

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

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

Диссертация на соискание ученой степени доктора
технических наук

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

Санкт-Петербург - 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ПРОБЛЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ РЕКОНФИГУРАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ..	32
1.1 Системный анализ проблемы планирования реконфигурации СЛО	32
1.2 Морфологический анализ задач реконфигурации СЛО	40
1.3 Анализ современных подходов к планированию реконфигурации СЛО..	48
1.3.1 «Слепая» реконфигурация СЛО.....	48
1.3.2 Анализ особенностей вариантов «слепой» реконфигурации СЛО	55
1.4 Содержательное и теоретико-множественное описание проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО	58
1.5 Агрегативно-декомпозиционный подход к решению проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО	66
Выводы.....	78
2 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОНОТОННЫХ И НЕМОНОТОННЫХ, ОДНОРОДНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ	81
2.1 Концепция генома структуры системы	81
2.1.1 Способы описания монотонной и немонотонной структуры системы	81
2.1.2 Геном монотонной структуры системы.....	88
2.1.3 Свойства старшей компоненты генома структуры	96
2.1.4 Геном немонотонной структуры системы. Обобщенное понятие генома структуры системы.....	103
2.2 Исследование структурной надежности СЛО	110
2.2.1 Показатель структурной надежности (отказа). Логико-вероятностный подход.....	110
2.2.2 Показатель структурной надежности (отказа). Нечетко-возможностный подход.....	111
2.2.3 Исследование структурной надежности П-структур.	120
2.2.4 Исследование структурной надежности Н-структур.	126
2.3 Исследование структурной живучести СЛО	134
2.3.1 Интегральный показатель структурной живучести СЛО.....	135
2.3.2 Вычисление работоспособных структурных состояний и интегральной оценки структурной живучести СЛО	136
2.3.3 Оперативный анализ структурной живучести СЛО на основе концепции генома структуры	139
Выводы.....	144

3	МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КРИТИЧНОСТИ ОТКАЗОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	146
3.1	Анализ современного состояния исследований критичности отказов функциональных элементов СлО.....	146
3.2	Структурно-функциональный показатель интенсивности применения ФЭ СлО	151
3.3	Многокритериальный анализ критичности отказов ФЭ СлО	158
3.3.1	Место и роль задач многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СлО.....	158
3.3.2	Классификация современных методов многокритериального оценивания	163
3.3.3	Подходы к построению результирующих показателей многокритериального оценивания в условиях неопределенности	168
3.3.4	Нечетко-возможностный подход к построению результирующих показателей многокритериального оценивания.....	170
3.3.5	Подход с применением нечеткой логики и метода теории планирования эксперимента для многокритериального оценивания.....	175
	Выводы.....	185
4	МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ СЦЕНАРИЕВ (ТРАЕКТОРИЙ) СТРУКТУРНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ	187
4.1	Обобщенная модель структурной реконфигурации СлО.....	187
4.2	Постановка задачи построения сценариев структурной реконфигурации СлО на основе концепции ее генома	189
4.3	Комбинированный метод и алгоритм решения задачи построения траектории структурной реконфигурации СлО	194
4.4	Структурно-топологические показатели монотонных структур СлО	204
4.5	Многокритериальная кластеризация сценариев структурной реконфигурации СлО	206
4.5.1	Иллюстрация методики кластеризации сценариев структурной реконфигурации СлО.....	212
4.6	Иллюстрация методики построения траекторий структурной реконфигурации компьютерных сетей информационных услуг.....	215
	Выводы.....	221
5	МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	223

5.1 Анализ современного состояния исследований задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО.....	223
5.2 Содержательная и теоретико-множественная постановка задачи многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО	226
5.3 Динамическая модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО	234
5.4 Статическая модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО	238
5.4.1 Статическая интерпретация динамической модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО	238
5.4.2 Формирование результирующего отношения предпочтения выбора плана структурно-функциональной реконфигурации СЛО	241
5.4.3 Анализ возможных путей решения задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО	246
5.4.4 Параметрический синтез СЛО	250
Выводы.....	254
6 ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ	256
6.1 Методика планирования структурно-функциональной реконфигурации адаптивных цепей поставок.....	259
6.1.1 Транспортно-дистрибуционная сеть цепи поставок	259
6.1.2 Иллюстрация методики планирования структурно-функциональной реконфигурации дистрибуционной сети цепи поставок.....	264
6.1.3 Анализ планов структурно-функциональной реконфигурации дистрибуционной сети цепи поставок	272
6.1.4 Параметрический синтез дистрибуционной сети цепи поставок	276
6.2 Методика оценивания критичности отказов технических средств командно-измерительного комплекса	281
6.2.1 Анализ особенностей ОКИК как объекта эксплуатации	282
6.2.2 Особенности методики многокритериального оценивания критичности отказов ТСр ОКИК.....	283
6.2.3 Результаты анализа критичности отказов ТСр ОКИК.....	286
6.3 Методика многокритериального оценивания интегральных вкладов элементов и подсистем АСУ КА наблюдения в показатель надежности ее функционирования	303

6.3.1	Содержательное описание процесса функционирования автоматизированной системы управления космическими аппаратами.....	303
6.3.2	Методика многокритериального оценивания интегральных вкладов элементов и подсистем наземной и орбитальной группировок АСУ КАН в показатель надежности ее функционирования	310
6.3.3	Результаты применения методики МОИВ	314
6.4	Методика многокритериального сравнительного анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде в различных субъектах РФ.....	323
6.4.1	Разработка системы показателей для анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде	323
6.4.2	Особенности методики многокритериального сравнительного анализа качества организации предоставления услуг	330
6.4.3	Результаты сравнительного анализа качества организации предоставления услуг в электронном виде в различных субъектах РФ.....	333
	Выводы.....	340
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	342
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	346
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	349

Введение

Последние годы наблюдается устойчивая тенденция усложнения существующих и появления принципиально новых сложных объектов (СЛО). Это обусловлено быстрым возрастанием сложности технологии производства, сложности конструкций систем различного назначения, возрастанием объемов и разнообразием информационных и материальных потоков, созданием автоматизированных систем управления глобального характера, особенно в таких областях, как экономика, военное дело, экология и др.

Сложность современных объектов, в основном, вызвана необходимостью учета различных факторов взаимодействия системы с окружающей средой, увеличением числа входящих в их состав элементов и подсистем, а также, соответственно, стремительным ростом числа внутренних связей, и проявляется в таких аспектах, как структурная сложность, сложность функционирования, сложность выбора поведения, сложность моделирования и сложность развития [6,18,21,37,43,60,61,137,223,224].

Одной из основных особенностей современных СЛО является то, что их параметры и структуры на различных этапах жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных причин. Другими словами, на практике мы сталкиваемся постоянно со структурной динамикой СЛО различной природы.

В качестве наиболее характерных примеров СЛО с перестраиваемой структурой можно привести:

- системы управления функционированием различных классов транспортных систем (наземных, воздушных, морских, космических и т.п.);
- территориально-распределённые неоднородные информационно-вычислительные сети, компоненты которых – локальные вычислительные сети;
- гибкие автоматизированные и автоматические производства различных типов продукции;
- современные информационные системы виртуальных предприятий, адаптивные цепи поставок в логистике.

Особую опасность для современных СЛО представляют причины, которые приводят к возникновению кризисных ситуаций, аварий и катастроф, имеющих природно-экологические, технико-производственные или антропогенно-социальные причины. В этих условиях обеспечение непрерывности технологических процессов и повышение надежности, живучести, катастрофоустойчивости и отказоустойчивости соответствующих СЛО является одним из важнейших стратегических направлений развития современных социально-экономических и технических комплексов [17,18,21,37,60,61].

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 надежности, живучести, катастрофоустойчивости и отказоустойчивости СЛО в рамках развиваемой в настоящее время теории управления структурной динамикой [137,223,224] 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 [18,21,37,60,61,137].

Кроме того, базируясь на определениях, данных в ГОСТах [53-56], 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 за-

данных 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 [18,21,37,38,60,61]. 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 [137,223,224]. 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 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 [268].

Предварительный анализ как рассматриваемой проблемы 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 объектов эти вопросы, как отдельный предмет исследований, с единой общесистемной точки зрения практически не рассматривались. Предметная область проблем и задач управления реконфигурацией СЛО имеет целый ряд существенных особенностей, кардинально отличающей её от предмета исследования существующих теорий управления

сложными системами. Среди них можно указать, в частности следующие особенности [6,21,37,43,61,83,137,180,219,235,241]:

- СЛО, имеющие повышенную сложность и размерность, обладают свойствами избыточности, многофункциональности, распределенности, унификации, однородности основных элементов, подсистем и связей;
- наличие в СЛО как контуров отрицательной, так и положительной обратной связи, приводящих к режимам самовозбуждения;
- структурная динамика, нелинейность и непредсказуемость поведения СЛО вызвана тем, что чрезвычайные и катастрофические ситуации, как правило, трудно предсказуемы и возникают внезапно (временная неопределенность в обеспечении готовности к управлению);
- постоянное изменение правил и технологий функционирования, изменение правил изменения технологий и самих правил функционирования;
- масштабы связанных с ними негативных последствий также трудно предсказуемы; они могут быстро увеличиваться со временем и иметь различные отдаленные негативные последствия для разнородных, в том числе территориально распределенных объектов (неопределенность границ и содержания предметной области);
- информация о таких ситуациях, как правило, имеет противоречивый и плохо предсказуемый по своему составу и объему характер и поступает в систему управления с различными временными задержками (неопределенность в идентификации текущих состояний и ситуаций);
- наряду с детерминированным и стохастичным поведением, возможно хаотическое поведение;
- принятие решений в таких ситуациях осуществляется в условиях жесткого лимита времени, рисков и различных ограничений в возможностях выбора и реализации управляющих воздействий и т. п.

Наряду с управляющими воздействиями в контурах управления СЛО присутствуют и соответствующие возмущающие воздействия, имеющие различную природу и характер своего проявления. Указанные возмущающие воздействия

способны ухудшить качество функционирования объекта вплоть до потери работоспособности. Для учёта данных воздействий целесообразно при описании структурной динамики СЛО обеспечить решение задач многокритериального оценивания, анализа и выбора облика СЛО, имеющих монотонные и немонотонные, однородные и неоднородные, равноценные и неравноценные структуры в условиях неполноты, неопределенности, неточности и противоречивости информации.

Говоря в целом об исследовании задач управления структурно-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 [6,7,12-14, 77, 82, 83, 85, 95, 96, 99, 133, 137, 191, 193, 200, 210, 216, 220, 221, 222, 224, 226, 244, 260, 261,262, 265] 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.

Это вызвано тем, что зачастую объекты, входящие в структуру СЛО, не имеют хорошо определенной стохастической компоненты. Если же ее удастся выявить, то возникают проблемы построения и проверки на адекватность вероятностной модели. Указанные проблемы связаны со следующими причинами:

во-первых, построение вероятностной модели требует больших объемов наблюдений, которые, как правило, оказываются неполными, неточными и противоречивыми;

во-вторых, процесс построения большой выборки наблюдений длителен по времени, в течение которого объект и окружающая ее среда изменяется, что приводит к неадекватности получаемых вероятностных закономерностей;

в-третьих, если указанные выше трудности решены, то построенная вероятностная модель может оказаться сложной для ее использования на практике.

Для моделирования надежности и безопасности СЛО в условиях вышеупомянутых причин предлагается использовать нечетко-возможностный подход, в основе которого лежит понятие пространства с мерой возможности.

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. Среди данных результатов можно выделить [31,62,65,90,126,127,129,213-215]: 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 существенно 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 многокритериального планирования реконфигурации СЛО, повышения уровней надежности и живучести функционирования СЛО.

Проведенный анализ существующих и проектируемые сложные объекты большого класса систем в ответственных приложениях (ракетно-космическая, авиационная, корабельная техника, сложные системы электроснабжения, радиоэлектронные и автоматизированные системы и комплексы различного назначения и ведомственной принадлежности и т.п.) с динамически изменяемой структурой позволяют рассмотреть существующие в настоящее время несколько теоретических подходов к решению задач полимодельного многокритериального структурно-функционального синтеза облика СЛО.

В рамках стандартной (классической) технологии реконфигурации СлО (в ряде случаев называемой *«слепой» реконфигурацией* [137,223,224]) при отказах и нарушениях правильности функционирования соответствующего сложного объекта с целью сохранения наиболее приоритетных функций указанного объекта или допустимых условий работоспособности *«жертвуют»* другими функциями или частью работоспособных функциональных элементов. 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.

Среди стандартной технологии реконфигурации СлО можно выделить следующие существующие варианты *«слепой» реконфигурации* [23-30,34,87,91,92,238-243,293].

Вариант I. Функциональные элементы (ФЭ) СлО представляют собой многофункциональные унифицированные (однородные) вычислительные средства. Процедура реконфигурации СлО заключается в следующем [91,92]. 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. Более сложная процедура *«слепой» реконфигурации* представлена в работах [23-30,34,87,238-243,293]. 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. Возможно наличие в СЛО общих ресурсов (внешняя память, базы данных, периферийные устройства и др.).

