаций  $\Xi$  заданы не аналитически, а алгоритмически, т. е. в виде всякого рода правил, инструкций и указаний, имеющих как формальный, так и неформальный (экспертный) характер. Это обстоятельство практически исключает применение стандартных методов математического программирования, опирающихся на известную структуру и вид показателей  $F_h, h \in \hat{H}^{str}$  и допустимую область  $\Xi$ .

В соответствии с обобщенной моделью (1) на основе концепции генома структуры СлО приведена и обоснована конкретная постановка оптимизационной задачи построения сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СлО. При этом было установлено, что структурное состояние  $S_\alpha$ , характеризующееся геномом  $\vec{\chi}_\alpha$ , непосредственно связано с некоторым структурным состоянием  $S$ , описываемого геномом  $\vec{\chi}$ , если существует критичный ФЭ ( $\exists Q_j \in \hat{Q}$ ), отказ (восстановление) которого ( $Q_j = 1$  или  $Q_j = 0$ ) переводит систему из состояния  $S$  в состояние  $S_\alpha$  (из состояния  $S_\alpha$  в состояние  $S$ ). Данную операцию изменения структурного состояния обозначим следующим образом  $\vec{\chi} \xleftarrow{Q_j} \vec{\chi}_\alpha$ . Множество всех структурных состояний, непосредственно связанных с состоянием  $\vec{\chi}$ , обозначим  $X(\vec{\chi})$ .

Тогда один из возможных сценариев (траекторий) реконфигурации структуры СлО в процессе его деградации или восстановления работоспособности на основе его перевода из текущего состояния  $S_0$  в требуемое состояние  $S_f$  можно описать следующей цепочкой переходов

$$\vec{\chi}_{\alpha_0} \xleftarrow{Q_{j_1}} \vec{\chi}_{\alpha_1} \xleftarrow{Q_{j_2}} \vec{\chi}_{\alpha_2} \xleftarrow{Q_{j_3}} \dots \xleftarrow{Q_{j_{N-1}}} \vec{\chi}_{\alpha_{N-1}} \xleftarrow{Q_{j_N}} \vec{\chi}_{\alpha_N},$$

где  $\vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0, \vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f$ , множество  $\{Q_{j_1}, Q_{j_2}, \dots, Q_{j_N}\} = \hat{Q}$ , т.е. множество отказавших (восстанавливаемых) элементов СлО в цепочке перехода является перестановкой элементов множества  $\hat{Q}$ .

Структурные изменения, происходящие в промежуточных состояниях  $\vec{\chi}_\alpha$  на траектории реконфигурации СлО, будем оценивать показателем структурного отказа  $F_{отказ}(\vec{\chi}_\alpha) \in \{F_{однор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{неоднор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{однорвозм}(\vec{\chi}_\alpha)\}$ . Это обусловлено тем, что показатель  $F_{i \dot{\delta} \dot{\epsilon} \dot{\alpha} \dot{\zeta}}(\vec{\chi}_\alpha)$  можно вычислять как для монотонных, так и для немонотонных структур. Кроме того, в каждом промежуточном структурном состоянии  $\vec{\chi}_\alpha$  СлО характеризуется некоторым набором структурно-топологических ограничений  $\Psi_l(\vec{\chi}_\alpha) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L$ , формально заданных и количественно оцениваемых с помощью соответствующих показателей структурной живучести, гибкости, достижимости, сложности структурного построения и т.д. Другими словами, данные ограничения задают область допустимых вариаций  $\Xi$ , приведенной в обобщенной модели (1).

Тогда задачу построения оптимистической траектории реконфигурации структуры в процессе деградации или восстановления СЛО можно представить в виде следующего формального описания.

$$\sum_{j=0}^N F_{\text{отказ}}(\bar{\chi}_{\alpha_j}) \rightarrow \min \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \bar{\chi}_{\alpha_j} \in X(\bar{\chi}_{\alpha_{j-1}}) \\ & \bar{\chi}_{\alpha_0} = \bar{\chi}_0, \bar{\chi}_{\alpha_N} = \bar{\chi}_f, \\ & \Psi_l(\bar{\chi}_{\alpha_j}) \leq 0, l=1,2,\dots,L \\ & \{Q_{j_1}, Q_{j_2}, \dots, Q_{j_N}\} = \hat{Q} \end{aligned}$$

Соответственно задачу построения пессимистической траектории структурной деградации (восстановления) СЛО можно представить в виде следующего формального описания.

$$\sum_{j=0}^N F_{\text{отказ}}(\bar{\chi}_{\alpha_j}) \rightarrow \max \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \bar{\chi}_{\alpha_j} \in X(\bar{\chi}_{\alpha_{j-1}}) \\ & \bar{\chi}_{\alpha_0} = \bar{\chi}_0, \bar{\chi}_{\alpha_N} = \bar{\chi}_f, \\ & \Psi_l(\bar{\chi}_{\alpha_j}) \leq 0, l=1,2,\dots,L \\ & \{Q_{j_1}, Q_{j_2}, \dots, Q_{j_N}\} = \hat{Q} \end{aligned}$$

Для решения рассматриваемых задач (2), (3) разработан новый комбинированный метод и реализующий его алгоритм, основанные на комбинации метода случайного направленного поиска эволюционного типа и метода отсечений неперспективных вариантов структурной реконфигурации СЛО типа «ветвей и границ». Предлагаемый подход позволяет решать оптимизационные задачи построения серий оптимистических и пессимистических сценариев структурной реконфигурации СЛО, имеющих как безусловный, так и условный характер, а также описываемых с использованием различных структурно-топологических показателей.

Предложенный подход был реализован в виде *алгоритма*, состоящего из следующих шагов.

**Шаг 0. Исходное состояние.** Задается число статистических испытаний  $M$ ; число испытаний  $d$ , не дающих улучшения достигнутого результата; текущее испытание  $k=0$ ; рекорд  $F_{\text{отказ}}^{\text{рекорд}} = +\infty$ .

**Шаг 1. Начало очередного испытания.** Список удаляемых критичных ФЭ  $\hat{Q} = \{Q_{i_1}, Q_{i_2}, \dots, Q_{i_N}\}$ ; промежуточный суммарный структурный отказ  $F_{\text{отказ}} = 0$ .

**Шаг 2. Случайный выбор удаляемого ФЭ.** Из списка  $\hat{Q}$  случайно выбирается один из ФЭ, пусть это  $Q_{i_r}$ . Определяется промежуточное структурное состояние текущей траектории

$$\bar{\chi}_{\alpha_j}^{(k)} (\bar{\chi}_{\alpha_{j-1}}^{(k)} \xrightarrow{Q_{i_r}} \bar{\chi}_{\alpha_j}^{(k)}).$$

**Шаг 3. Анализ промежуточного структурного состояния  $\bar{\chi}_{\alpha_j}^{(k)}$ .** Вычисляется структурный отказ  $F_{\text{отказ}}(\bar{\chi}_{\alpha_j}^{(k)})$ , изменение текущего суммарного структурного отказа  $F_{\text{отказ}} ::= +F_{\text{отказ}}(\bar{\chi}_{\alpha_j}^{(k)})$ .

Если  $\exists l_0 \in \{1, 2, \dots, L\} : \Psi_{l_0}(\bar{\chi}_{\alpha_j}^{(k)}) > 0$  ИЛИ  $F_{\text{отказ}} > F_{\text{отказ}}^{\text{рекорд}}$  ( $F_{\text{отказ}}^{\text{рекорд}}$  - текущий рекорд), то производится переход на шаг 5.

**Шаг 4. Анализ списка удаляемых ФЭ.**

ФЭ  $Q_{i_r}$  исключается из списка  $\hat{Q}$ .

Если  $\hat{Q} = \emptyset$ , тогда, испытание заканчивается. При этом,

если  $F_{\text{отказ}} < F_{\text{отказ}}^{\text{рекорд}}$ , то  $F_{\text{отказ}}^{\text{рекорд}} = F_{\text{отказ}}$ .

Если  $\hat{Q} \neq \emptyset$ , производится переход на шаг 2.

**Шаг 5. Анализ результатов испытаний.**

Если число подряд идущих безрезультативных испытаний ( $F_{\text{отказ}} > F_{\text{отказ}}^{\text{рекорд}}$ ) больше  $d$ , то процедура заканчивается.

Если  $k > M$ , то процедура заканчивается.

В противном случае переход на шаг 1.

Далее предложена обобщенная методика многокритериальной кластеризации множества сценариев структурной реконфигурации СЛО (в частности, оптимистических и пессимистических) с использованием различных мер сходства

$$C(Sc_l, Sc_k) = \frac{2\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{(1 + \lambda)[\mu(Sc_l) + \mu(Sc_k)] - 2\lambda\mu(Sc_l \cap Sc_k)} \quad (-1 \leq \lambda < \infty; \quad \mu(Sc_l) - \text{мощность множества признаков, удовлетворяющих сценарию } Sc_l) \text{ и процедур сгущения кластеров, пересчет значений сходства которых можно осуществлять по следующим формулам}$$

$C(H_j, H_l) = \alpha_q C(H_j, H_q) + \alpha_l C(H_j, H_l) + \beta C(H_q, H_l) + v [C(H_j, H_q) - C(H_j, H_l)]$  (где

$H_l = \{H_q, H_l\}$ ). С привлечением мер включения  $V(Sc_l, Sc_k) = \frac{\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{\mu(Sc_k)}$  осуществляется вы-

явление ядер построенных кластеров. Полученные в результате решения задачи эталонные траектории структурной реконфигурации СЛО позволяют проводить анализ структурной реконфигурации СЛО с позиции управления процессами деградации, восстановления и компенсации накопленных отклонений в условиях дестабилизирующих, деструктивных воздействий для обеспечения максимально (минимально) возможного уровня работоспособности системы и её элементов, которые характеризуются в рассматриваемом случае структурно-топологическими показателями.

Таким образом, разработан способ снижения размерности анализируемого пространства сценариев структурной реконфигурации СЛО путем построения серий оптимистических и пессимистических траекторий и выявления типовых (эталонных) сценариев структурной реконфигурации СЛО построенных кластеров с привлечением мер включения. В результате применения описанного способа снижение мощности исследуемого множества сценариев структурной реконфигурации СЛО уменьшает сложность задачи многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, решению которой посвящено четвертое и пятое направления диссертационных исследований.

**В пятом разделе** представлены результаты исследований четвертого и пятого направлений диссертационной работы, связанные соответственно с решением задачи структурно-функциональной реконфигурации функционирования СЛО с использованием моделей планирования операций обработки, приема-передачи и хранения разнотипных потоков на эталонных сценариях структурной реконфигурации СЛО, а также с решением задачи параметрического синтеза СЛО, обеспечивающего на этапе реализации гарантированный уровень значений интегрального показателя качества планов его структурно-функциональной реконфигурации.

На основе динамической интерпретации процессов выполнения операций информационного и/или материального обмена, диаграмм переходов из обобщенных состояний в процессе хранения, передачи и обработки потоков ФЭ СЛО (рисунок 4) была построена обобщенная математическая модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, которая относится к классу билинейных нестационарных дифференциальных динамических моделей с разрывными функциями в правых частях дифференциальных уравнений, определяющих динамику структурной реконфигурации СЛО вдоль эталонной траектории.

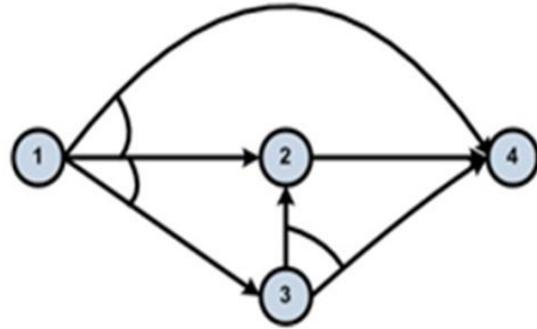


Рисунок 4 - Интегрированная диаграмма переходов из обобщенных состояний ФЭ СЛО (1 – операция приема ФЭ потока; 2 – операция предварительной обработки на ФЭ потока; 3 – операция хранения потока на ФЭ; 4 – операция передачи потока с ФЭ)

Для формализации процессов изменения структурных состояний СЛО вдоль эталонной траектории  $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}} = \{St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^{\chi}\}$ , смену которых объект осуществляет на промежутке времени  $T = (t_0, t_f]$  в ходе структурной реконфигурации, введен в рассмотрение динамический взвешенный мультиграф (ДВМ) следующего вида:

$$G_{\chi}(t) = \langle X_{\chi}(t), E_{\chi}(t), W_{\chi}(t) \rangle, \quad (4)$$

где  $\chi$  - индекс, характеризующий номер эталонной траектории структурной реконфигурации СЛО;  $X_{\chi}(t) = \{A_{xi}(t), i \in N_{\chi}\}$  - множество ФЭ, входящих в состав структуры  $G_{\chi}(t)$  (множество вершин) в момент времени  $t$ ;  $E_{\chi}(t) = \{e_{xij}(t) \in \{0, 1\}, i, j \in N_{\chi}\}$  - множество дуг ДВМ, отражающих взаимосвязи между его ФЭ в момент времени  $t$ ;  $W_{\chi}(t) = \{w_{\chi ij \rho}(t), i, j \in N_{\chi}, \rho \in P\}$  - множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих ФЭ ДВМ (при условии  $i \neq j$ ) и сами ФЭ ДВМ (при условии  $i = j$ ).

При этом с помощью матричной временной функции  $e_{\chi ji}(t)$ , задаются пространственно-временные ограничения и технические возможности, связанные с передачей потока между ФЭ  $A_{xi}$  и  $A_{xj}$ . Данная функция принимает значение 1, если имеется возможность передачи потока, 0 - в противном случае.

Необходимо подчеркнуть, что в реально функционирующих СЛО потребители обмениваются между собой разнородными потоками типа  $\rho \in P = \{1, 2, \dots, p\}$ , имеющими различную степень важности и срочности.

В качестве элементов множества  $W_{\chi}(t) = \{w_{\chi ij \rho}(t), i, j \in N_{\chi}, \rho \in P, w_{\chi ij \rho}(t) \in \{V_{\chi i \rho}(t), \psi_{\chi i \rho}(t), \omega_{\chi ij \rho}(t), \phi_{\chi i \rho}(t)\}\}$ , описывающих особенности передачи, хранения и обработки потоков различного типа, могут быть использованы следующие функции:  $V_{\chi i \rho}(t)$  - объём запоминающего устройства (ЗУ) потока  $\rho$  типа в  $A_{xi}$  ФЭ СЛО;  $\psi_{\chi i \rho}(t)$  - интенсивность поступления внешнего потока  $\rho$  типа в  $A_{xi}$  ФЭ СЛО;  $\omega_{\chi ij \rho}(t)$  - интенсивность передачи потока  $\rho$  типа между ФЭ  $A_{xi}$ ,  $A_{xj}$  системы;  $\phi_{\chi i \rho}(t)$  - интенсивность переработки потока  $\rho$  типа в  $A_{xi}$  ФЭ системы.

В этих условиях и с учетом предположения о том, что интервал времени структурной реконфигурации СЛО  $T = \{(t_0, t_1], (t_1, t_2], \dots, (t_{k-1}, t_k], \dots, (t_{L_{\chi}-1}, t_{L_{\chi}} = t_f]\}$  состоит из конечного множества участков постоянства структуры, модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО задается соотношениями (5)

$$I_{\chi i \rho k} + y_{\chi i \rho (k-1)} + \sum_{j \in N_{\chi}^-} \omega_{\chi ji \rho k} u_{\chi ji \rho k} = \phi_{\chi i \rho k} \cdot \mathcal{G}_{\chi i \rho k} + \sum_{j \in N_{\chi}^+} \omega_{\chi ij \rho k} u_{\chi ij \rho k} + y_{\chi i \rho k} + z_{\chi i \rho k}, \quad (5)$$

здесь  $I_{\chi i \rho k} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \psi_{\chi i \rho}(t) dt$  - объём потока  $\rho$  типа, поступивший в  $A_{xi}$  ФЭ извне на интервале

$T_k$ ;  $y_{\chi i \rho (k-1)}$  - объём потока  $\rho$  типа, сохраненный в запоминающемся устройстве  $A_{xi}$  ФЭ на интервале  $T_{k-1}$ ;  $\omega_{\chi ij \rho k}$  - интенсивность передачи потока  $\rho$  типа из  $A_{xi}$  ФЭ в  $A_{xj}$  ФЭ на интервале  $T_k$ ;  $\phi_{\chi i \rho k}$  - интенсивность обработки потока  $\rho$  типа в  $A_{xi}$  ФЭ на интервале  $T_k$ ;  $y_{\chi i \rho k}$  - объём потока  $\rho$  типа, сохраненный в запоминающемся устройстве  $A_{xi}$  ФЭ на интервале  $T_k$ ;  $z_{\chi i \rho k}$  - объём потока  $\rho$  типа, потерянный в  $A_{xi}$  ФЭ на интервале  $T_k$ ;  $N_{\chi}^- = \{j \in N_{\chi} \mid e_{\chi ji}(k) = 1\}$  - множество номеров ФЭ СЛО на эталонной траектории  $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$ , из которых в  $A_{xi}$  ФЭ на ин-

тервале времени  $T_k$  возможна передача потока;  $N_{\chi i}^+ = \{j \in N_{\chi} \mid e_{\chi ij}(k) = 1\}$  - множество номеров ФЭ СЛО, в которые из  $A_{\chi i}$  ФЭ на интервале времени  $T_k$  возможна передача потока.

Анализ особенностей, свойственных задаче планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО в статической постановке, позволил для нахождения соответствующих планов реконфигурации из области Парето (области недоминируемых альтернативных планов) использовать стандартную методикау скаляризации векторного показателя в виде аддитивной свертки Лагранжа, а также применить известный алгоритм последовательного улучшения плана с двусторонними ограничениями на переменные.

Введем следующие переменные:  $x_{\chi ij\rho k} = \omega_{\chi ij\rho k} \cdot u_{\chi ij\rho k}$  - объем переданного потока  $\rho$  типа из  $A_{\chi i}$  ФЭ в  $A_{\chi j}$  ФЭ на интервале  $T_k$ ;  $g_{\chi i\rho k} = \phi_{\chi i\rho k} \cdot \mathcal{G}_{\chi i\rho k}$  - объем обработанного потока  $\rho$  типа в  $A_{\chi i}$  ФЭ на интервале  $T_k$ . Тогда задача планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО на эталонной траектории  $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$  изменения его структурных состояний в статической постановке окончательно имеет вид:

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} z_{\chi i\rho k} - \alpha_4 v_{\chi} \rightarrow \max \quad (6)$$

$$\left( \sum_{j \in N_{\chi i}^+} x_{\chi ij\rho k} - \sum_{j \in N_{\chi i}^-} x_{\chi ji\rho k} \right) + (y_{\chi i\rho k} - y_{\chi i\rho(k-1)}) + g_{\chi i\rho k} + z_{\chi i\rho k} = I_{\chi i\rho k}, \quad (7)$$

$$i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi},$$

$$v_{\chi} - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi ij\rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k} - v_{\chi i} = R_{\chi 0i}, \quad i \in N_{\chi}, \quad (8)$$

$$y_{\chi i\rho k} + \eta_{\chi ik} = V_{\chi i\rho}, \quad i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi}, \quad (9)$$

$$0 \leq x_{\chi ij\rho k} \leq \omega_{\chi ij\rho k} \cdot (t_k - t_{k-1}), 0 \leq g_{\chi i\rho k} \leq \phi_{\chi i\rho k} \cdot (t_k - t_{k-1}), \quad (10)$$

$$y_{\chi i\rho k} \geq 0, z_{\chi i\rho k} \geq 0, v_{\chi i} \geq 0, \eta_{\chi ik} \geq 0, v_{\chi} \geq 0, i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi}. \quad (11)$$

и может решаться методами последовательного улучшения планов в задачах линейного программирования с двусторонними ограничениями на искомые переменные.

Далее была построена модель параметрического синтеза СЛО, с помощью которой удалось конструктивно учесть возможные деструктивные воздействия в рамках оптимистического и пессимистического сценариев структурной реконфигурации СЛО, а также на этапе реализации планов его структурно-функциональной реконфигурации обеспечить гарантированный уровень значений интегрального показателя качества программного управления.