Пусть данная система осуществляет решение известного множества функций (задач) с заданными требованиями к порядку их выполнения и взаимосвязи согласно выполняемому заданию. При этом каждый из ФЭ способен полностью выполнять одну (специализированный ФЭ) или несколько функций (универсальный ФЭ) из множества функций, возложенных на систему.

Для каждой функции ставится в соответствие некоторое множество полных или упрощенных алгоритмов выполнения функции.

Тогда вариант реконфигурации СЛО, обобщающий предложенные подходы в работах [23-30,34,87,238-243,293], можно представить следующим образом.

Для начального состояния осуществляется построение плана распределения задач и информационных потоков с учетом технологических, технических, стоимостных, временных, ресурсных и т.п. ограничений. Закрепленные этим планом за ФЭ задачи будем согласно [238-243] называть *собственными*. В случае перехода СЛО (вызванного отказом некоторой совокупности ФЭ) в другое состояние рассматриваются *две стратегии*.

Стратегия 1 (коррекция планов) - *собственные* задачи и связанные с ними информационные потоки отказавших ФЭ перераспределяются между работоспособными ФЭ, с сохранением за ними выполнения своих *собственных* задач.

Стратегия 2 (перепланирование) - в новом состоянии осуществляется перераспределение всех решаемых СЛО задач.

Обеспечение свойства отказоустойчивости СЛО осуществляется путем итогового размещения в различных ФЭ резервных копий алгоритмов решаемых задач. При переходе СЛО в другое состояние режим ее функционирования должен быть изменен в соответствии с планом перераспределения задач и информационных потоков для этого состояния, что предполагает активизацию резервных копий алгоритмов решаемых задач работоспособными ФЭ.

Вариант III. Проведенный анализ показал, что при решении задачи планирования 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 представлять с использованием подходов, базирующихся на идеях двухэтапного или многоэтапного стохастического программирования [118,157,263]. Другими словами, построение начальных планов распределения и планов перераспределения задач и потоков информации осуществляется совместно, т.е. осуществляется выбор начальных планов распределения таким образом, чтобы последующие перераспределения позволили рационально использовать ресурсы СЛО, необходимые для компенсации неблагоприятных воздействий [118,157,263].

Следует отметить, что для повышения гибкости (адаптивности) рассматриваемых СЛО заблаговременно вносится избыточность во все виды их структур, которая позволяет на практике ставить и решать задачи управления данными структурами (в том числе проводить их реконфигурацию). Однако в ходе «слепой» реконфигурации, как правило, не проводятся следующие операции: учёт и анализ текущих характеристик решаемых СЛО задач и выполняемых функций; анализ и оценивание текущего состояния СЛО в целом; оперативный расчёт, оценивание и анализ целевых и информационно-технических возможностей СЛО для обоснованного перераспределения функций СЛО между её работоспособными элементами и подсистемами.

Таким образом, применительно к современным СЛО реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления параметрами и структурами СЛО для *парирования отказов ФЭ*, 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 «слепой»

реконфигурации будем называть *структурно-функциональной реконфигурацией*.

Далее 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.

Структурно-функциональная реконфигурация СЛО, с одной стороны, направлена на изменение топологии системы, характеристик работоспособности ее технической подсистемы для ликвидации последствий различных деструктивных воздействий, с другой стороны, предполагает гибкое перераспределение выполняемых системой целей, задач и функций между неотказавшими компонентами при учете допустимости функционирования СЛО с ухудшенными в заданных пределах показателями качества.

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие взаимосвязанные **задачи**:

1) Провести системный анализ проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов с перестраиваемой структурой.

2) Исследовать структурно-топологические и структурно-функциональные свойства монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных, равноценных и неравноценных структур сложных объектов.

3) Осуществить формальное описание и многокритериальный анализ сценариев структурной реконфигурации сложных объектов.

4) Разработать модельно-алгоритмическое обеспечение многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов в динамически изменяющихся условиях.

5) Разработать модельно-алгоритмическое обеспечение параметрического синтеза сложного объекта, обеспечивающего гарантированный уровень значений интегрального показателя качества планов его структурно-функциональной реконфигурации в динамически изменяющихся условиях.

6) Провести аналитико-имитационного моделирования условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов.

7) Проверить работоспособность и реализуемость разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов 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.

Согласно проведенному анализу, в условиях неблагоприятных воздействий, которые могут приводить к отказу ФЭ, СЛО может находиться в одном из своих структурных состояний. Проведенный анализ структурной динамики СЛО показывает, что, как правило, *структуры* СЛО не изменяются непрерывно, а *являются постоянными на некоторых временных интервалах*. Функционирование СЛО в каждом состоянии определяется набором отказавших и работоспособных (частично работоспособных) ФЭ. *Отказавшим (неработоспособным)* будем считать ФЭ СЛО, который не способен выполнить операции сохранения, приема, передачи, обработки, защиты информационных и/или материальных потоков. ФЭ будет считаться *частично работоспособным* при возможности выполнения им хотя бы одной из перечисленных операций.

Очевидно, что значения частных показателей качества функционирования СЛО в каждом структурном состоянии зависят от:

- множества отказавших, работоспособных, частично работоспособных ФЭ;
- распределения операций обработки, сохранения, приема-передачи информационных и/или материальных потоков;
- перераспределения этих операций между работоспособными или частично работоспособными ФЭ.

Помимо выше указанных особенностей при исследовании проблемы разработки моделей и методов планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО важным и неотъемлемым условием изучения возможностей СЛО является проведение анализа и оценивания архитектуры его структурных состояний. Одним из возможных подходов к изучению структурных состояний СЛО является

таксономия структур, базирующаяся на таких понятиях, как «*однородность-неоднородность*», «*равноценность-неравноценность*», «*монотонность-немонотонность*». При данном подходе можно считать, что СЛО однороден, если все включенные в него ФЭ идентичны, и неоднороден в том случае, когда хотя бы один из его ФЭ отличается от всех остальных.

Другим критерием оценки архитектуры СЛО может быть равноценность и неравноценность структурного построения. Так архитектура СЛО равноценна, если потеря одного из ФЭ СЛО равнозначна потере любого другого. И наоборот, архитектура СЛО неравноценна, если отдельные ФЭ имеют большую ценность по отношению к другим ФЭ.

Для изучения этого свойства СЛО требуется исследовать критичность входящих в его состав ФЭ. Выявление критичных элементов позволяет сосредоточить усилия на совершенствовании узлов, играющих в обеспечении надежности и живучести функционирования СЛО наиболее важную (ключевую) роль. Критичность отказов ФЭ СЛО рассматривается в широком смысле как векторное свойство, для оценивания которого необходимо использовать целый ряд частных показателей. Наиболее универсальным набором таких частных показателей являются: степень тяжести последствий отказа; вероятность отказа; устойчивость элемента к воздействию внешних неблагоприятных факторов; степень резервирования; контролируемость состояния элемента; продолжительность существования риска отказа; возможность локализации отказа. Помимо приведенных показателей требуется разработать способы формализации показателей критичности отказов ФЭ, отражающих структурные и функциональные особенности СЛО. Как видно из приведенного перечня, показатели могут иметь как количественный, так и качественный характер и для их измерения могут использоваться различные виды шкал. При этом процесс управления СЛО базируется на некоторых субъективных суждениях лица, принимающего решение (ЛПР), отражающих его собственный опыт как эксперта. Все это требует необходимости поиска иных, отличающихся от традиционных, путей решения проблемы критериальной неопределенности.

Кроме того, структурные модели функционирования большинства СЛО корректно могут описываться блок-схемами, деревьями отказов и событий, графами связности, многотерминальными сетями и т.п. Однако данные структурные модели СЛО могут описывать функционирование только монотонных систем. В монотонных моделях невозможно учитывать логически сложные и противоречивые связи и отношения между ФЭ, например, которые в одних структурных состояниях системы увеличивают, а в других - уменьшают значения показателей надежности и живучести ее функционирования. Также монотонные модели не представляют системы, в которых одновременно функционируют элементы, часть из которых обеспечивает увеличение, например, надежности или безопасности, а другая часть является причиной возникновения отказов или аварий, т.е. оказывает противоположное, вредное влияние на надежность и живучесть системы в целом.

Поэтому цель работы достигается в ходе проведения исследований по следующим **направлениям**.

1. Разработка методологических и методических основ исследования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СЛО.

2. Многокритериальный анализ и выявление критичных ФЭ СЛО, отказ которых приводит к изменению структурного состояния системы.

3. Построение в области работоспособных структурных состояний множества классов (кластеров) эквивалентных оптимистических и пессимистических сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СЛО, вызванных отказами критичных ФЭ. Определение внутри каждого кластера эквивалентных траекторий структурной реконфигурации типовой (эталонной) траектории СЛО.

4. Решение задачи планирования *структурно-функциональной реконфигурации* СЛО на оптимистических и пессимистических эталонных сценариях структурной реконфигурации СЛО с использованием многокритериальных моделей планирования операций обработки, приема-передачи и хранения информационных и/или материальных потоков с учетом временных интервалов постоянства структуры СЛО.

5. Решение задачи параметрического синтеза СЛО, обеспечивающего гарантированный уровень значений интегрального показателя качества планов его структурно-функциональной реконфигурации в динамически изменяющихся условиях.

6. Проведение аналитико-имитационного моделирования условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО с целью выявления эмерджентных свойств СЛО, неучтенных предлагаемой неформальной декомпозицией и агрегированием структурно-сложной системы.

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, обеспечивающих гарантированный уровень качества планов перераспределения операций обработки, сохранения, приема-передачи информационных 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 обобщённая 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 перспективных 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. Второй *новый метод* многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СЛО основан на синтезе методов теории планирования эксперимента и нечеткого

логико-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 «Информационные технологии и методы анализа сложных систем» (2007 г. - «Разработка методологических основ комплексного моделирования жизненных циклов мобильных информационных технологий»; 2008 г. - «Разработка комбинированных методов и алгоритмов адаптивного планирования и управления модернизацией и функционированием катастрофоустойчивых информационных систем»); в 2009-2011 г. проект №О-2.3 «Развитие теоретических основ и интеллектуальных информационных технологий структурно-функционального синтеза адаптивных и самоорганизующихся информационно-вычислительных систем и сетей на различных этапах их жизненного цикла» (2009 г. – «Системный анализ и комплексное моделирование процессов создания, функционирования и модернизации самоорганизующихся информационно-вычислительных систем и сетей в условиях динамично изменяющейся

обстановки»; 2010 г. – «Разработка комбинированных методов и алгоритмов структурно-функционального синтеза адаптивных и самоорганизующихся информационно-вычислительных систем и сетей (АС ИВСС) с использованием междисциплинарного подхода»; 2011 г. – «Программная реализация (создание прототипов программ) и исследование интеллектуальных информационных технологий (ИИТ) комплексного моделирования АС ИВСС на различных этапах её жизненного цикла, выработка рекомендаций по использованию полученных фундаментальных и прикладных научных результатов на практике»); в 2012 г. проект № 2.11 «Комплексное моделирование, многокритериальное оценивание и анализ рисков при выработке управленческих решений в катастрофоустойчивой информационной системе»; а также грантов РФФИ 08-08-00346 «Разработка методов моделирования, структуризации и алгоритмизации правил управления состояниями технических систем в штатных и нештатных ситуациях по их неформализованным исходным описаниям» (2008-2010 гг.), 08-08-00403 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов интерактивного управления динамическими логистическими сетями с использованием технологий радиочастотной идентификации и мобильных информационных технологий» (2008-2010 гг.), 09-08-00259 «Теоретическое обоснование и экспериментальные исследования вариационного подхода к решению задач статистического оценивания параметров состояния и моделей нелинейных динамических систем и его применение к задачам навигации космических аппаратов» (2009-2011 гг.), 10-07-00311 «Разработка, теоретическое обоснование и экспериментальные исследования методов, моделей, алгоритмов и методик многокритериального оценивания, анализа и выбора программ управления модернизацией унаследованной информационной системы на основе сервисно-ориентированного подхода» (2010-2012 гг.), 10-08-90027 «Исследования и разработка методов оперативного мониторинга состояний сложных организационно-технических объектов и формирования вариантов управленческих решений в нештатных ситуациях» (2010-2011 гг.), 11-08-00641 «Разработка методического обеспечения процессов формирования моделей принятия ситуационных решений по управлению состояниями технических систем» (2011-2013 гг.),

11-08-00767 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов реконфигурации структурных состояний катастрофоустойчивых объектов в условиях неопределенности» (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 электроэнергии 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.

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 логико-вероятностного исчисления, нечеткой логики, теории планирования эксперимента, теорий линейного и динамического программирования, случайного поиска, теории многокритериального выбора.