Задача структурно-функциональной реконфигурации на эталонной траектории  $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$  изменения структурных состояний СЛО в статической постановке имеет вид (6)-(11) или в общем случае (12)-(14).

$$c_{\chi} \cdot \delta_{\chi} \rightarrow \max \quad (12)$$

$$A_{\chi} \cdot \delta_{\chi} = b_{\chi} \quad (13)$$

$$0 \leq \delta_{\chi} \leq \delta_{\chi}^0 \quad (14)$$

В целом вектор искомых переменных и вектор значений правых частей ограничений, накладываемых на указанные переменные, имеют следующую структуру:

$$\delta_{\chi} = \left\| \left\| x_{\chi ij\rho 1} \ x_{\chi ij\rho 2} \dots x_{\chi ij\rho L_{\chi}} \ \middle| \ g_{\chi i\rho 1} \ g_{\chi i\rho 2} \dots g_{\chi i\rho L_{\chi}} \ \middle| \ y_{\chi i\rho 1} \ y_{\chi i\rho 2} \dots y_{\chi i\rho L_{\chi}} \ \middle| \ z_{\chi i\rho 1} \ z_{\chi i\rho 2} \dots z_{\chi i\rho L_{\chi}} \ \middle| \ v_{\chi} \ \middle| \ v_{\chi i} \ \middle| \ \eta_{\chi i1} \ \eta_{\chi i2} \dots \eta_{\chi iL_{\chi}} \right\| \right\|^T,$$

$$\delta_{\chi}^0 = \left\| \omega_{\chi i \rho 1} \cdot (t_1 - t_0) \omega_{\chi i \rho 2} \cdot (t_2 - t_1) \dots \omega_{\chi i \rho L_{\chi}} \cdot (t_{L_{\chi}} - t_{L_{\chi}-1}) \left| \phi_{\chi i \rho 1} \cdot (t_1 - t_0) \phi_{\chi i \rho 2} \cdot (t_2 - t_1) \dots \phi_{\chi i \rho L_{\chi}} \cdot (t_{L_{\chi}} - t_{L_{\chi}-1}) \right| \infty \dots \infty \right\|^T.$$

Вектор  $c_{\chi}$  целевой функции состоит из компонент, характеризующих срочность обрабатываемого потока, важность объема потока, потерянного в ФЭ СЛО, и издержки ФЭ на передачу и обработку потока:

$$c_{\chi} = \left\| 0 \dots 0 \left| \alpha_3 \alpha_2 \lambda_1 \alpha_3 \alpha_2 \lambda_1 \dots \alpha_3 \alpha_2 \lambda_p \right| 0 \dots 0 \left| -\alpha_3 \alpha_1 \gamma_1 - \alpha_3 \alpha_1 \gamma_1 \dots - \alpha_3 \alpha_1 \gamma_p \right| -\alpha_4 \left| 0 \dots 0 \right| \right\|^T.$$

Вектор  $b_{\chi}$  системы ограничений состоит из компонент, характеризующих объемы поступивших потоков в ФЭ СЛО на всех интервалах, описывающих издержки ФЭ на передачу и обработку потока на предыдущих этапах управления, и компонент, описывающих объемы хранилищ ФЭ СЛО:

$$b_{\chi} = \left\| I_{\chi 111} I_{\chi 211} \dots I_{\chi n_{\chi} p L_{\chi}} \left| R_{\chi 01} R_{\chi 02} \dots R_{\chi 0 n_{\chi}} \right| V_{\chi 1} V_{\chi 2} \dots V_{\chi n_{\chi}} \dots V_{\chi 1} V_{\chi 2} \dots V_{\chi n_{\chi}} \right\|^T.$$

В результате решения указанной задачи определяется оптимальное решение  $\delta_{\chi^*}$  (оптимальное распределение потоков) для различных эталонных траекторий  $S_{\chi}^{\text{эталон}}$  и, в частности, для оптимистического  $\delta_{+*}$  и пессимистического  $\delta_{-*}$  сценариев.

С практической точки зрения весьма актуальной является задача параметрического синтеза СЛО с целью обоснования характеристик ФЭ и связей между ними, для которых возможно гарантированно обеспечить требуемый уровень интегрального показателя качества планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО при различных деструктивных воздействиях.

Таковыми параметрами, характеризующими особенности передачи, хранения и обработки потоков различного типа, могут быть:

- $Y_{i\rho}$  - объём хранилища потока  $\rho$  типа на  $A_i$  ФЭ СЛО;
- $\varpi_{ij\rho}$  - интенсивность передачи потока  $\rho$  типа между ФЭ СЛО;
- $\phi_{i\rho}$  - интенсивность переработки потока  $\rho$  типа в каждом  $A_i$  ФЭ СЛО.

При этом помимо издержек на передачу  $r_{ij\rho}$  потока  $\rho$  типа из  $A_i$  ФЭ в  $A_j$  ФЭ, обработку  $\pi_{i\rho}$  потока  $\rho$  типа в  $A_i$  ФЭ, необходимы постоянные расходы энергоресурса на интервале  $T = (t_0, t_f]$  планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО для поддержания требуемых объемов и интенсивностей  $Y_{i\rho}$ ,  $\varpi_{ij\rho}$ ,  $\phi_{i\rho}$  синтезируемой структуры объекта. Обозначим постоянные издержки энергоресурса на поддержание единицы объема хранилища, передачи и обработки потока соответственно  $\Lambda_{i\rho}$ ,  $R_{ij\rho}$ ,  $\Pi_{i\rho}$ .

Следует отметить, что для обеспечения требуемого уровня робастности планов реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях требуется, с одной стороны, минимизировать постоянные расходы на поддержание функционирования СЛО на интервале планирования  $T = (t_0, t_f]$ , с другой стороны, обеспечить при формировании планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО в рамках оптимистической и пессимистической траекторий наилучшего целевого эффекта. В этой связи целесообразно максимизировать нижнюю грань интегрального показателя качества планов структурно-функциональной реконфигурации (6) для оптимистического и пессимистического сценариев реализации структурной динамики рассматриваемого объекта и, тем самым, на этапе реализации планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО обеспечить гарантированный уровень значений интегрального показателя качества программного управления рассматриваемым объектом:

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{+}} \sum_{k=1}^{L_{+}} g_{+i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{+}} \sum_{k=1}^{L_{+}} z_{+i\rho k} - \alpha_4 v_{+} \geq \zeta,$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} g_{-i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} z_{-i\rho k} - \alpha_4 v_- \geq \zeta.$$

Кроме того переменные

$$\delta_+ = \left\| \begin{matrix} x_{+ij\rho 1} & x_{+ij\rho 2} & \dots & x_{+ij\rho L_+} \\ g_{+i\rho 1} & g_{+i\rho 2} & \dots & g_{+i\rho L_+} \\ y_{+i\rho 1} & y_{+i\rho 2} & \dots & y_{+i\rho L_+} \\ z_{+i\rho 1} & z_{+i\rho 2} & \dots & z_{+i\rho L_+} \\ v_+ & \eta_{+i\rho 1} & \eta_{+i\rho 2} & \dots & \eta_{+i\rho L_+} \end{matrix} \right\|^T \quad \text{и}$$

$$\delta_- = \left\| \begin{matrix} x_{-ij\rho 1} & x_{-ij\rho 2} & \dots & x_{-ij\rho L_-} \\ g_{-i\rho 1} & g_{-i\rho 2} & \dots & g_{-i\rho L_-} \\ y_{-i\rho 1} & y_{-i\rho 2} & \dots & y_{-i\rho L_-} \\ z_{-i\rho 1} & z_{-i\rho 2} & \dots & z_{-i\rho L_-} \\ v_- & \eta_{-i\rho 1} & \eta_{-i\rho 2} & \dots & \eta_{-i\rho L_-} \end{matrix} \right\|^T, \quad \text{от-}$$

ражающие перемещение потоков на оптимистической и пессимистической траекториях структурной динамики СЛО, должны удовлетворять ограничениям (7)-(11) с учетом следующих особенностей:

➤ предыстория функционирования ФЭ СЛО (предыдущие издержки ФЭ) одинакова для различных траекторий, т.е.  $R_{+0i} = R_{-0i} = R_{0i}, i = 1, 2, \dots, n; n = n_+ = n_-$ ;

➤ объем хранилища ФЭ СЛО оптимистической и пессимистической траекторий совпадают  $V_{+i\rho} = V_{-i\rho} = Y_{i\rho}, \forall i$ ;

➤ скорость передачи потоков и интенсивность переработки потоков на интервале планирования структурно-функциональной реконфигурации одинакова для оптимистической и пессимистической траекторий  $\omega_{+ij\rho k} = \omega_{-ij\rho k} = \varpi_{ij\rho}, \varphi_{+i\rho k} = \varphi_{-i\rho k} = \varphi_{i\rho}, \forall i, j, \rho, k$ ;

➤ технические возможности хранения, передачи и обработки потоков ограничены заданными величинами  $Y_{i\rho} \leq Y_{i\rho}^{3ad}, \varpi_{ij\rho} \leq \varpi_{ij\rho}^{3ad}, \varphi_{i\rho} \leq \varphi_{i\rho}^{3ad}, \forall i, j, \rho$ .

Учитывая вышесказанное, задачу параметрического синтеза СЛО можно представить следующим образом:

$$\alpha_5 \zeta - \alpha_6 \left( \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \Lambda_{i\rho} Y_{i\rho} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \Pi_{i\rho} \varphi_{i\rho} (t_f - t_0) + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij\rho} \varpi_{ij\rho} (t_f - t_0) \right) \rightarrow \max \quad (15)$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} z_{+i\rho k} - \alpha_4 v_+ \geq \zeta, \quad (16)$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} z_{-i\rho k} - \alpha_4 v_- \geq \zeta, \quad (17)$$

$$\left( \sum_{j \in N_{+i}^+} x_{+ij\rho k} - \sum_{j \in N_{-i}^-} x_{+ji\rho k} \right) + (y_{+i\rho k} - y_{+i\rho(k-1)}) + g_{+i\rho k} + z_{+i\rho k} = I_{+i\rho k}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (18)$$

$$\left( \sum_{j \in N_{-i}^+} x_{-ij\rho k} - \sum_{j \in N_{-i}^-} x_{-ji\rho k} \right) + (y_{-i\rho k} - y_{-i\rho(k-1)}) + g_{-i\rho k} + z_{-i\rho k} = I_{-i\rho k}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (19)$$

$$v_+ - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^n r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_+} x_{+ij\rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+i\rho k} - v_{+i} = R_{0i}, i \in N, \quad (20)$$

$$v_- - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^n r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_-} x_{-ij\rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-i\rho k} - v_{-i} = R_{0i}, i \in N, \quad (21)$$

$$y_{+i\rho k} + \eta_{+i\rho k} = Y_{i\rho}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (22)$$

$$y_{-i\rho k} + \eta_{-i\rho k} = Y_{i\rho}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (23)$$

$$0 \leq x_{+ij\rho k} \leq \varpi_{ij\rho} \cdot (t_k^+ - t_{k-1}^+), 0 \leq g_{+i\rho k} \leq \varphi_{i\rho} \cdot (t_k^+ - t_{k-1}^+), i, j \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (24)$$

$$0 \leq x_{-ij\rho k} \leq \varpi_{ij\rho} \cdot (t_k^- - t_{k-1}^-), 0 \leq g_{-i\rho k} \leq \varphi_{i\rho} \cdot (t_k^- - t_{k-1}^-), i, j \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (25)$$

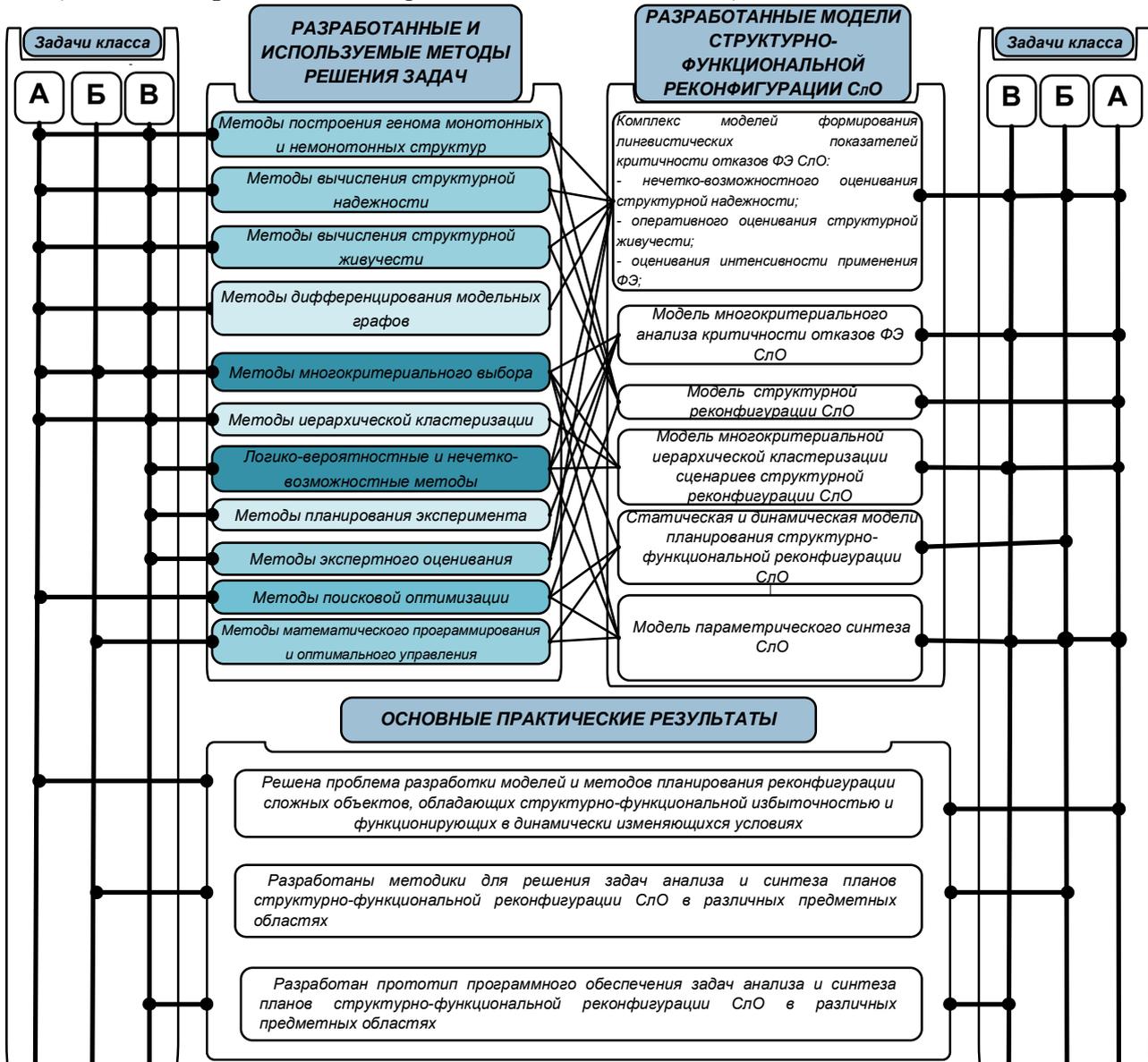
$$y_{+i\rho k} \geq 0, z_{+i\rho k} \geq 0, v_{+i} \geq 0, \eta_{+i\rho k} \geq 0, v_+ \geq 0, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (26)$$

$$y_{-i\rho k} \geq 0, z_{-i\rho k} \geq 0, v_{-i} \geq 0, \eta_{-i\rho k} \geq 0, v_- \geq 0, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (27)$$

$$0 \leq Y_{i\rho} \leq Y_{i\rho}^{3ad}, 0 \leq \varpi_{ij\rho} \leq \varpi_{ij\rho}^{3ad}, 0 \leq \varphi_{i\rho} \leq \varphi_{i\rho}^{3ad}, i, j \in N, \rho \in P. \quad (28)$$

В *шестом разделе* приведены результаты практического использования разработанных в диссертации подходов, методов, моделей и алгоритмов (рисунок 5) для решения актуальных и важных задач в различных предметных областях.

При реализации нижеприведенных прикладных методик особое внимание было уделено проведению аналитико-имитационного моделирования условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации СлО с целью выявления эмерджентных свойств системы, неучтенных предлагаемым в диссертации агрегативно-декомпозиционным подходом (*шестое направление* диссертационных исследований).



**Рисунок 5 - Методологические и методические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО**

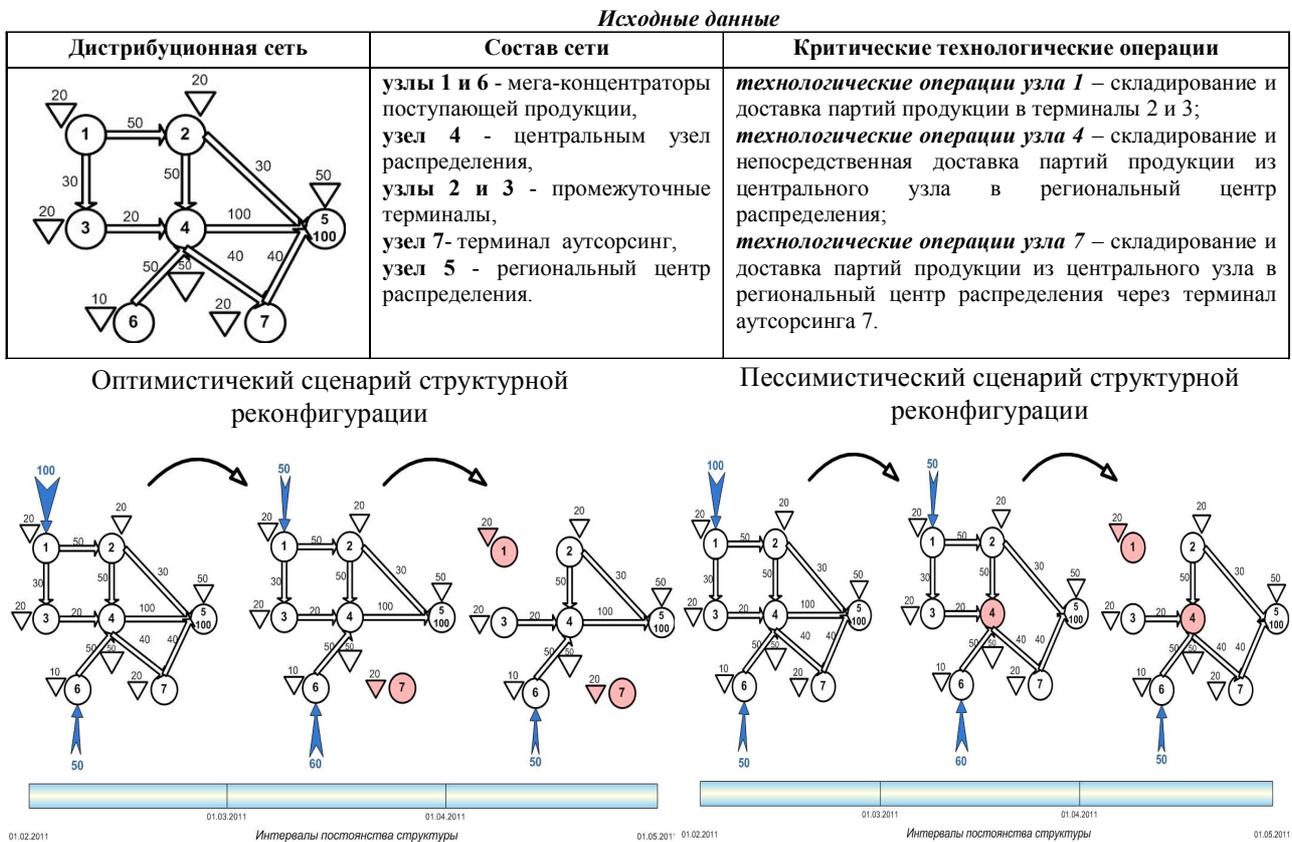
Представлены результаты планирования структурно-функциональной реконфигурации дистрибуционной сети (ДС) цепи поставок с использованием разработанного в диссертации подхода (рисунок 6, 7). В результате анализа технологической структуры ДС с использованием методики из раздела 3 определено множество критичных технологических операций, выполняемых в узлах сети (рисунок 6). В результате применения методики, изложенной в разделе 4, с учетом интервалов времени постоянства структуры, мощности источников мате-

риальных потоков, интенсивности передачи и обработки продукции, объемов складских помещений на рисунке 6 изображена динамика ДС, соответствующая оптимистической и пессимистической траекториям.