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

- 1) Агрегативно-декомпозиционный подход и методология решения проблемы 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 результатов работы. Результаты работы докладывались на всероссийских, международных научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах: II, III международных конференциях «Системный анализ и информационные технологии» (САИТ-2007, 2009), Обнинск, 2007 г., 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, 2010), Санкт-Петербург, 2008 г., 2010 г.; XI международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008), г. Санкт-Петербург, 2008 г.; XI, XII Санкт-Петербургских международных конференциях «Региональная информатика-2008, 2010, 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 «Ки-

бернетика и высокие технологии XXI века», Воронеж, 2009 г., 2010 г., 2011 г., 2012 г.; IX, X, XI международных научных школах МА БР-2009, 2010, 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 применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009, 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, '11, '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.

1 Проблема планирования реконфигурации сложных объектов

1.1 Системный анализ проблемы планирования реконфигурации СЛО

Анализ существующих и прогнозируемых кризисных и чрезвычайных ситуаций, повсеместно возникающих в настоящее время в различных предметных областях, показывает, что они перестают быть отраслевыми, а перерастают в аварии и катастрофы, имеющие уже межотраслевой характер. В этих условиях исследовать и решать задачи повышения надежности и живучести сложных объектов (СЛО) необходимо уже в рамках междисциплинарного подхода, интерпретируя их как задачи управления структурной динамикой (УСД) указанными системами [137].

Особую опасность для современных СЛО представляют причины, которые приводят к возникновению кризисных ситуаций, аварий и катастроф, имеющих природно-экологические, технико-производственные или антропогенно-социальные причины [18]. При этом спектр угроз экономической, физической и информационной безопасности, а также перечень уязвимостей аппаратно-программной и информационной структур СЛО постоянно растет [6,7,18,21,37,38,60,61].

Таким образом, в реальной жизни возможны ситуации, когда указанные угрозы являются *комбинированными* и приводят к *лавинообразному* возникновению и развитию негативных событий, приводящих в конечном итоге к катастрофическим последствиям. В этих условиях обеспечение непрерывности технологических процессов и повышение надежности и живучести соответствующих производственных систем является одним из важнейших стратегических направлений развития современных социально-экономических и технических комплексов. Это обусловлено необходимостью сохранять устойчивость и стабильность функционирования СЛО в различных условиях неблагоприятного воздействия внешних и внутренних факторов техногенного и/или природного характера.

Под *живучестью* СЛО в «узком смысле», понимается его свойство, характеризующее способность 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 [18,21,37,38,60,61].

Необходимо подчеркнуть разницу между понятиями «отказоустойчивость» и «живучесть» [18,21,37,38,60,61]. В понятии «отказоустойчивость» акцент делается на восстановление работоспособности после единичных, случайных, не связанных между собой отказов компонентов. Технология отработки таких отказов предполагает, как правило, что в работу вводятся резервные компоненты каждой подсистемы либо оставшиеся компоненты многократно дублированной подсистемы перераспределяют между собой работу независимо от того, что происходит в это время в других подсистемах.

Предусмотренное в существующих и создаваемых СЛО функциональное, информационное, временное, структурное резервирование создаёт условия для организации процессов управления указанными резервами. К настоящему времени разработаны следующие варианты организации процесса управления резервами (варианты ввода резервов в систему): постоянное резервирование, динамическое, замещением, скользящее резервирование [59, 60, 72, 110, 134, 209, 211, 223, 257, 270].

Основная цель *управления резервами* СЛО состоит в сохранении заданного уровня живучести объектами, а само управление резервами представляет собой операцию или комплекс операций, ориентированных на выполнение указанной цели и связанных со сбором, оценкой и анализом информации о состоянии (мониторинг) СЛО, выявлением неработоспособных элементов, подсистем и связей между ними, включением резервных элементов и подсистем.

Так относительно информационных систем и сетей (ИСС) СЛО суть алгоритмического и информационного резервирования состоит в тиражировании (дублировании) полных и упрощённых (сокращённых) алгоритмов (баз данных) в заранее заданных узлах пространственно распределённой ИСС.

В этих условиях управление алгоритмическим и информационным резервом состоит в выборе такого состава и структуры алгоритмов (баз данных), при котором обеспечивается заданный уровень живучести СЛО.

Однако, при создании современных ИСС, как правило, используют традиционные методы построения отказоустойчивых систем. Это касается как Disaster Tolerance (DT) систем нижнего уровня, предусматривающих синхронную зеркальную копию данных в удаленном центре; так и DT систем верхнего уровня, которые поддерживают и удаленные копии данных, и все необходимые серверные приложения в состоянии высокой готовности, что способствует самостоятельно, без участия человека, отработать отказы без потерь данных.

Определенным недостатком существующих отказоустойчивых решений является то, что логика их работы в большинстве случаев ограничивается простыми эвристическими алгоритмами распределения задач по доступным ресурсам. При этом распределение ресурсов в вычислительной системе решается как однократная строго детерминированная задача. В этом случае распределение ресурсов в принципе может быть произведено один раз за все время функционирования системы, возможно, на этапе проектирования.

Связанные с этим проблемы касаются, во-первых, не рационального использования имеющихся в наличии ресурсов, во-вторых, невозможности учета самых разнообразных особенностей, присущих как задачам, так и ресурсам. При рассмотренном способе распределения задач по ресурсам вероятны ситуации пиковых нагрузок на один или несколько ресурсов при простое остальных.

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

Реконфигурация СлО – это целенаправленный процесс изменения структуры (структур) СлО в целях сохранения и в последующем восстановления (повышения) уровней надежности и живучести функционирования СлО, либо обеспечения минимального их снижения при возможной деградации и/или выходе из строя элементов и подсистем СлО [18, 21, 37, 38, 59-61, 72, 110, 137, 168, 271, 281, 282, 289, 294, 295, 297].

Предварительный анализ проблем и задач планирования реконфигурации СлО, которые необходимо решать на различных этапах жизненного цикла СлО и существующих теоретических методов и подходов ее решения показывает, что в рамках ранее разработанных теорий и методологий управления сложными системами эти вопросы, как отдельный предмет исследований, с единой общесистемной точки зрения практически не рассматривались. При этом покрывающая их предметная область имеет целый ряд существенных особенностей, кардинально отличающей её от предмета исследования существующих теорий управления сложными системами. Среди них можно указать, в частности следующие особенности [6,18,21,37,38,60,61,137]:

- чрезвычайные и катастрофические ситуации, как правило, трудно предсказуемы и возникают внезапно (временная неопределенность в обеспечении готовности к управлению);
- масштабы связанных с ними негативных последствий также трудно предсказуемы; они могут быстро увеличиваться со временем и иметь различные отдаленные негативные последствия для разнородных, в том числе территориально распределенных объектов (неопределенность границ и содержания предметной области);
- информация о таких ситуациях, как правило, имеет противоречивый и плохо предсказуемый по своему составу и объему характер и поступает в систему управления с различными временными задержками (неопределенность в идентификации текущих состояний и ситуаций);
- принятие решений в таких ситуациях осуществляется в условиях жесткого лимита времени, рисков и различных ограничений в возможностях выбора

и реализации управляющих воздействий и т. п.

Учет этих и целого ряда других специфических особенностей процессов управления сложными системами в чрезвычайных и катастрофических ситуациях требует разработки новых принципов, подходов, способов и методов мониторинга, анализа и прогнозирования ситуаций, разработки вариантов управляющих решений, процедур их выбора и реализации.

Стандартная (классическая) технология реконфигурации СлО при отказе одного из её ресурсов включает в себя следующие основные шаги [18,21,37,38,60,61,137].

Шаг 1. Определение и анализ момента времени и места отказа ресурса, снятие с решения функции (задачи), выполняемой на данном ресурсе, передача функции (задачи) на другой ресурс (с сохранением / без сохранения полученных промежуточных результатов).

Шаг 2. Исключение отказавшего ресурса из конфигурации СлО, попытка замены его резервным (однотипным), либо резервным другого типа, с близкими функциональными возможностями.

Шаг 3. Исключение связей с отказавшим ресурсом, запрет на доступ к нему, а для самого отказавшего ресурса – попытка его восстановления.

В том случае, если на отказавшем ресурсе решалась высокоприоритетная функция (задача), которая при передаче на другие ресурсы начинает конфликтовать с функциями (задачами), закреплёнными за данным ресурсом, то в зависимости от дисциплины обслуживания происходит прерывание выполнения менее приоритетных функций (задач), либо просто снятие с решения. Таким образом, в рамках стандартной реконфигурации при отказах и нарушениях правильности функционирования соответствующего СлО с целью сохранения наиболее приоритетных функций указанного объекта или допустимых условий работоспособности «жертвуют» другими функциями или частью работоспособных элементов.

Данную реконфигурацию в ряде случаев называют **«слепой» реконфигурацией**, так как в ходе её реализации, как правило, не проводятся следующие операции: учёт и анализ текущих характеристик решаемых в СлО задач и выполняемых

функций; анализ и оценивание текущего состояния СЛО в целом; оперативный расчёт, оценивание и анализ целевых и информационно-технических возможностей СЛО для обоснованного перераспределения функций СЛО между её работоспособными элементами и подсистемами.

Необходимым условием реализации стандартной технологии реконфигурации является наличие многоуровневой модели работоспособности СЛО. Возможное графическое описание указанной модели для одной из подсистем (структур) данного объекта представлено на рисунке 1.1.1 [110,137].

На рисунке 1.1.1 вершинам графа сопоставлены состояния (технические состояния (ТС)) СЛО. Каждый СЛО и её элементы могут в процессе эксплуатации попадать в различные виды ТС: исправное ТС, неисправное ТС, работоспособное ТС, неработоспособное ТС, правильное и неправильное функционирование. На рисунке 1.1.1 представлены три основных класса ТС СЛО:

➤ класс полностью работоспособных и исправных состояний $S^{(u)} = \{S_{\alpha}^{(u)}\}$, $\alpha = 1, \dots, N^{(u)}$. Элементы этого класса отличаются друг от друга уровнем накопленных отклонений от нормы эксплуатационных параметров в соответствующих элементах СЛО. При этом состоянию $S_1^{(u)}$ соответствует номинальный уровень по всем параметрам всех элементов и подсистем, входящих в СЛО;

➤ класс частично работоспособных состояний с β -м уровнем работоспособности и γ -м объёмом накопленных отклонений. При этом будем считать, что с увеличением номера индекса β -й уровень работоспособности СЛО будет снижаться: $S^{(p)} = \{S_{\beta\gamma}^{(p)}\}$, $\beta = 1, \dots, N_1^{(p)}$, $\gamma = 1, \dots, N_2^{(p)}$. На графе уровни работоспособности разделяются горизонтальными штриховыми линиями;

➤ класс неработоспособных (отказовых) состояний СЛО, обусловленных появлением δ -го типа отказа с η -м объёмом потерь: $S^{(o)} = \{S_{\delta\eta}^{(o)}\}$, $\delta = 1, \dots, N_1^{(o)}$, $\eta = 1, \dots, N_2^{(o)}$.

На рисунке 1.1.1 S_L – предельное состояние – состояние, в котором неработоспособны все элементы СЛО и уровень потерь максимален. На данном рисунке

дугам графа соответствуют переходы СЛО из одного состояния в другое состояние. Данные переходы, как уже отмечалось ранее, имеют различную природу: одни являются структурно-функциональными, другие – неструктурно-функциональными. В соответствии с предложенной в [110] классификацией в дальнейшем будем рассматривать:

Д–переходы, которые обусловлены отказами элементов СЛО и переводящие её в состояние с более низким уровнем работоспособности или более высоким объёмом потерь;

Н–переходы, которые обусловлены достижением установленных пороговых значений объёма накопленных отклонений;

В–переходы, которые обусловлены частичным или полным восстановлением работоспособности СЛО;

К–переходы, которые обусловлены компенсацией накопленных отклонений параметров как элементов, так и в целом СЛО.