На рисунке 7 представлены результаты решения задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации соответственно для оптимистической и пессимистической траекторий структурной реконфигурации ДС SCM (Supply Chain Management), а также результаты параметрического синтеза ДС SCM с использованием идей «слепой» реконфигурации и модели, представленной в разделе 5.

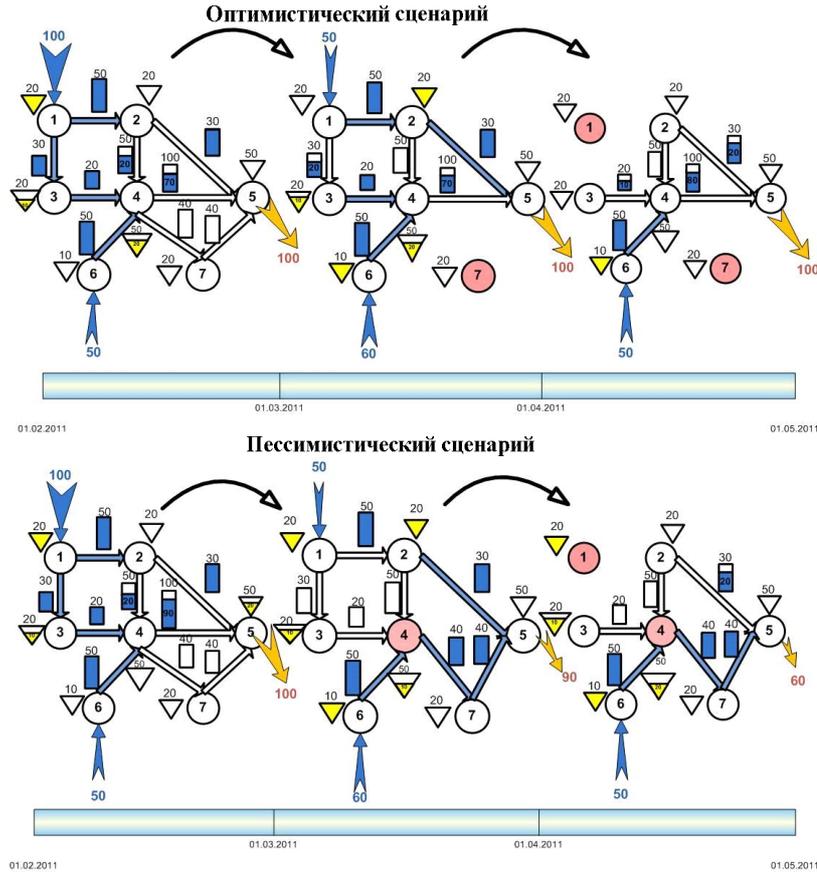
В процессе структурно-функциональной реконфигурации ДС SCM достигаются эффективные конфигурации ДС, обеспечивающие сокращение постоянных расходов на 30%, расходов на хранение продукции в складских помещениях на 33%, повышение прибыли на 50%.

Проведено аналитико-имитационное моделирование условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации ДС SCM. В частности проведено исследование влияния объемов партий поставок товаров на получаемую прибыль. Отдельные результаты имитационного моделирования и один из выводов по результатам проведенных исследований приведены на рисунке 8.



**Рисунок 6 – Исследование структурной реконфигурации ДС SCM**

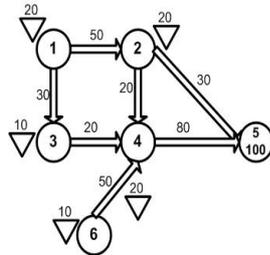
### Планы структурно-функциональной реконфигурации



### Параметрический синтез дистрибуционной сети

Вариант 1

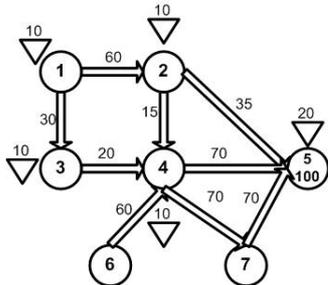
Вариант 2



«Слепая» реконфигурация

Сценарий	Прибыль Вариант 1	Прибыль Вариант 2
Оптимистический	63.68	80.6
Пессимистический	15.6	-87.2

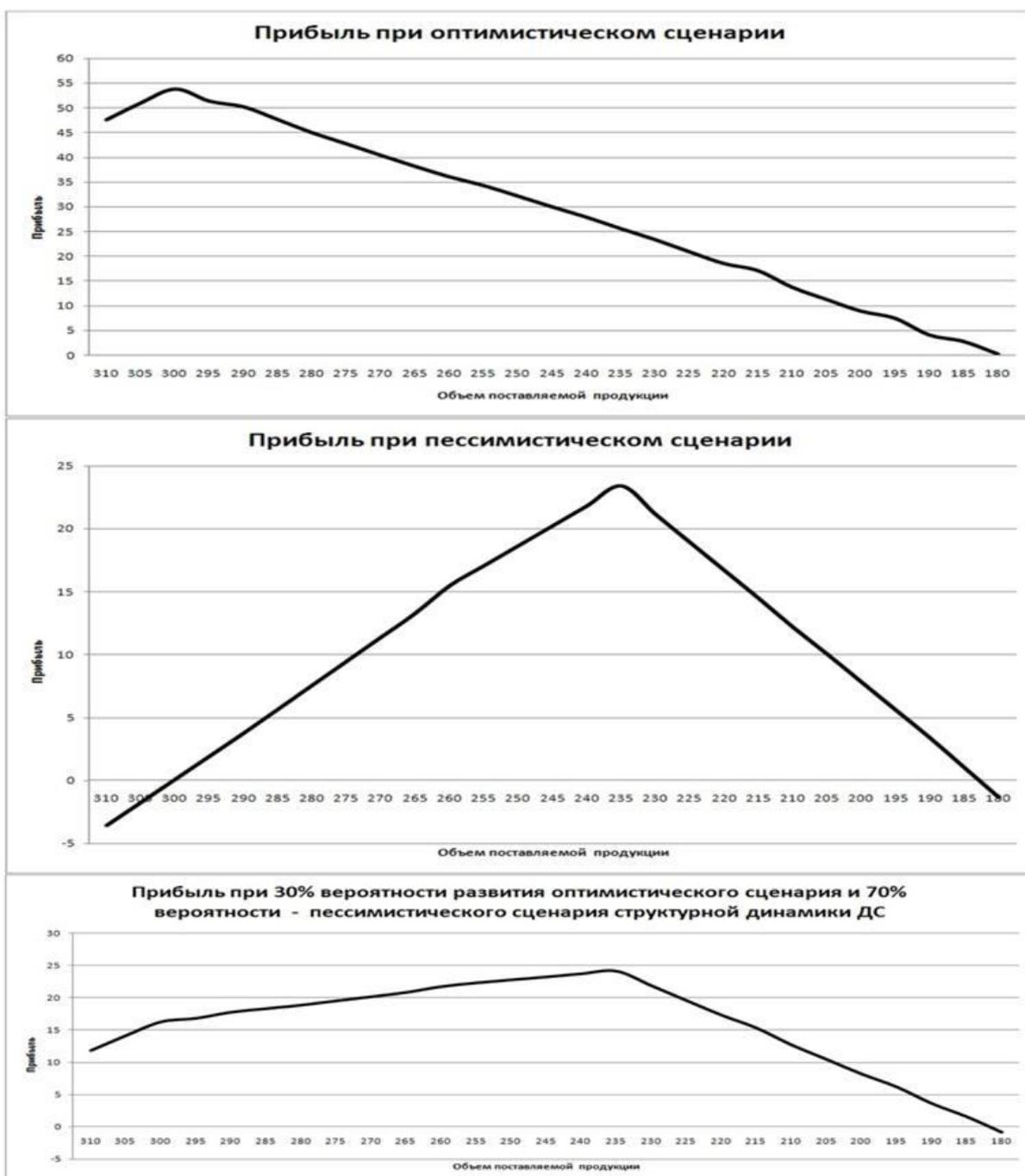
«Идеальный» вариант



Структурно-функциональная реконфигурация

Сценарий	Доставленный товар	Расходы на						Прибыль
		Хранение	Возврат	Транспортно вку	Производство	Постоянные	Общие	
Оптимистический	300 ед.	8.4 (120 ед.)	0	27,8	124 (310 ед.)	63	223.2	76.8
Пессимистический	300 ед.	8.4 (120 ед.)	0	33,6	124 (310 ед.)	63	229.8	70.2

Рисунок 7 – Исследование структурно-функциональной реконфигурации ДС SCM



**Частный вывод:** наибольшая прибыль на пессимистической траектории достигается при уменьшении поставок на 1 интервале постоянства (1 узел на 13-18%; 6 узел на 26-36%), на 2 интервале (1 узел на 26-36%; 6 узел на 24-30%), на 3 интервале (6 узел на 26-36%).

**Рисунок 8 - Исследование влияния объемов партий поставок товаров на получаемую прибыль**

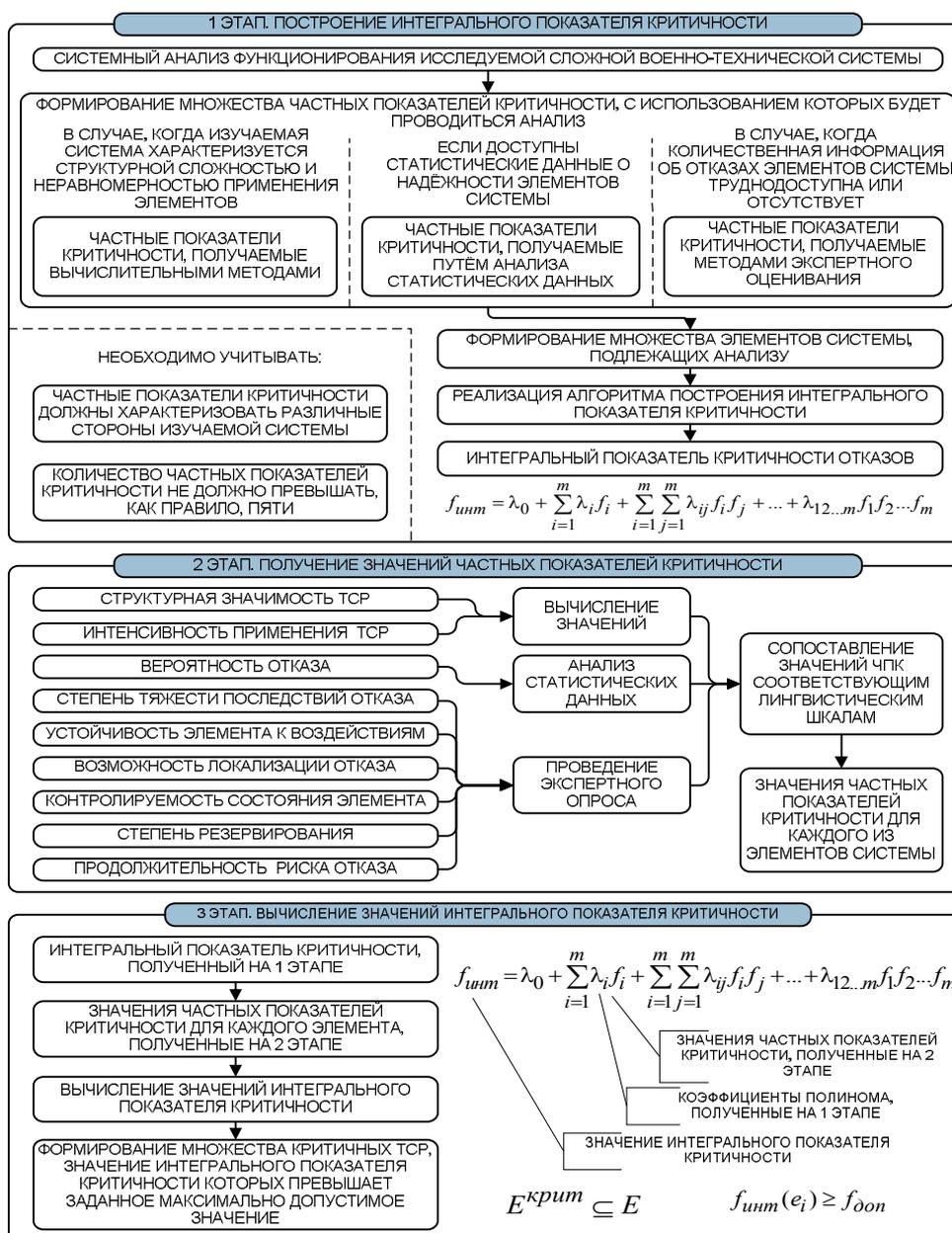


Рисунок 9 - Методика оценивания критичности отказов ТСр КИК

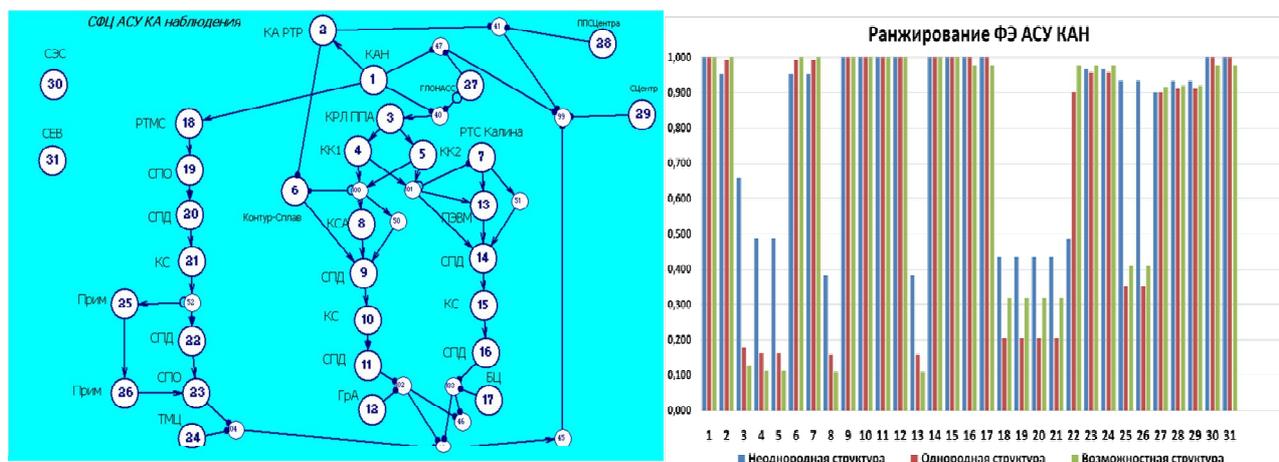


Рисунок 10 - Результаты многокритериального оценивания интегральных вкладов элементов и подсистем АСУ КА наблюдения в показатель надежности ее функционирования

Приведено решение актуальной научной задачи разработки научно-методического аппарата оценивания критичности отказов технических средств в условиях критериальной неопределённости с учётом структурных и функциональных особенностей отдельного командно-измерительного комплекса управления космическими аппаратами (КА) (рисунок 9), а также разработана методика многокритериального оценивания интегральных вкладов элементов и подсистем АСУ КА наблюдения в показатель надёжности ее функционирования (рисунок 10), имеющих существенное значение при автоматизированном проектировании ракетно-космической техники.

Проведена модернизация существующих методов анализа видов, последствий и критичности отказов, позволившая, во-первых, учесть структурные и функциональные особенности сложных комплексов, и, во-вторых, решить проблему выявления критичных элементов сложных объектов наземной космической инфраструктуры с учетом множества частных показателей критичности, имеющих лингвистическое представление. Так операции резервирования (рисунок 11) выявленных критичных технических средств и каналов передачи информации между ними позволяют повысить структурную надёжность подсистем НКУ и снизить структурную значимость выявленных элементов на 10-25%.

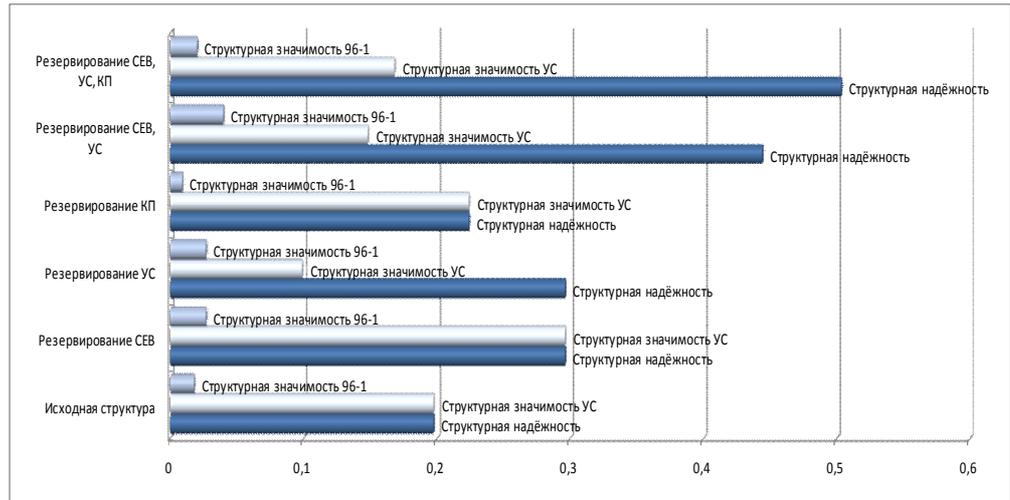


Рисунок 11 - Исследование влияния операции резервирования ТСр на структурную надёжность КИК

Разработана методика многокритериального сравнительного анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде в различных субъектах РФ (рисунок 12). Данная методика включает: разработку системы показателей; декомпозицию показателей на социально-экономические, информационно-технологические и организационно-методические, представляющие собой в самом общем случае лингвистические переменные; методику

Интегральный показатель качества организации предоставления услуг в электронном виде

$$F^{\Sigma} = 0,6 + 0,225F^{C3} + 0,175F^{HT} + 0,1F^{OMA} - 0,05F^{C3}F^{HT} - 0,025F^{C3}F^{OMA} - 0,025F^{HT}F^{OM}$$

Интегральные значения показателей по группам и в целом по субъектам

Субъект РФ	1. Группа социально-экономических показателей	2. Группа показателей для анализа информационно-технологической и инфраструктурной составляющих	3. Группа организационно-методических и административных показателей	Интегрально	Место
Санкт-Петербург	1	0,563	0,714	0,76	3
Республика Татарстан	0,789	0,844	1	0,83	1
Калининградская область	0,526	0,781	0,714	0,53	4
Астраханская область	0,526	0,625	0,5	0,33	5
Архангельская область	0,368	0,375	0,857	0,21	6
Республика Башкортостан	0,737	1	0,643	0,77	2
Лучший субъект РФ	Санкт-Петербург	Республика Башкортостан	Республика Татарстан	Республика Татарстан	

Рисунок 12 - Результаты сравнительного анализа качества организации предоставления услуг в электронном виде в различных субъектах РФ

многокритериального сравнительного анализа качества организации предоставления электронных услуг, в основе которой лежит подход, изложенный в разделе 3.

Применение данной методики и полученные результаты сравнения субъектов РФ позволило разработать обоснованные рекомендации по совершенствованию процесса организации государственных услуг в электронном виде в г. Санкт-Петербурге.

*В заключении* подведены итоги выполненных исследований, сформулированы основные научные результаты, даны рекомендации по их использованию в практических целях, сформулированы возможные направления дальнейшего развития результатов исследований.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Обоснована актуальность и проведен системный анализ научной проблемы многокритериального планирования реконфигурации СлО с перестраиваемой структурой. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы, концептуальная модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СлО, основные направления агрегативно-декомпозиционного подхода и методология решения проблемы моделирования, многокритериального оценивания, анализа и выбора планов структурно-функциональной реконфигурации СлО в динамически изменяющихся условиях. Результаты диссертационных исследований позволяют рассматривать реконфигурацию СлО как технологию управления их структурами, направленную на повышение надежности и живучести функционирования указанного класса объектов.

2. Поставлены и решены задачи исследования структурно-топологических и структурно-функциональных свойств монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных, равноценных и неравноценных структур СлО, многокритериального анализа сценариев структурной реконфигурации СлО.

3. На основе введенной автором оригинальной концепции генома монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур сложных объектов решена задача исследования структурно-топологических свойств объектов; усовершенствован ряд известных методов вычисления структурно-топологических показателей таких как структурная надежность, структурная живучесть, структурная значимость и вклады функциональных элементов в надежность; разработана обобщенная математическая модель построения сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СлО, обладающих как монотонной, так и немонотонной структурой.