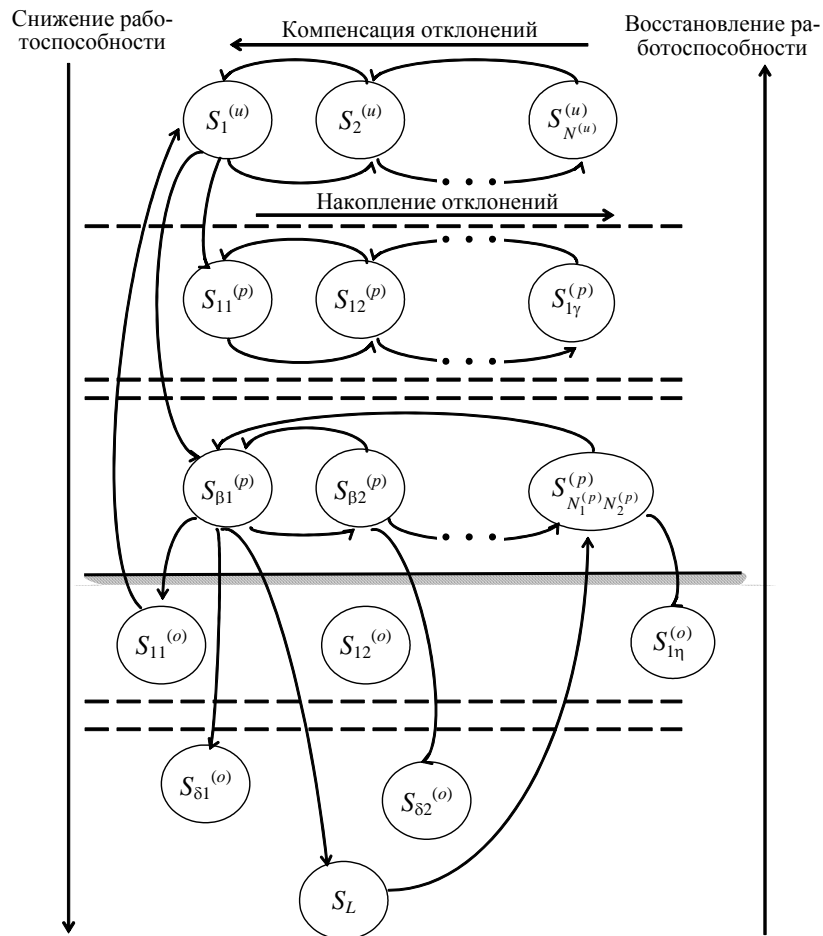


Рисунок 1.1.1 - Граф эволюции работоспособности СЛО

На рисунке 1.1.1 Д–переходы изображены дугами, направленными сверху вниз; Н–переходы – горизонтальными дугами, идущими слева направо; В–переходы – дугами, идущими снизу вверх; К–переходы – дугами, направленными справа налево. Штриховой линией на рисунке 1.1.1 отмечена граница работоспособных и отказовых состояний СЛО. С учётом вышеизложенного динамика работоспособности СЛО предполагает в общем случае одновременную реализацию следующих процессов изменения технического состояния как элементов СЛО, так и в целом данной системы:

- процессы деградации (Д–процессы);
- процессы восстановления (В–процессы);
- процессы накопления отклонений параметров (Н–процессы);
- процессы компенсации накопленных отклонений параметров (К–процессы).

В этом случае одной из целей управления структурной динамикой СЛО является обеспечение в каждый момент времени максимально возможного уровня работоспособности СЛО и её элементов. Эта цель достигается двумя дополняющими друг друга процессами: во-первых, воздействием (управлением) на Д–процесс (деградацию) таким образом, чтобы исключить или уменьшить возможность (вероятность) переходов СЛО в наименее желательные состояния, и, во-вторых, с помощью организации (управления) В–процесса (восстановления) и К–процесса (компенсации). Для реализации указанных процессов как в СЛО, так и в каждом из её элементов (подсистем) формируется контур структурного управления, с помощью которого и осуществляется реализация процессов планирования резервами и реконфигурацией СЛО.

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 *парирования отказов*, но и как *технологию управления, направленную на повышение надежности и живучести функционирования СлО*. Для реализации указанной концепции реконфигурации СлО необходимо разработать такие средства формализации, которые позволили бы на конструктивной основе связывать процессы реконфигурации СлО с процессами её использования на различных этапах жизненного цикла.

Учитывая выше сказанное, концепцию реконфигурации СлО следует рассматривать *в узком смысле* («слепая» реконфигурация) как процесс для обеспечения свойства **отказоустойчивости** системы и *в широком смысле* (структурно-функциональная реконфигурация) – для обеспечения свойства **живучести** системы.

1.2 Морфологический анализ задач реконфигурации СлО

Говоря о возможных классах задач реконфигурации СлО, следует, прежде всего, исходить из так называемого *функционально-структурного подхода* (ФСП) к описанию объектов любой природы (в том числе и СлО) [73,157,109,110,223].

Характерными особенностями ФСП являются:

- учёт диалектической взаимосвязи функций и структуры объектов при определяющей роли функции по отношению к структуре;
- целостный подход к анализу и синтезу многоуровневых систем;
- учёт вещественно-энергетических и информационных связей между элементами системы;
- учёт взаимосвязи исследуемой (создаваемой) системы с внешней средой.

Проведенный анализ задач реконфигурации СлО с учетом ФСП, позволил выявить основные понятия и определения, которые приведены на рисунке 1.2.1. При этом, рассматривая различные комбинации независимых ветвей данного морфологического дерева, можно получить калейдоскопическое множество задач реконфигурации СлО.

Данные системы функционируют в условиях существенной нестационарности и неопределённости, связанной с изменением содержания целей и задач, стоящих перед СЛО, воздействием возмущающих факторов со стороны внешней среды и имеющих целенаправленный и/или нецеленаправленный характер. При этом в реальной жизни возмущающие факторы внешней среды могут носить детерминированный или неизвестный характер, иметь описание с использованием вероятностно-статистических или нечетко-возможностных формализмов [43,206].

В процессе реконфигурации СЛО преследуются следующие основные цели: сохранения, реализации и восстановления целевых и информационно-технологических возможностей системы.

Реализация реконфигурации может осуществляться одновременно по нескольким направлениям. «Вертикальное» направление подразумевает собой реализацию реконфигурации СЛО при воздействии на два дополняющих друг друга процесса: процесс деградации СЛО с целью исключения или уменьшения возможности перехода СЛО в наименее желательные состояния; процесс восстановления с целью частичного или полного достижения работоспособного состояния.

«Горизонтальное» направление – воздействие на процесс накопления отклонений параметров ФЭ (СЛО в целом) и воздействие на процесс компенсации накопленных отклонений.

Кроме того, в качестве наиболее существенных морфологических признаков процесса реконфигурации СЛО могут быть рассмотрены: пространственный, временной, режим распределения ресурсов и формирование управляющих воздействий.

По «пространственному» признаку варианты реконфигурации СЛО можно различать на локальные и глобальные. Локальный вариант реконфигурации СЛО касается отдельных ФЭ, совокупностей ФЭ и/или отдельных подсистем СЛО. В случае глобальной реконфигурации процесс относится в целом ко всему СЛО.

«Временной» классификационный признак тесно связан с состоянием СЛО и обслуживаемых им объектов во время проведения реконфигурации. Статиче-

ская реконфигурация выполняется после приостановки работы СЛО. Основными недостатками данного типа реконфигурации являются:

- требование остановки СЛО, что влечет не только остановку СЛО, но и связанных с ним объектов обслуживания;
- реконфигурация СЛО должна производиться внешними средствами, так как в этих условиях внутренние ресурсы СЛО не могут быть использованы.

Преимуществами динамической реконфигурации, которая выполняется во время работы СЛО, являются возможность сохранения работоспособности объектов обслуживания на время реконфигурации СЛО и возможность использования внутренних ресурсов и резервов СЛО.

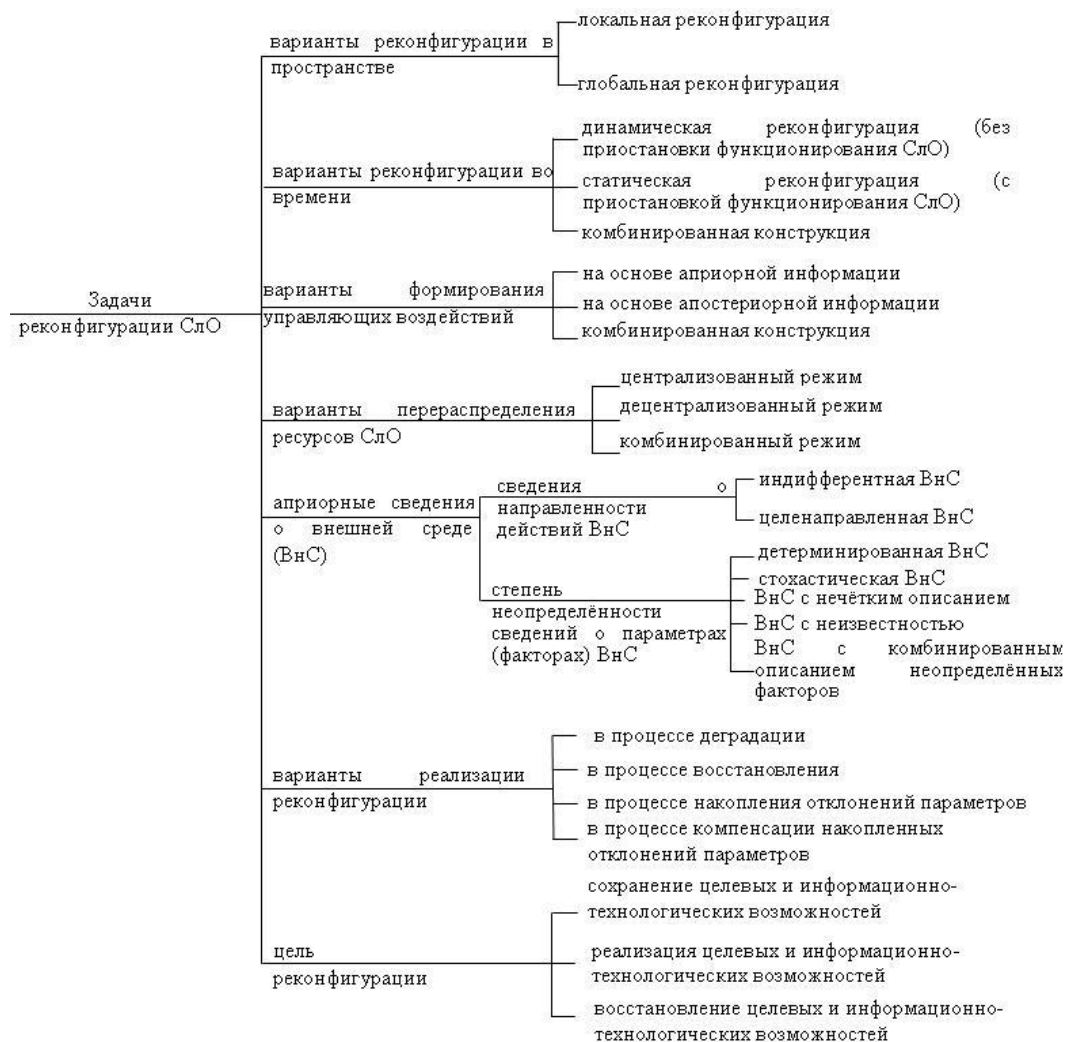


Рисунок 1.2.1 - Классификация задач реконфигурации СЛО

Выработка управляющих воздействий при реконфигурации СЛО может опираться как на априорную, так и апостериорную информацию о поведении отдельных ФЭ и подсистем СЛО.

Что касается вариантов перераспределения ресурсов СЛО в процессе ее реконфигурации, то можно выделить следующие режимы: централизованный, децентрализованный или комбинацию указанных режимов. При централизованном режиме распределение ресурсов осуществляется с использованием единой модели, включающей как начальное состояние СЛО, так и всевозможные (наиболее вероятные) промежуточные состояния, вызванные деструктивными воздействиями. В децентрализованном режиме выбор плана распределения ресурсов для начального состояния СЛО осуществляется таким образом, чтобы последующие перераспределения, вызванные неблагоприятными воздействиями, позволили рационально использовать ресурсы СЛО.

Для реализации указанных направлений реконфигурации СЛО требуется сформировать контур управления структурной динамикой СЛО, который должен включать в себя функцию реконфигурации структур, состоящую из операций: оценки состояния СЛО по данным технического диагностирования, поиска вариантов допустимого многоструктурного состояния СЛО, выбора лучшего варианта перевода СЛО в частично работоспособное или работоспособное состояние, целенаправленного изменения связей (структур) и режимов функционирования элементов (подсистем) СЛО, контроля результатов воздействия на структуру (структуры) СЛО.

Для успешного выполнения указанных операций, необходимо как для каждого отдельного ФЭ СЛО, так и группы элементов, и, наконец, всего СЛО разрабатывать гибкие способы применения, позволяющие в зависимости от складывающейся обстановки оперативно осуществлять перераспределение целей, функций и решаемых задач (алгоритмов) между элементами и подсистемами СЛО.

Причем при реализации гибкого способа применения элементов СЛО перед каждым из них на различных временных интервалах может быть поставлена одна (либо несколько) из следующих задач: приём информационных и/или материаль-

ных потоков от объекта обслуживания, других элементов СлО; передача потоков на объект обслуживания, элементы СлО; хранение полученных потоков; обработка полученных потоков; формирование управляющих воздействий; планирование и управление системой объектов в ходе подготовки и проведения взаимодействия с объектом обслуживания, с другими элементами.

Разработка указанных операций по своему содержанию относится к классу задач структурно-функционального синтеза облика СлО, формирования и реализации соответствующих программ управления их развитием [15,253-255]. Главная трудность и особенность решения задач рассматриваемого класса состоит в следующем. Определение оптимальных программ управления основными элементами и подсистемами СлО может быть выполнено лишь после того, как будет известен перечень функций и алгоритмов обработки информации и управления, который должен быть реализован в указанных элементах и подсистемах. В свою очередь, распределение функций и алгоритмов по элементам и подсистемам СлО зависит от структуры и параметров законов управления данными элементами и подсистемами. Складывающаяся ситуация тесно связана с принципом двойственности прошлого и будущего – *можно обладать знанием о прошлом, но нельзя управлять им, и можно проектировать будущее, не зная его.*

Трудность разрешения данной противоречивой ситуации усугубляется ещё и тем, что под действием различных причин (внутренних либо внешних, объективных либо субъективных) изменяется состав и структура СлО. Дополнительные трудности при исследовании задач рассматриваемого класса связаны, как правило, с большой размерностью и нелинейностью моделей, описывающих задачи синтеза, а также с необходимостью учета в данных моделях факторов неопределенности, имеющих как стохастическую, так и не стохастическую природу («природная», поведенческая, целевая неопределенность).