4. Для решения задачи исследования структурно-функциональных свойств СлО предложен новый частный показатель критичности «Интенсивность применения ФЭ», в основе вычисления которого лежит математический аппарат дифференцирования теоретико-графовых моделей.

5. Для решения задачи исследования равноценных и неравноценных структур СлО разработаны новые методы решения многокритериальных задач оценивания свойства критичности отказов ФЭ СлО, описываемого частными показателями критичности, заданными либо в виде нечетких чисел, либо лингвистическими переменными. Методы обладают достаточной степенью универсальности и позволяют формально описывать неявную экспертную информацию о значимости частных показателей критичности и учитывать комплексный нелинейный характер их влияния на результирующий показатель критичности ФЭ СлО.

6. Для решения оптимизационной задачи построения сценариев структурной реконфигурации СлО, вызванных отказами критичных ФЭ, предложен новый метод и реализующий его алгоритм, позволяющий осуществить построение множеств как оптимистических, так и пессимистических траекторий структурной реконфигурации СлО для дальнейшего их исследования и практического использования при реализации конкретного плана структурно-функциональной реконфигурации.

7. Предложена обобщенная методика многокритериальной кластеризации множества сценариев структурной реконфигурации СлО с использованием различных мер сходства и процедур сгущения кластеров. С привлечением мер включения разработана процедура определения типовых (эталонных) элементов построенных кластеров. Предложенный подход позволил снизить размерность анализируемого пространства сценариев структурной реконфигурации СлО, выявить эталонные пессимистические и оптимистические траектории структурной динамики СлО для задач многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СлО и параметрического синтеза структуры СлО.

8. На основе динамической интерпретация процессов выполнения операций обработки, приема-передачи и хранения информационного и/или материального обмена между ФЭ СлО на заданном сценарии структурной реконфигурации объекта предложена обобщенная математическая модель многокритериального оптимального управления структурно-функциональной реконфигурации СлО. Исходная задача многокритериального оптимального управления СлО с учетом предположения о том, что интервал времени структурной реконфигурации СлО состоит из участков постоянства структуры, формально сведена к однокритериальной статической модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СлО, которая относится к классу моделей линейного программирования большой размерности с двусторонними ограничениями.

9. Разработана математическая модель параметрического синтеза СлО, в рамках которой обеспечивается формирование планов структурно-функциональной реконфигурации СлО с гарантированным уровнем значений интегрального показателя качества программного управления рассматриваемыми объектами.

10. Разработаны комбинированные методы и алгоритмы решения задач многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СлО и параметрического синтеза СлО, обеспечивающие на этапе реализации планов структурно-функциональной реконфигурации СлО гарантированный уровень значений интегрального показателя качества программного управления рассматриваемыми объектами.

11. Разработан экспериментальный образец специального модельно-алгоритмического обеспечения, позволяющий проводить анализ и синтез программ структурно-функциональной реконфигурации СлО в динамически изменяющихся условиях, а также аналитико-имитационное моделирование условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации СлО.

12. Разработаны и реализованы на практике модели, методы, методики и алгоритмы решения актуальных и важных задач комплексного моделирования и многокритериального оценивания, анализа и выбора планов структурно-функциональной реконфигурации СлО в различных предметных областях.

## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Москвин, Б. В. Комбинированные модели управления структурной динамикой сложных технических объектов / Б. В. Москвин, Е. П. Михайлов, **А. Н. Павлов**, Б. В. Соколов // Известия Вузов. Приборостроение. – 2006. – том №49, №11. – с. 8–12.
2. **Павлов, А. Н.** Анализ структурной динамики комплексной системы защиты информации / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов, М. В. Сорокин // Информация и безопасность. – 2009. – Т. 12, № 3. – С. 389–396
3. **Павлов, А. Н.** Исследование структурной надежности П-сетей с независимыми и зависимыми отказами элементов / А. Н. Павлов // Труды СПИИРАН. – 2009. – Выпуск № 11. – С. 81–91
4. **Павлов, А. Н.** Структурный анализ катастрофоустойчивой информационной системы / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Труды СПИИРАН. – 2009. – Выпуск № 8. – С. 128–151

5. **Павлов, А. Н.** Обобщенный алгоритм формирования классов структурных состояний информационных систем / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов, С. А. Осипенко // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2009. – № 4. – С. 3–8
6. Осипенко, С. А. Исследование безопасности сложных технических объектов / С. А. Осипенко, **А. Н. Павлов** // Известия Вузов. Приборостроение. – 2010. – том №53, №11. – С. 27–31
7. Зеленцов, В. А. Многокритериальный анализ влияния отдельных элементов на работоспособность сложной системы / В. А. Зеленцов, **А. Н. Павлов** // Информационно-управляющие системы. – 2010. – №6 (49). – С.7–12
8. Kopytov, E.A. New methods of calculating the Genome of structure and the failure criticality of the complex objects' elements / E. A. Kopytov, **A. N. Pavlov**, V. A. Zelentsov // Transport and Telecommunication. – 2010. – Vol. 11. – № 4. – P. 4–13
9. Охтилев, М. Ю. Структурная надежность цепей поставок / М. Ю. Охтилев, **А. Н. Павлов**, О. В. Майданович, С. А. Осипенко // Интегрированная логистика. – 2011. – № 1. – С. 6–8.
10. **Павлов, А. Н.** Постановка и анализ возможных путей решения задачи реконфигурации катастрофоустойчивой информационной системы / А. Н. Павлов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2011. – №4, т.9. – С. 15–21
11. **Павлов, А. Н.** Классификация монотонных и немонотонных информационных систем на основе генома структуры / А. Н. Павлов // Труды СПИИРАН. – 2012. – Выпуск № 2(21). – С. 238–248.
12. **Павлов, А. Н.** Методологические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов / А. Н. Павлов // Известия Вузов. Приборостроение. – 2012. – том 55(11). – С. 7–12.
13. **Pavlov, A.N.** Model-supported and scenario-oriented analysis of optimal distribution plans in supply networks / A.N. **Pavlov**, D.A. Ivanov, B.V. Sokolov // 26 European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2012, Germany, Koblenz, 29 May–1 June 2012 г.: Proceedings, pp. 588–594
14. Ivanov, D. Structure dynamics control-based integration of aggregate distribution and dynamic transportation planning / D. Ivanov, B. Sokolov, R. Hartl, **A. Pavlov** // 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, June 19-21, 2013, Saint Petersburg State University and Saint Petersburg ITMO University, Saint Petersburg, Russia: IFAC Proceedings Volume # 7, Part# 1, pp. 1920-1925
15. **Павлов, А. Н.** Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов / А. Н. Павлов // Труды СПИИРАН. – 2013. – Выпуск № 5. – С. 143–168.
16. Кулаков, А. Ю. Функциональная реконфигурация чувствительных элементов системы управления движением космического аппарата / А. Ю. Кулаков, **А. Н. Павлов**, Д. А. Павлов // Труды СПИИРАН. – 2013. – Выпуск № 5. – С. 169–181.
17. Ivanov, D. Dual problem formulation and its application to optimal redesign of an integrated production–distribution network with structure dynamics and ripple effect considerations / D. Ivanov, B. Sokolov, **A. Pavlov** // International Journal of Production Research - INT J PROD RES. – 2013. – vol. 51, iss. 18, pp. 5386-5403 (18)
18. Павлов, А.Н. Подход к прогнозированию структурной устойчивости сложных объектов / А.Н. Павлов, Д.А. Павлов // T-Comm - Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Выпуск № 6. – С. 65-67
19. Ivanov, D. Optimal distribution (re)planning in a centralized multi-stage supply network in the presence of the ripple effect / D. Ivanov, **A. Pavlov**, B. Sokolov, // European Journal of Operational Research. – 2014. – vol. 237, iss. 2, pp. 758-770

#### **Учебники и учебные пособия:**

20. Военная системотехника и системный анализ. Модели и методы принятия решений в сложных организационно–технических комплексах в условиях неопределённости и мно-

гокритериальности: учебник / Б. В. Соколов, Б. В. Москвин, **А. Н. Павлов** и др.; под общей ред. Б. В. Соколова. – СПб.: ВИККУ имени А. Ф. Можайского, 1999. – 496 с.

21. Мануйлов, Ю. С. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: учебник / Ю. С. Мануйлов, Е. А. Новиков, **А. Н. Павлов**, А. Н. Кудряшов, А. В. Петрошенко; под общ. ред. Ю. С. Мануйлова. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. – 266 с.
22. **Павлов, А. Н.** Военная системотехника и системный анализ: учебник / А. Н. Павлов, Б. В. Москвин, Б. В. Соколов, Д. Н. Верзилин; под редакцией А. Н. Павлова. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2010. – 251 с.
23. Москвин, Б. В. Методы и технологии выработки управленческих решений. Курс лекций: учебно–методическое пособие / Б. В. Москвин, **А. Н. Павлов**, А. В. Петрошенко. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2005. – 260 с.
24. Мануйлов, Ю. С. Оптимальное автономное целераспределение на борту космического аппарата наблюдения: руководство к лабораторным и практическим работам / Ю. С. Мануйлов, К. Л. Григорьев, С. В. Зиновьев, Е. А. Новиков, **А. Н. Павлов**. – СПб.: ВКА, 2006. – 40 с.
25. **Павлов, А. Н.** Принятие решений в условиях нечеткой информации: учебное пособие / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб.: ГУАП, 2006. – 72 с.
26. **Павлов, А. Н.** Системный анализ организационных структур управления: учебное пособие / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб.: ГУАП, 2006. – 40 с.
27. **Павлов, А.Н.** Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими средствами: курс лекций / А. Н. Павлов, А. Н. Кудряшов, Ю. С. Мануйлов, С. А. Осипенко. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. – 237 с.

**Статьи во всероссийских, региональных и ведомственных научных журналах и изданиях:**

28. Зеленцов, В. А. Многокритериальное оценивание критичности отказов цепей поставок / В. А. Зеленцов, **А. Н. Павлов** // Инновации в логистике: сборник научных статей докторов наук и докторантов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 61–68
29. Осипенко, С. А. Логико–вероятностный и нечетко–возможностный подходы к многокритериальному анализу катастрофоустойчивой информационной системы / С. А. Осипенко, **А. Н. Павлов**, Б. В. Соколов // Вестник Санкт–Петербургского отделения Академии инженерных наук.– СПб.: АИН, 2010. – №7.– С. 60–76.
30. **Павлов, А. Н.** Методика оценивания технического состояния средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами / А. Н. Павлов, С. А. Осипенко // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2008. – Вып. 27. – С. 159–169.