В заключение следует отметить еще несколько важных сторон управления отказа- и катастрофоустойчивыми информационными системами и сетями (ИСС), которые следует учитывать при их моделировании.

Во-первых, угрозы, приводящие к отказам и катастрофам, могут носить не только природный и техногенный характер, но и быть целенаправленной деятельностью человека, целью которого является нарушение одного из трех основных аспектов защиты информации: конфиденциальности, целостности и доступности. Таким образом, целесообразно вопросы защиты информации рассматривать в общем контексте задач, связанных со структурно-функциональным синтезом отказо- и катастрофоустойчивых информационных систем.

В данном контексте информационная система противостоит злоумышленным атакам. Суть атак заключается в несанкционированном прекращении предоставления атакуемой вычислительной системой той или иной электронной услуги или информации. То есть, успешную реализацию таких атак можно приравнять к программному или аппаратному сбою.

С одной стороны, для отказо- и катастрофоустойчивой информационной системы должна быть уже предусмотрена последовательность действий в подобной ситуации.

С другой стороны, в зависимости от технологии изучения информационной системы, применяемой злоумышленником, процедура поиска уязвимых элементов занимает большее или меньшее время, но в любом случае, процесс не является мгновенным. Перед непосредственным проведением атаки происходит изучение информационной системы («сканирование») с целью выявления целей атаки — вычислительных систем, во-первых, обрабатывающих значимую информацию, во-вторых, имеющих уязвимости, необходимые для успешной реализации атаки.

Следовательно, можно организовать работу информационной системы в таком режиме, что ее структурная динамика будет происходить принудительно, даже без выхода из строя тех или иных элементов. При рассмотренном режиме функционирования изучение информационной системы СЛО стороны злоумышленника зачастую теряет смысл, так как элементы, отмеченные как уязвимые или обрабатывающие интересующую информацию на начальном этапе «сканирования» перестанут быть таковыми к моменту завершения «сканирования» информационной системы. В итоге, вероятность (возможность) успешной реализации атак

нарушения целостности и конфиденциальности существенно сокращается. В результате, единственно возможным способом повышения уровня защищенности ИСС является «интеллектуальное» поведение (Distributed Intelligence, Business Intelligence, Web Intelligence, «интеллектуальная сеть» и др. [94]) объекта защиты и его способность к восстановлению после атак и сбоев.

Интеллектуальную ИСС в целом можно представить как «виртуальное приложение», способное перераспределять компоненты и перемещаться между узлами ИСС, сохраняя при этом свою функциональность.

Еще одна особенность современных ИСС связана с технологией виртуализации. Одной из возможных причин появления структурной динамики в современных ИСС является широкое использование в данных системах мобильных информационных технологий (МИТ) и средств их реализующих [137,254,255]. Анализ основных тенденций развития современных ИСС, на основе которых создаются и развиваются в настоящее время различные виды **виртуальных предприятий** (ВиП) показывает, что данные системы имеют ряд особенностей, среди которых, прежде всего, следует выделить [75,76]: многоцелевой характер функционирования современных ИСС ВиП, структурное подобие, избыточность основных элементов и подсистем ИСС ВиП и связей между ними, многовариантность реализации функций управления на каждом из уровней ИСС ВиП, использование гибких технологий, наличие унифицированных технических комплексов, входящих в состав технического обеспечения ИСС ВиП, основу которого составляет пространственно распределённая неоднородная вычислительная сеть с перестраиваемой структурой.

Под **виртуальным предприятием** понимается [76] динамическая открытая бизнес-система, основанная на формировании юридически независимыми предприятиями единого информационного пространства с целью совместного использования своих технологических ресурсов для реализации всех этапов работ по выполнению проекта (заказа клиента) от источников первичного сырья до сдачи продукции конечному потребителю.

Виртуальное предприятия основано на формирование единой организационно-технологической и информационной среды за счет временного объединения ресурсов различных предприятий, в которой могли бы оперативно формироваться **адаптивные цепи поставок** (Adaptive Supply Chain Management) под конкретный заказ клиента на основе гибкого привлечения ресурсов различных предприятий.

Анализ показывает, что процесс функционирования современных ИСС ВиП характеризуется высокой интенсивностью изменения как условий выполнения целевых задач и бизнес-процессов (БП) ВиП, так и содержанием задач, связанных с реализацией соответствующих информационных процессов. Это связано, прежде всего, с тем, что при функционировании ИСС ВиП [254,255]:

- могут появиться новые клиенты и соответствующие заказы на производство конкретной продукции (товаров и/или услуг) и, соответственно, возникает необходимость в проведении новых операций информационного обмена и взаимодействия;
- могут изменяться ранее поставленные перед ВиП и ИСС ВиП цели, состав и структура запланированных ранее бизнес и информационно-технологические операций, сроки и условия их выполнения;
- из-за возмущающих воздействий внешней среды может нарушаться плановая работа как ИСС, так и ВиП, изменяться расход ресурсов на проведение информационно-технологических операций, в ходе реализации соответствующих бизнес-процессов.

Для того, чтобы в указанных условиях ИСС ВиП успешно выполняла все поставленные задачи, необходимо для каждой ИСС разрабатывать гибкие способы их применения, позволяющие в зависимости от складывающейся обстановки оперативно осуществлять перераспределение целей, функций и решаемых задач (алгоритмов) между элементами, подсистемами, уровнями ИСС ВиП. К таким задачам можно в первую очередь отнести: задачи приёма, передачи, хранения, обработки информации, формирования, планирования и управления как ВиП в целом, так и ее ИСС.

1.3 Анализ современных подходов к планированию реконфигурации СЛО

1.3.1 «Слепая» реконфигурация СЛО

В качестве наиболее характерных примеров сложных объектов с динамически изменяемой структурой можно привести:

- системы управления функционированием различных классов транспортных систем (наземных, воздушных, морских, космических и т.п.);
- территориально-распределённые неоднородные информационно-вычислительные сети, компоненты которых – локальные вычислительные сети;
- гибкие автоматизированные и автоматические производства различных типов продукции;
- современные информационные системы виртуальных предприятий, адаптивные цепи поставок в логистике;
- различные многоагентные (мультиагентные) системы.

Проведенный анализ существующих и проектируемых СЛО большого класса систем в ответственных приложениях (ракетно-космическая, авиационная, корабельная техника, сложные системы электроснабжения, радиоэлектронные и автоматизированные системы и комплексы различного назначения и ведомственной принадлежности и т.п.) с динамически изменяемой структурой позволяют рассмотреть существующих в настоящее время несколько теоретических подходов к решению задач полимодельного многокритериального структурно-функционального синтеза облика СЛО. Среди данных подходов можно выделить следующие существующие варианты «слепой» реконфигурации [23-30,34,87,91,92,238-243,293].

Вариант I. Наиболее простым вариантом «слепой» реконфигурации СЛО, позволяющим осуществить реконфигурацию СЛО в процессе оперативного планирования, можно считать процедуру, предложенную в работах [91,92].

СЛО состоит из множества $A = \{A_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ ФЭ, представляющих собой многофункциональные унифицированные (однородные) вычислительные средства.

Пусть данная система осуществляет решение известного множества функций (задач) $B = \{B_j, j = 1, 2, \dots, m\}$. Каждая задача B_j характеризуется следующими параметрами: Π_j - приоритет решения задачи, $f_{j\text{нн}}$ - номинальная частота решения задачи, $f_{j\text{мин}}$ - минимально допустимая частота решения задачи (задачу еще имеет смысл решать), T_j - продолжительность решения задачи. Множество решаемых задач $B = \{B_j, j = 1, 2, \dots, m\}$ с учетом характеристик $\Pi_j, f_{j\text{нн}}, f_{j\text{мин}}, T_j$ разбивается на n групп $B = \bigcup_{i=1}^n B^i$, причем в каждой B^i группе объединяются задачи с близкими (одинаковыми) характеристиками. Каждая группа задач решается на одном $A_i \in A$ ФЭ.

При отказе A_i ФЭ все задачи передаются на A_n ФЭ, где решаются задачи с наиболее низкими приоритетами. Если не удастся решить на A_n ФЭ задачи B^i и B^n групп даже с минимально допустимой частотой, то задачи B^n группы снимаются с решения, а ФЭ перенумеруются в соответствии с приоритетами решаемых на них задач. При отказе A_n ФЭ задачи B^n группы снимаются с решения. При следующем отказе ФЭ цикл перераспределения задач повторяется с размещением группы задач на A_{n-1} ФЭ.

Для реализации предложенной процедуры реконфигурации решаемых задач в реальных условиях целесообразно на предварительном этапе (этапе проектирования и создания) проводить имитационное моделирование нештатных ситуаций, связанных с отказами и сбоями ФЭ СЛО, исследование возможных сценариев развития событий с учетом изменения перечня задач, уровней приоритета, степени дублирования ФЭ и т.п. Данные исследований позволят детерминировать реконфигурацию решаемых задач путем построения специальных матриц отказов и переключений ФЭ СЛО.

Вариант II. Более сложная процедура «слепой» реконфигурации представлена в работах [34,238,241,243]. Обобщая предложенный подход [34,238,241,243], на концептуальном уровне данный вариант реконфигурации можно сформулировать следующим образом.

В отличие от рассмотренного варианта I в данном случае ФЭ $A_i \in A$ взаимодействуют посредством некоторой телекоммуникационной подсистемы. Каждый ФЭ A_i 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. Возможно наличие в СЛО общих ресурсов (внешняя память, базы данных, периферийные устройства и др.).

Пусть данная система осуществляет решение известного множества функций (задач) $B = \{B_j, j = 1, 2, \dots, m\}$ с заданными требованиями к порядку их выполнения и взаимосвязи согласно выполняемому заданию. При этом пусть каждый из ФЭ способен полностью выполнять одну (специализированный ФЭ) или несколько функций (универсальный ФЭ) из множества функций B , возложенных на систему.

Для каждой функции B_j ставится в соответствие некоторое множество алгоритмов ее выполнения $D^j = \{D_k^j, k = 1, 2, \dots, m_j\}$, где m_j - количество полных или упрощенных алгоритмов выполнения функции B_j .

Для каждой функции процедура упрощения алгоритма её выполнения имеет свой конкретный физический смысл: в одном случае это снижение точности решения задачи, в другом - уменьшение количества обрабатываемых параметров, трудоемкости вычислений и т.д. Причем каждому множеству D^j соответствует множество $K^j = \{K_k^j, k = 1, 2, \dots, m_j\}$, элементы которого характеризуют качество выполнения задачи B_j алгоритмом $D_k^j, k = 1, 2, \dots, m_j$. В процессе выполнения

функции B_j на ФЭ A_i с использованием алгоритма D_k^j известны время решения задачи t_{ijk} и объем требуемой памяти V_{ijk} .

Следует отметить, что в процессе функционирования СЛО осуществляется обмен информацией между ФЭ, необходимой для выполнения задач тем или иным алгоритмом. Известен объем информации W_k^j , получаемый в результате решения задачи B_j алгоритмом D_k^j , которая необходима для решения следующих за ней задач, а также скорость передачи данных $\omega_{i_1 i_2}$ по информационному каналу между любыми двумя ФЭ A_{i_1} и A_{i_2} .

Логическую взаимосвязь между задачами может быть представлена матрицей $\varepsilon = \|\varepsilon_{j_1 j_2 k}\|$, каждый элемент которой принимает значения

$$\varepsilon_{j_1 j_2 k} = \begin{cases} W_{j_1 j_2 k}, & \text{если данный объем информации передается после решения} \\ & \text{задачи } B_{j_1} \text{ алгоритмом } D_k^{j_1} \text{ задаче } B_{j_2}; \\ 0, & \text{если задачи } B_{j_1} \text{ и } B_{j_2} \text{ логически не связаны.} \end{cases}$$

Функционирование СЛО в каждом состоянии S_v определяется набором отказавших и работоспособных (частично работоспособных) ФЭ. Отказавшим будем считать ФЭ, который не способен выполнять задачи B_j , $j=1, \dots, m$ задания любым из имеющихся алгоритмов D_k^j , $k=1, 2, \dots, m_j$. Тогда каждое состояние S_v будем характеризовать потенциалом доступности $\theta^v = \|\theta_{ijk}^v\|$. Матрица $\theta^v = \|\theta_{ijk}^v\|$ является булевой матрицей, каждый элемент которой принимает значения

$$\theta_{ijk}^v = \begin{cases} 1, & \text{если в состоянии } S_v \text{ задача потенциально может выполняться} \\ & \text{на } A_i \text{ ФЭ алгоритмом } D_k^j; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда A_i ФЭ считается отказавшим в состоянии S_v , если $\bigvee_{j=1}^m \bigvee_{k=1}^{m_j} \theta_{ijk}^v = 0$.

Очевидно, что значения частных показателей $F_h(S_v)$, $h=1, 2, \dots, H$ качества функционирования СЛО в каждом состоянии S_v зависят как от множества отка-

завших ФЭ, множества задач, выполняемых на исправных ФЭ, так и перераспределения задач, алгоритмов и информационных потоков между неотказавшими ФЭ в состоянии S_v .

Введем две группы переменных, характеризующих процесс распределения задач и алгоритмов, а также информационных потоков между ФЭ.

Под распределением задач и алгоритмов, понимается назначение каждой задачи из множества $B = \{B_j, j = 1, 2, \dots, m\}$ на тот или иной ФЭ $A_i \in A$ для ее выполнения одним из алгоритмов $D_k^j, k = 1, 2, \dots, m_j$. План распределения задач в состоянии S_v может быть представлен матрицей $x^{(v,1)} = \|x_{ijk}^{(v,1)}\|$.

Матрица распределения задач $x^{(v,1)} = \|x_{ijk}^{(v,1)}\|$ является булевой матрицей, элементы которой принимают значения

$$x_{ijk}^{(v,1)} = \begin{cases} 1, \text{ если в состоянии } S_v, B_j \text{ задача назначается для выполнения} \\ \text{на } A_i \text{ ФЭ алгоритмом } D_k^j; \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Процесс информационного обмена между ФЭ в состоянии S_v характеризуется матрицей $x^{(v,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(v,2)}\|$, элементы которой принимают следующие значения

$$x_{i_1 i_2 jk}^{(v,2)} = \begin{cases} 1, \text{ если в состоянии } S_v, \text{ осуществляется передача результатов решения задачи } B_j \\ \text{алгоритмом } D_k^j \text{ с } A_{i_1} \text{ ФЭ на } A_{i_2} \text{ ФЭ;} \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда вариант реконфигурации СЛО, **обобщающий** предложенные подходы в работах [34,238,241,243], можно представить следующим образом.

Для начального состояния S_0 осуществляется построение плана распределения задач и потоков $x^{(0,1)} = \|x_{ijk}^{(0,1)}\|$, $x^{(0,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(0,2)}\|$ с учетом технологических ограничений, задаваемых $\varepsilon = \|\varepsilon_{j_1 j_2 k}\|$, и потенциала доступности $\theta^0 = \|\theta_{ijk}^0\|$ начального состояния СЛО. Закрепленные этим планом за ФЭ задачи будем согласно [238,241,243] называть *собственными*. В случае перехода СЛО (вызванного отка-

зом некоторой совокупности ФЭ) в состоянии $S_\nu, \nu > 0$ рассматриваются две стратегии.

Стратегия 1 (коррекция планов) - собственные задачи и связанные с ними информационные потоки отказавших ФЭ перераспределяются между работоспособными ФЭ, с сохранением за ними выполнения своих *собственных* задач. Множество *собственных* задач, требующих перераспределения в состоянии S_ν , формируется с использованием потенциала доступности $\theta^v = \|\theta_{ijk}^v\|$ и начальных планов распределения $x^{(0,1)} = \|x_{ijk}^{(0,1)}\|$, $x^{(0,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(0,2)}\|$.

Стратегия 2 (перепланирование) - в состоянии S_ν осуществляется перераспределение всех решаемых в СЛО задач.

Планы перераспределения таких задач и потоков информации обозначим $x^{(v,1)} = \|x_{ijk}^{(v,1)}\|$, $x^{(v,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(v,2)}\|$. Формирование начальных планов распределения $x^{(0,1)} = \|x_{ijk}^{(0,1)}\|$, $x^{(0,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(0,2)}\|$ и планов перераспределения $x^{(v,1)} = \|x_{ijk}^{(v,1)}\|$, $x^{(v,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(v,2)}\|$ осуществляется путем решения, в общем случае, задач многокритериального выбора с векторным показателем $F(S_\nu) = (F_1(S_\nu), F_2(S_\nu), \dots, F_H(S_\nu))$ качества функционирования СЛО и учетом технологических, технических, стоимостных, временных, ресурсных и т.п. ограничений, накладываемых на булевы переменные $x^{(v,1)} = \|x_{ijk}^{(v,1)}\|$, $x^{(v,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(v,2)}\|$.

Следует отметить, что при построении $x^{(v,1)} = \|x_{ijk}^{(v,1)}\|$, $x^{(v,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(v,2)}\|$ для каждого состояния $S_\nu \in S$ относительно задач, возложенных на СЛО, определяется:

- множество задач, которые сохраняются в системе без изменений;
- множество задач, которые отбрасываются;
- множество задач, алгоритмы выполнения которых упрощаются.

Формирование совокупности планов $x^{(v,1)} = \|x_{ijk}^{(v,1)}\|$, $x^{(v,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(v,2)}\|$ для всех состояний $S_\nu \in S$ можно рассматривать как процесс определения стратегии *«слепой» реконфигурации*. Обеспечение свойства отказоустойчивости СЛО осуществ-

ляется путем итогового размещения задач $Z = \|z_{ijk}\|$ по правилу $z_{ijk} = \bigvee_{v=0}^l x_{ijk}^{(v,1)}$, которое приводит к размещению в различных ФЭ резервных копий алгоритмов решаемых задач. При переходе СЛО в состояние $S_\nu \in S$ режим ее функционирования должен быть изменен в соответствии с планом $x^{(\nu,1)} = \|x_{ijk}^{(\nu,1)}\|$, $x^{(\nu,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(\nu,2)}\|$ для этого состояния, что предполагает активизацию резервных копий алгоритмов решаемых задач в работоспособных ФЭ.

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 $S = \{S_\nu, \nu = 1, 2, \dots, l\}$, 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 S_0 не менее заданной величины. При указанных предпосылках целесообразно задачу реконфигурации СЛО в условиях действия случайных возмущений представлять с использованием подходов, базирующихся на идеях двухэтапного или многоэтапного стохастического программирования [118,157,263]. Другими словами, построение начальных планов распределения $x^{(0,1)} = \|x_{ijk}^{(0,1)}\|$, $x^{(0,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(0,2)}\|$ и планов перераспределения $x^{(\nu,1)} = \|x_{ijk}^{(\nu,1)}\|$, $x^{(\nu,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(\nu,2)}\|$ задач и потоков информации осуществляется совместно, т.е. осуществляется выбор начальных планов распределения $x^{(0,1)} = \|x_{ijk}^{(0,1)}\|$, $x^{(0,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(0,2)}\|$ таким образом, чтобы последующие перераспределения $x^{(\nu,1)} = \|x_{ijk}^{(\nu,1)}\|$, $x^{(\nu,2)} = \|x_{i_1 i_2 jk}^{(\nu,2)}\|$ позволили рационально использовать ресурсы СЛО, необходимые для компенсации неблагоприятных воздействий [118,157,263].

1.3.2 Анализ особенностей вариантов «слепой» реконфигурации СЛО

Рассмотрим ряд специфических особенностей, свойственных задачам «слепой» реконфигурации СЛО (вариант I, II, III).

Во-первых, во всех предлагаемых вариантах «слепой» реконфигурации СЛО процесс формирования промежуточных состояний $S = \{S_\nu, \nu = 1, 2, \dots, l\}$ с единой общесистемной точки зрения практически не рассматривался. На наш взгляд особое внимание следует уделить выявлению и многокритериальному анализу критичности отказов ФЭ и их влиянию на работоспособность СЛО. Проблема выявления критичных ФЭ особенно актуальна при анализе безопасности, надежности и живучести СЛО в условиях ограниченных ресурсов. Поскольку современные структурно-сложные системы содержат большое количество элементов, то в условиях жестко ограниченных ресурсов обеспечить требуемую надежность путем улучшения качества одновременно всех элементов не представляется возможным. Однако разные элементы играют при функционировании СЛО далеко не одинаковую роль и отказы разных компонентов могут приводить к разным последствиям как по степени влияния на состояние системы, так и по воздействию на внешнюю по отношению к СЛО среду.

Второй существенной причиной, обуславливающей актуальность проблемы выявления критичных элементов, является сложность интерпретации абсолютных оценок надежности систем в условиях, когда они состоят из большого числа высоконадежных ФЭ со сложными функциональными взаимосвязями. В этом случае сами по себе числовые значения показателей надежности и живучести не всегда позволяют провести сравнительный анализ различных вариантов построения СЛО, и требуется привлечение дополнительной информации. Не случайно в теории надежности сложных систем в последнее время все большее распространение получают методы, учитывающие не только числовые значения показателей надежности ФЭ, но качественные оценки влияния отказа элемента на функционирование СЛО.

Выявление критичных элементов позволяет сосредоточить усилия на совершенствовании узлов, играющих в обеспечении надежности, безопасности и живучести СЛО наиболее важную (ключевую) роль.

Во-вторых, известная проблема «проклятия размерности», сформулированная Р. Беллманом, особенно явно проявляется при работе со сложными системами. Так задача реконфигурации СЛО представляет собой многокритериальную задачу выбора с учетом технологических, временных, ресурсных и других ограничений. Рассматриваемые постановки задачи реконфигурации СЛО (варианты I, II, III) характеризуется большой размерностью. В качестве примера в таблице 1.3.1 приведены данные, позволяющие оценить как меняется количество искомым булевых переменных $x^{(v,1)} = \|x_{ijk}^{(v,1)}\|$ при изменении числа ФЭ (n), решаемых задач (m) и алгоритмов решения задач (m_j).

Таблица 1.3.1 – Размерность задач

n	m	m_j	Число переменных
10	30	1	$\approx 3 \cdot 10^5$
10	30	3	$\approx 10^6$
10	50	2	$\approx 10^6$
50	30	2	$\approx 3 \cdot 10^{18}$
50	50	2	$\approx 5 \cdot 10^{18}$
100	30	2	$\approx 3 \cdot 10^{33}$
100	50	2	$\approx 5 \cdot 10^{33}$

Как видно из таблицы 1.3.1 рост размерности в основном связан с числом ФЭ СЛО и мощностью множества состояний $S = \{S_\nu, \nu = 1, 2, \dots, l\}$, в которых может находиться система. Задача формирования планов перераспределения функций между ФЭ относится к NP-трудным задачам теории расписаний, для которых в настоящее время не найдены эффективные методы точного решения.

Как следует из современного состояния теории и практики решения задач целочисленного программирования, решение рассматриваемой задачи представляет большие вычислительные трудности, что подтверждают следующие таблицы 1.3.2 и 1.3.3, заимствованные из [57,181].

Таблица 1.3.2 - Максимальная размерность задач, решаемых в указанные сроки

Сложность	Время решения					
	1 сек	10^2 мкс $\approx 1.7 \cdot 10^8$	10^4 мкс $\approx 2.7 \cdot 10^7$	10^6 мкс $\approx 12 \cdot 10^6$	10^8 мкс $\approx 3 \cdot 10^5$	10^{10} мкс $\approx 3 \cdot 10^4$
$1000n$	10^3	10^5	10^7	10^9	10^{11}	10^{13}
$1000n \log n$	10^2	10^3	10^5	10^7	10^9	10^{11}
$100n^2$	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
$10n^3$	46	$2 \cdot 10^2$	10^3	$4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	10^5
$n^{\log n}$	22	36	54	79	112	156
2^n	19	26	33	39	46	53
3^n	12	16	20	25	29	33

Таблица 1.3.3 - Влияние производительности ПЭВМ на размерность разрешимой задачи

Сложность	Производительность ПЭВМ		
	Современные ПЭВМ	ПЭВМ в 100 раз быстрее	ПЭВМ в 1000 раз быстрее
n	N_1	$100N_1$	$1000N_1$
n^2	N_2	$10N_2$	$31.6N_2$
n^3	N_3	$4.64N_3$	$10N_3$
n^5	N_4	$2.5N_4$	$4N_4$
2^n	N_5	$N_5 + 6.64$	$N_5 + 10$
3^n	N_6	$N_6 + 4.19$	$N_6 + 6.3$

Для выхода из создавшихся трудностей, возникающих при точном или приближённом решении задач дискретной оптимизации такого класса, необходимо отказаться от традиционных подходов к постановке и решению данных задач, ослаблению требований, связанных с необходимостью поиска точного оптимального решения. Для преодоления сложности и размерности при исследовании СЛО следует применять формальные и неформальные методы декомпозиции и агрегирования, имеющие между собой глубокие связи.

В-третьих, предлагаемые варианты «слепой» реконфигурации СЛО не учитывают следующие операции:

- учёт и анализ текущих характеристик решаемых в СЛО задач и выполняемых функций;
- анализ и оценивание текущего состояния СЛО в целом;
- оперативный расчёт, оценивание и анализ целевых и информационно-технических возможностей СЛО для обоснованного перераспределения функций СЛО между её работоспособными ФЭ и подсистемами.