**Основные статьи и доклады в материалах конференций:**

31. Михайлов, Е. П. Многокритериальное оценивание безопасности сложных организационно–технических объектов / Е. П. Михайлов, **А. Н. Павлов** // Управление и информационные технологии: сб. докладов 5–ой научной конференции УИТ–2008 (РФ, г. Санкт–Петербург, 14–16 октября 2008 г.). – СПб.: СПбГЭТУ, 2008. – т.1. – С. 194–197
32. **Павлов, А. Н.** Методика построения псевдоуниверсальных сверток лингвистических показателей на основе теории планирования эксперимента / А. Н. Павлов // Сб. докладов XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008) (РФ, г. Санкт–Петербург, 23 – 25 июня 2008 г.). – СПб.: СПбГЭТУ, 2008. – т. 1. – С. 169–172
33. **Павлов, А. Н.** Многокритериальная кластеризация структурных состояний катастрофоустойчивых информационных систем / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XV Международной конференции (РФ, г. Москва, 17 декабря 2008 г.). – М.: ИПУ РАН, 2008. – С. 150–153
34. **Павлов, А. Н.** Моделирование, оценивание и анализ сценариев деградации и восстановления структурных состояний катастрофоустойчивой информационной системы /

- А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Кибернетика и высокие технологии XXI века: тез. докладов X Международной научно-технической конференции (РФ, Воронеж, 13–14 мая 2009 г.). – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 2009. – С. 183–190
35. **Павлов, А. Н.** Структурная динамика катастрофоустойчивой информационной системы / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды IX Международной научной школы МАБР–2009 (РФ, Санкт–Петербург, 7–11 июля 2009 г.). – СПб.: ГУАП, 2009. – С. 85–93
  36. Иванов, Д. А. Аналитико–имитационное моделирование структурной надежности и живучести сложных технических объектов / Д. А. Иванов, С. А. Осипенко, **А. Н. Павлов**, М. В. Сорокин // Имитационное моделирование. Теория и практика : труды IV всероссийской научно–практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности ИММОД–2009 (21–23 октября 2009 года, СПб, Россия). – СПб., 2009. – С. 199–203
  37. **Павлов, А. Н.** Анализ топологии  $\pi$  – сетей с использованием полинома надежности / А. Н. Павлов // Системный анализ и информационные технологии: труды III международной конференции САИТ–2009 (РФ, Звенигород, 14–17 сентября 2009 г.). – М.: ИСА РАН, 2009. – С. 197–201
  38. **Павлов, А. Н.** Методика кластеризации адаптивных цепей поставок / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Логистика: современные тенденции развития: тез. Докладов VIII Международной научно–практической конференции (РФ, Санкт–Петербург, 16–17 апреля 2009 г.). – СПб.: СПбГИЭУ, 2009. – С. 213–216
  39. **Павлов, А. Н.** Исследование генома двухполюсной сетевой структуры / А. Н. Павлов // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды IX Международной научной школы МАБР–2009 (РФ, Санкт–Петербург, 7–11 июля 2009 г.). – СПб.: ГУАП, 2009. – С. 429–434
  40. Асанович, В. Я. Выявление критичных элементов при управлении безопасностью сложных объектов / В. Я. Асанович, В. А. Зеленцов, **А. Н. Павлов** // Управление и информационные технологии : материалы 6–ой научной конференции (УИТ–2010) 12 – 14 октября 2010 г. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 238–243
  41. **Павлов, А. Н.** Методы оценивания структурной надежности территориально–распределенных систем охраны / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Территориально распределенные системы охраны: научный сборник №3. Часть 1. Теория и практика построения элементов территориально распределенных систем охраны. – Калининград: ФГОУ ВПО «КПИ ФСБ России», 2010. – С. 11–14
  42. Зеленцов, В. А. Комбинированный метод многокритериального анализа критичности отказов элементов сложных объектов / В. А. Зеленцов, Е. А. Копытов, **А. Н. Павлов** // Reliability and Statistics in Transportation and Communication: материалы 10–й международной конференции RelStat'10, 20–23 октября 2010 года, Рига, Латвия, ISBN 978–9984–818–34–4. – Рига: Transport and Telecommunication Institute, 2010. – С. 353–360
  43. Москвин, Б. В. Комбинированные модели и алгоритмы планирования децентрализованной обработки информации / Б. В. Москвин, **А. Н. Павлов**, Б. В. Соколов, М. А. Колпин // Управление в распределенных сетевых и мультиагентных системах: материалы научно–технического семинара. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – с. 67–70
  44. Охтилев, М. Ю. Исследование немонотонных структур сложных технических систем / М. Ю. Охтилев, **А. Н. Павлов**, О. В. Майданович, С. А. Осипенко // Прикладные проблемы управления макросистемами: материалы докладов VIII Всероссийской школы–семинара (РФ, Апатиты, 29 марта – 2 апреля 2010 г.). – Апатиты: КНЦ РАН, 2010. – С. 54–56
  45. **Павлов, А. Н.** Исследование немонотонных систем: анализ «мостиковой» структуры / А. Н. Павлов // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: тру-

ды X Международной научной школы МАБР–2010 (РФ, Санкт–Петербург, 6–10 июля 2010 г.). – СПб.: ГУАП, 2010. – С. 85–93

46. **Павлов, А. Н.** Логико–вероятностный и нечетко–возможностный подходы к исследованию монотонных и немонотонных структур / А. Н. Павлов // Кибернетика и высокие технологии XXI века: тез. докладов XI Международной научно–технической конференции (РФ, Воронеж, 12–14 мая 2010 г.). – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 2010. – С. 483–492
47. **Павлов, А. Н.** Способы реализации функционально полного набора логических операций при когнитивном моделировании / А. Н. Павлов // Автоматизация управления и интеллектуальные системы и среды: материалы первой международной конференции (РФ, Терскол, 20–27 декабря 2010 г.). – Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2010. – т.3. – С. 72–76
48. **Павлов, А. Н.** Полиструктурный подход к анализу надёжности и живучести охранных систем / А. Н. Павлов, О. В. Майданович, С. А. Осипенко // Территориально распределенные системы охраны: научный сборник №3. Часть 1. Теория и практика построения элементов территориально распределенных систем охраны. – Калининград: ФГОУ ВПО «КПИ ФСБ России», 2010. – С. 7–11
49. **Павлов, А. Н.** Комбинированные методы классификации рисков чрезвычайных ситуаций и многоструктурных макросостояний в информационных системах / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов, Д. А. Вятчинин, Н. В. Лапицкая, О. И. Семенов // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды XI Международной научной школы МАБР–2011 (РФ, Санкт–Петербург, 28 июня – 2 июля 2011 г.). – СПб.: ГУАП, 2011. – С. 300–305
50. **Павлов, А. Н.** Концептуальная модель и методологические основы реконфигурации информационно–вычислительной системы / А. Н. Павлов, С. В. Кокорин, Б. В. Соколов // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды XI Международной научной школы МАБР–2011 (РФ, Санкт–Петербург, 28 июня – 2 июля 2011 г.). – СПб.: ГУАП, 2011. – С. 306–311
51. **Павлов, А. Н.** Оперативный анализ структурной устойчивости адаптивных цепей поставок / А. Н. Павлов // Логистика: современные тенденции развития: материалы X международной научно–практической конференции (РФ, Санкт–Петербург, 14, 15 апреля 2011 г.). – СПб.: СПбГИЭУ, 2011. – С. 284–287
52. **Павлов, А. Н.** Динамическая модель управляемой реконфигурации дистрибуционной сети цепи поставок / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов, Д. А. Иванов, А. Ю. Кулаков // Логистика: современные тенденции развития: материалы XI Международной научно–практической конференции (РФ, Санкт–Петербург, 19–20 апреля 2012 г.). – СПб.: СПбГИЭУ, 2012. – С. 249–252
53. **Pavlov A.N., Ivanov D.A., Sokolov B.V.** Conceptual and set–theoretic problem statement of the supply chain controlled reconfiguring // VII российско–немецкая конференция "Гибкость и адаптивность глобальных цепей поставок", РФ, г. Санкт–Петербург, 16–19 мая 2012 г.: Материалы конференции. – СПб.: СПбГУ, 2012. – С. 132–139
54. **Pavlov A.N., Ivanov D.A., Sokolov B.V.** Multi–period optimal inventory–routing planning in multi–stage distribution networks // VII российско–немецкая конференция "Гибкость и адаптивность глобальных цепей поставок", РФ, г. Санкт–Петербург, 16–19 мая 2012 г.: Материалы конференции. – СПб.: СПбГУ, 2012. – С. 171–178
55. **Pavlov A.N., Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Kulakov A.Yu., Ivanov D.A.** Complex modeling of the structural–functional reconfiguration of supply chain // Proceedings of the 12th International Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication" (RelStat'12), 17–20 October 2012, Riga, Latvia, ISBN 978–9984–818–46–7 – Riga: Transport and Telecommunication Institute, p. 261–265
56. **Павлов, А. Н.** Методология и технологии многокритериального анализа критичности отказов функциональных элементов общесудовых систем / А. Н. Павлов, А. Ю. Кулаков, Д. А. Павлов // Вторая международная научно–практическая конференция «Имитацион-

ное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС 2013), 3 июля 2013 г., Санкт-Петербург: Труды конференции / ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта» – СПб, 2013, С. 78-85

**Патенты на изобретения:**

57. Патент №2273882 РФ, МПК G07C3/08/. Устройство для определения характеристик надежности изделия / В. Д. Гришин, **А. Н. Павлов**, А. Н. Шульгин, А. В. Перегудов. – 2006. – бюл. 10. – 7 с.
58. Патент №2310913 РФ, МПК G07C3/08/. Устройство для определения оптимального периода технического обслуживания системы / В. Д. Гришин, **А. Н. Павлов**, А. Б. Саранчуков. – 2007. – бюл. 32. – 7 с.
59. Патент №2343544 РФ, МПК G07C3/08/. Устройство для определения оптимального периода технического обслуживания изделия / В. Д. Гришин, **А. Н. Павлов**, Е. П. Михайлов. – 2009. – бюл. 1. – 7 с.