И, *наконец*, дополнительная особенность задачи реконфигурации СЛО состоит в ее многокритериальной постановке, а также в наличии условий принципиально неустранимых информационных и временных ограничений, связанных с неполнотой, неопределенностью, неточностью и противоречивостью как исходной данных, так и той информации, которая поступает (формируется) в ходе функционирования рассматриваемых объектов.

В качестве промежуточных выводов можно отметить следующие положения:

- 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 надежности и живучести функционирования СЛО;
- для реализации указанной концепции реконфигурации СЛО необходимо разработать такие средства формализации, которые позволили бы на конструктивной основе связывать процессы реконфигурации СЛО с процессами её использования на различных этапах жизненного цикла.

1.4 Содержательное и теоретико-множественное описание проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО

Анализ известных подходов [1,27,28,34,87,91,92,162,168,171,238,241,243] к решению проблемы повышения надежности и живучести функционирования СЛО

в динамически изменяющихся условиях показывает, что наиболее действенной формой защиты систем в этих условиях является активная защита, которая реализует технологию реконфигурации СЛО.

В диссертационной работе под *динамически изменяющимися условиями* будем понимать условия, формируемые внешней средой, которая под действием объективных (субъективных), внутренних (внешних) причин, постоянно оказывает возмущающие воздействия на СЛО.

Реконфигурация СЛО, с одной стороны, направлена на изменение топологии системы, характеристик работоспособности ее технической подсистемы для ликвидации последствий различных деструктивных воздействий, с другой стороны, предполагает гибкое перераспределение выполняемых системой целей, задач и функций между неотказавшими компонентами при учете допустимости функционирования СЛО с ухудшенными в заданных пределах показателями качества.

Свойство живучести СЛО характеризуется соответствующей системой показателей. В частности, может быть предложен следующий перечень основных показателей качества функционирования СЛО [18,21,37,38,60,61,137]:

- показатели доступности СЛО (суммарное время простоев СЛО по любым причинам);
- показатели, оценивающие риски возникновения и развития аварий и катастроф;
- показатели, оценивающие последствия аварий и катастроф для конкретных технологических процессов (продолжительность, масштаб и объем ущерба);
- показатели, оценивающие общие затраты времени и полноту выполненных операций, связанных с восстановлением работоспособности СЛО;
- показатели, оценивающие, капитальные и эксплуатационные затраты на обеспечение требуемого уровня живучести, затраты других видов ресурсов;
- показатели, оценивающие, степень критичности ФЭ и операций, выполняемых в СЛО, значимость ресурсов и информации, используемой для обеспечения требуемого уровня живучести.

В целом, повышение надежности и живучести СЛО требует не только сохранности критически важных данных, но и обеспечения непрерывного (или прерываемого на некоторое время) функционирования СЛО, а в случае невозможности реализации такого режима, в рамках СЛО должно быть обеспечено в максимально короткие сроки восстановление ее работоспособности.

На основании вышеизложенного, свойство живучести СЛО формируется на основе целеустремленной организационно-технической, модельно-алгоритмической, информационно-правовой и другой деятельности людей, направленной на непрерывное сохранение, реализацию и восстановление присущих (заложенных на этапе проектирования) СЛО возможностей в условиях массового (возможно, целенаправленного) уничтожения ее компонентов в результате различных катаклизмов как природно-техногенного характера, так и инспирированных человеком.

Согласно проведенному анализу, в условиях неблагоприятных воздействий, которые могут приводить к отказу ФЭ, СЛО может находиться в одном из своих состояний $S = \{S_\nu, \nu = 1, 2, \dots, l\}$.

Под *состоянием* системы будем понимать некоторую совокупность характеристик, отражающих с определённой точки зрения в каждый рассматриваемый момент времени наиболее существенные стороны функционирования системы. Будем *предполагать*, что смена состояний вызвана отказами ФЭ СЛО.

Тогда качество функционирования системы в состоянии S_ν характеризуется векторным показателем $F(S_\nu) = (F_1(S_\nu), F_2(S_\nu), \dots, F_H(S_\nu))$, где $F_h(S_\nu)$, $h \in \hat{H} = \{1, 2, \dots, H\}$ - частные показатели качества функционирования СЛО. Они отражают как *структурно-топологические* характеристики системы (структурная надежность, структурная живучесть, структурно-топологические свойства и т.д.) $F_h(S_\nu)$, $h \in \hat{H}^{str} \subseteq \hat{H}$, так и ее *структурно-функциональные* характеристики (функциональная устойчивость, производительность, расходуемые ресурсы, выходной эффект и др.) $F_h(S_\nu)$, $h \in \hat{H}^{fun} \subseteq \hat{H}$, причем $\hat{H}^{str} \cup \hat{H}^{fun} = \hat{H}$.

Взаимоотношения **структурно-топологических** и **структурно-функциональных** характеристик СЛО в процессе её реконфигурации характеризуются не только единством, но и противоречиями между ними. При этом разрешение указанных противоречий может осуществляться различными альтернативными путями – от полного отказа от старой структуры (структур), переставшей соответствовать новому содержанию (новым функциям), до использования старой структуры (структур), несмотря на существенно изменившиеся функции. Управление структурной динамикой системы в этом случае предназначено для целенаправленного формирования рациональной последовательности действий, которая должна обеспечить наилучшее разрешение (с точки зрения лица, принимающего решение (ЛПР)) диалектического противоречия между функциями и соответствующими структурами на каждом из этапов жизненного цикла системы [137].

При этом на этапе планирования СЛО должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества функций и структур, а также, возможно, внесён такой уровень избыточности в указанные множества, при которых на этапе применения СЛО по целевому назначению имелась бы возможность гибко реагировать на все расчётные и нерасчётные нештатные ситуации, вызывающие реконфигурацию её структур.

Функционирование СЛО в каждом состоянии S_ν определяется набором отказавших и работоспособных (частично работоспособных) ФЭ. *Отказавшим (неработоспособным)* будем считать ФЭ СЛО, который не способен выполнить операции сохранения, приема, передачи, обработки, защиты информационных и/или материальных потоков. ФЭ будет считаться *частично работоспособным* при возможности выполнения им хотя бы одной из перечисленных операций.

Кроме этого, на множестве состояний СЛО введем понятие *области её работоспособности*. Под *областью работоспособности* СЛО [34,238,241,243] будем понимать подмножество $S_R \subseteq S = \{S_\nu, \nu = 1, 2, \dots, l\}$ таких состояний, для каждого из которых $S_\nu \in S_R$ значения всех частных показателей $F_h(S_\nu)$, $h = 1, 2, \dots, H$ находятся в пределах заданных требований к функционированию системы

$F_h(S_\nu) \in F_h^{\text{треб}}$. Тогда состояние $S_\nu \in S$ СЛО будет работоспособным, если $S_\nu \in S_R$, и неработоспособным, когда $S_\nu \notin S_R$.

Отказом СЛО является событие, состоящее в выходе соответствующих параметров СЛО за пределы *области работоспособности*. А *критерием отказа* системы является выход хотя бы одного из частных показателей качества $F_h(S_\nu)$, $h=1,2,\dots,H$ за пределы требуемых значений $F_h^{\text{треб}}$, $h=1,2,\dots,H$. Формально отказ системы может быть описан как событие $\{F_1(S_\nu) \notin F_1^{\text{треб}}\} \vee \{F_2(S_\nu) \notin F_2^{\text{треб}}\} \vee \dots \vee \{F_H(S_\nu) \notin F_H^{\text{треб}}\}$.

Очевидно, что значения частных показателей $F_h(S_\nu)$, $h=1,2,\dots,H$ качества функционирования СЛО в каждом состоянии S_ν зависят от:

- множества отказавших, работоспособных, частично работоспособных ФЭ;
- распределения операций обработки, сохранения, приема-передачи информационных и/или материальных потоков;
- перераспределения этих операций между работоспособными или частично работоспособными ФЭ в состоянии S_ν .

Согласно результатам проведенного анализа (см. подразделы 1.1-1.3) при создании перспективных СЛО целесообразно осуществить переход от узкой (традиционной) интерпретации процессов реконфигурации рассматриваемых систем к их широкой интерпретации в рамках развиваемой новой прикладной теории управления структурной динамикой СЛО [137]. Далее процесс реконфигурации (в широком смысле) в отличие от «слепой» *реконфигурации* будем называть **структурно-функциональной реконфигурацией** СЛО.

На основании результатов проведенного системного анализа, на *содержательном уровне* суть решаемой проблемы 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 простран-

ственно-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 могоструктурное состояние СЛО, характеризующее состояние основных элементов подсистем и структур СЛО и отношений между ними.

Для формализации проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, прежде всего, дадим ее обобщенное теоретико-множественное описание, которое с формальной точки зрения может быть представлено следующей математической структурой выбора:

$$\left(\left\{ G(\omega, t) \right\}_{t \in T = (t_0, t_f]}, \Delta_{G\beta}(\omega), \{F_h\}_{h \in H}, \{\Phi^k\}_{k \in \Gamma}, (\Omega = \{\omega\}, \mathfrak{F}, P) \right).$$

Здесь $G(\omega, t) = \langle X(\omega, t), E(\omega, t), W(\omega, t) \rangle, t \in T = (t_0, t_f], \omega \in \Omega$ представляет собой динамический взвешенный гипермультиграф макросостояний СЛО, отражающий структурную динамику СЛО в условиях неопределенности, где $t \in T = (t_0, t_f]$ – множество моментов времени, $\omega \in \Omega$ – пространство элементарных событий (множество неопределённости), \mathfrak{F} – σ -алгебра событий на Ω , P – вероятностная или нечеткая мера, заданная на (Ω, \mathfrak{F}) .

$X(\omega, t) = \{\bar{x}_{i\rho}(\omega, t), i \in N, \rho \in P\}$ – множество векторов, характеризующих состояния потоков, связанных с ФЭ СЛО, где i номер ФЭ, ρ тип потока. В качестве таких потоков могут быть потоки операций, выполняемых ФЭ. В свою очередь потоки операций взаимодействуют с потоками ресурсов (информационных, энер-

гетических, вещественных), подключаемых для выполнения этих операций. При этом в каждом потоке могут быть выделены несколько уровней. Например, уровни операций: уровень операций, находящихся в состоянии ожидания; уровень операций, находящихся в состоянии выполнения; уровень операций, находящихся в состоянии проверки результатов выполнения. Компонентами вектора $\vec{x}_{i\rho}(\omega, t)$ являются величины, отражающие состояния этих уровней, и с каждой такой компонентой свяжем вершину гипермультиграфа $G(\omega, t)$. Другими словами, уровень потока это некий резервуар, в который поток втекает и вытекает по некоторым каналам $E(\omega, t) = \{e_{\rho k}(\omega, t), \rho \in P, k \in K\}$. С каждым таким каналом свяжем ребро гипермультиграфа $G(\omega, t)$. Каждый канал характеризуется $W(\omega, t) = \{w_{\rho k}(\omega, t), \rho \in P, k \in K\}$ определенной интенсивностью потока в нем, называемой темпом. Следует отметить, что изменение уровня потока (объема резервуара потока) $\vec{x}_{i\rho}(\omega, t)$ ρ типа на i -ом ФЭ СЛО связано с $\vec{\psi}_{i\rho}(\omega, t)$ - интенсивностью поступления потока ρ типа в i -ый ФЭ СЛО; $\vec{\omega}_{i\rho}(\omega, t)$ - интенсивностью передачи потока ρ типа из i -го ФЭ СЛО; $\vec{\phi}_{i\rho}(\omega, t)$ - интенсивностью переработки потока ρ типа в i -ом ФЭ СЛО. Причем интенсивности приема, передачи и обработки потоков непосредственно связаны с темпами каналов.

$\Delta_{G\beta}(\omega)$ - множество допустимых планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО с учетом основных пространственно-временных, технических и технологических ограничений, связанных с процессом функционирования рассматриваемого СЛО. План структурно-функциональной реконфигурации СЛО в данной потоковой постановке решаемой проблемы является обобщенным вектором программного управления потоками.

Следует отметить, что в зависимости от интерпретации ФЭ СЛО и учитываемых видов потоков отношения между вершинами и ребрами гипермультиграфа с учетом множества значений параметров потоков будут задавать различные типы структур, в качестве которых, в первую очередь, выделяются технологическая (функциональная), техническая, топологическая структуры, структуры про-

граммно-математического и информационного обеспечения, организационная структура.

$\{F_h(\vec{u}), \vec{u} \in \Delta_{G\beta}(\omega)\}_{h \in H^{str} \cup H^{fun}}$ - множество частных (структурно-топологических, структурно-функциональных) показателей качества функционирования СЛО, которые необходимо учитывать при выборе наилучшего плана структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях.

$\{\Phi^k\}_{k \in \Gamma}$ - множество согласующих правил, позволяющих задавать результирующие отношение предпочтения задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО: $r_{pez} = \Phi^k \left(\{F_h, h \in H^{str} \cup H^{fun}\} \right)$.

Приведённое обобщённое описание проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО в условиях неопределённости воздействия внешней среды и многокритериальности позволяет с единых позиций подойти к анализу и обоснованному выбору возможных путей решения частных задач анализа и синтеза структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

В исследуемой проблеме планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО в качестве альтернатив могут рассматриваться многоструктурные состояния СЛО и программы управления СЛО, обеспечивающие ему переход из текущего в требуемое макросостояние. Для решения подобного типа задач необходимо на основе практической реализации принципа внешнего дополнения привести в исходную постановку задачи такую информацию, которая позволит «снять» как критериальную, так и модельную неопределённость и свести решаемую задачу с неопределёнными факторами к её детерминированному варианту.

В сложных ситуациях выбора с множественным предпочтением первым шагом решения является выделение множества недоминируемых альтернатив, т.е. множества Парето (области недоминируемых альтернативных планов), определяемого следующим образом: $\Delta_{G\beta}^{nd}(\omega) = \{\vec{u} \in \Delta_{G\beta}(\omega) \mid (\exists \bar{z} \in \Delta_{G\beta}(\omega))(zr_{pez}u)\}$. Выбор конкретного плана структурно-функциональной реконфигурации (рациональ-

ного плана) должен осуществляться из указанного множества эффективных альтернатив $\bar{u}^* \in \Delta_{G\beta}^{nd}(\omega), \omega \in \Omega$.

С этой целью лицами, принимающими и обосновывающими решения (ЛПР, ЛОР) выбираются (априорно, апостериорно, комбинированно) принципы оптимальности выбора в соответствующей конкретной прикладной задаче, связанной со структурной динамикой СЛО, выдвигаются и принимаются различного рода гипотезы (например, гипотезы об информированности о ФЭ и подсистемах, входящих в состав СЛО, гипотезы о порядке взаимодействия ФЭ и подсистем с внешней средой и др.).

1.5 Агрегативно-декомпозиционный подход к решению проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО

Вместе с тем, при решении задач обеспечения надежности и живучести функционирования СЛО, обеспечения целостности и структурной функциональности ресурсов остается открытым множество концептуальных проблем, связанных с управлением их структурной динамикой при различных сценариях деградации перечисленных систем, проблемы комплексного оценивания и прогнозирования рисков возникновения нештатных и критических ситуаций, а также рисков выбора и реализации соответствующих управленческих решений и т. п. [137,168].

Учет этих и целого ряда других специфических особенностей процессов управления СЛО в чрезвычайных и катастрофических ситуациях требует разработки *новых принципов, моделей, методов и методик планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО для повышения надежности и живучести функционирования указанных объектов в динамически изменяющихся условиях.*

Любой СЛО характеризуется несколькими типами структур, отражающих определенные взаимосвязи элементов системы:

- функциональной, определяющей принципы и закономерности функционирования системы;

- технологической, определяющей логику работы системы по выполнению комплекса поставленных перед ней задач и достижения сформулированных целей её функционирования;
- технической, определяющей состав и характеристики технических (материальных) средств, использованных при её построении;
- организационной, определяющей состав и взаимоотношения коллективов людей, участвующих в функционировании системы;
- топологической, определяющей пространственное расположение элементов системы.

Под *структурной динамикой* СЛО подразумевается процесс перехода структуры (структур) СЛО из одного заданного состояния в другое заданное состояние под действием различного рода причин (внутренних, внешних, объективных, субъективных и т.п.). На рисунке 1.5.1 [137] представлена графическая иллюстрация структурной динамики СЛО. На графиках, приведённых в правой части рисунка 1.5.1 по оси абсцисс отложены дискретные моменты времени, по оси ординат номера структурных состояний СЛО применительно к каждому конкретному типу структур.

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

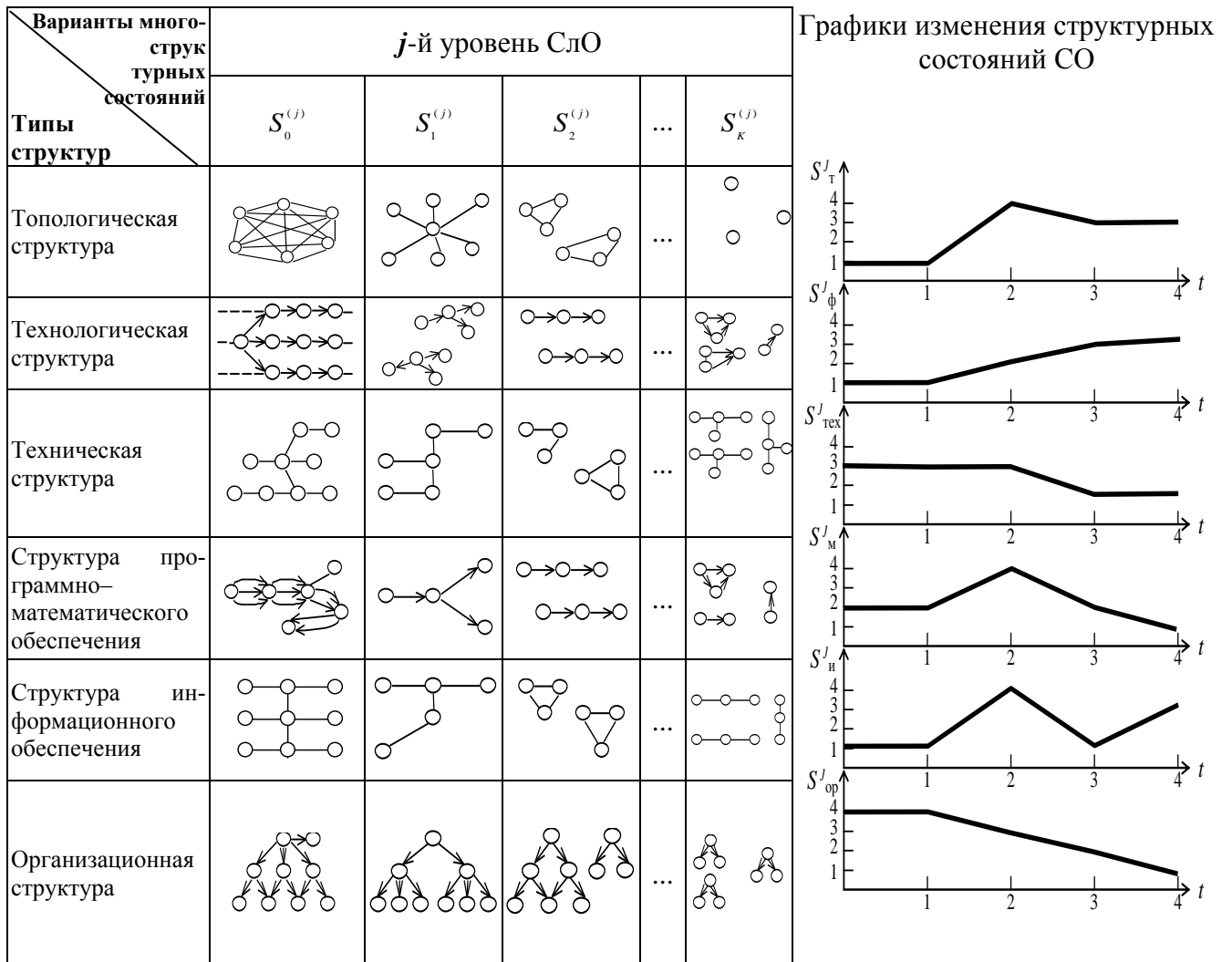


Рисунок 1.5.1 - Возможные варианты структурной динамики СЛО

Необходимо отметить, что решение задачи УСД СЛО (в частности, планирования реконфигурацией СЛО) даже с учетом указанного предположения представляет собой исключительно сложную проблему.

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.

Природа неопределённости возмущающих факторов может носить стохастическую и не стохастическую природу.

Если неопределённые факторы удаётся описать в виде случайных величин с известной функцией распределения, то в этом случае говорят, что возмущающие воздействия статистически определены. Случайные величины с неизвестными распределениями делятся на два больших вида: с известными параметрами (характеристиками) распределения и с неизвестными параметрами. При описании систем со случайными факторами широко используются вероятностно-статистические методы.

Неопределённость не стохастического характера возникает обычно из-за следующих обстоятельств [116,122,126,195,244]:

- наличия целенаправленного противодействия - поведенческой неопределённостью;
- недостаточной изученности явлений - природной неопределённостью;
- неопределённости, вызванной нечёткостью мышления и знаний человека - персоналистическая неопределённостью;
- неопределённости знаний и выводов в искусственных интеллектуальных системах.

Наибольшее распространение при конструктивном описании неопределённых факторов не стохастической природы получили следующие варианты их формализации:

- нечётко-возможностное описание неопределённых факторов с использованием нечетких множеств и нечетких мер;
- описание неопределённых факторов с использованием субъективных вероятностей;
- интервальное описание неопределённых факторов;
- комбинированное описание неопределённых факторов.

Таким образом, наиболее перспективным путём учёта факторов неопределённости (возмущающих факторов) в моделях структурно-функциональной реконфигурации СЛО является путь, в котором комплексно используются все адекватные способы и формы представления данных факторов. При этом комплексное исследование возможностей по управлению реконфигурацией СЛО включает в

себя как оценивание функционирования СЛО в нормальных режимах, так и оценивание возможного поведения системы в экстремальных ситуациях, приводящим к катастрофическим последствиям.

В этом случае исследование структурно-функциональной реконфигурации СЛО должно включать в себя следующие направления [116,122,137]:

- выявление всех возможных вариантов сценариев изменения внешней обстановки, в которых может применяться СЛО, включая экстремальные ситуации и воздействия, могущие вызвать катастрофические последствия, связанные с этими ситуациями;

- анализ поведения СЛО в обычных условиях функционирования на основе априорной вероятностной информации (если такая имеется), проведение имитационного моделирования, обработки экспертной информации с использованием теории субъективной информации и теории нечётких множеств и мер, теории возможностей;

- формирование гибких способов применения ФЭ и подсистем СЛО на временных интервалах структурного постоянства для решения задач приёма, хранения, обработки, передачи информационных и/или материальных потоков, формирование управляющих воздействий; планирование и управление системой объектов обслуживания, других ФЭ;

- нахождение гарантированных оценок результатов функционирования СЛО для всех основных экстремальных ситуаций;

- нахождение обобщённых (интегральных) оценок эффективности планирования реконфигурацией СЛО.

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 [43,98,112,189,204,205]. Причем 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»*. При данном подходе можно считать, что СЛО однороден, если все включенные в него ФЭ идентичны, и неоднороден в том случае, когда хотя бы один из его ФЭ отличается от всех остальных ФЭ. Другим критерием оценки архитектуры СЛО может быть равноценность и неравноценность структурного построения. Так архитектура СЛО равноценна, если потеря одного из ФЭ СЛО равнозначна потере любого другого. И наоборот, архитектура СЛО неравноценна, если отдельные ФЭ имеют большую ценность по отношению к другим ФЭ. Для изучения этого свойства СЛО требуется исследовать критичность входящих в его состав ФЭ.

Кроме того, структурные модели функционирования большинства СЛО корректно могут описываться блок-схемами, деревьями отказов и событий, графами связности, многотерминальными сетями и т.п. Однако данные структурные модели СЛО могут описывать функционирование только монотонных систем. В монотонных моделях невозможно учитывать логически сложные и противоречивые связи и отношения между функциональными элементами, например, которые в

одних структурных состояниях системы увеличивают, а в других - уменьшают показатель эффективности ее функционирования. Также монотонные модели не представляют системы, в которых одновременно функционируют элементы, часть из которых обеспечивает увеличение, например, надежности или безопасности, а другая часть является причиной возникновения отказов или аварий, т.е. оказывает противоположное, вредное влияние на безопасность системы в целом.

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

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

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 реконfigurации СЛО [41,42,145,149,152,154,162], включающий в себя следующие **направления**.

Направление 1. Включает в себя разработку методологических основ исследования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СЛО, логико-вероятностного и нечетко-возможностного подходов; а также разработку способов представления, анализа топологических свойств и оценивания структурных состояний СЛО с использованием введенной автором концепции генома структуры системы.

Направление 2. Включает в себя исследование равноценных и неравноценных структур СЛО путем многокритериального анализа и определения критичных ФЭ СЛО, отказ которых приводит к изменению структурного состояния системы.

Направление 3. Учитывая результаты выше проведенного анализа и специфические особенности проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, предлагается осуществить построение в области работоспособных структурных состояний $S_R \subseteq S$ множества оптимистических и пессимистических сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СЛО $S^{Сцен}$, вызванных отказами критичных ФЭ.

Далее на множестве $S^{Сцен}$ с использованием набора структурно-топологических и структурно-функциональных показателей СЛО выделить классы (кластеры) эквивалентных оптимистических и пессимистических траекторий структурной реконфигурации СЛО. Внутри каждого кластера эквивалентных траекторий структурной реконфигурации осуществляется поиск типовой (эталонной) траектории структурной реконфигурации СЛО $S^{Эталон} \subseteq S^{Сцен}$.

Реализация первого, второго и третьего направления нацелена на учет особенностей функционирования СЛО и преодоление первых двух указанных частных проблем, связанных с решением задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях.

Направление 4. В данном направлении предлагается для оптимистических и пессимистических эталонных сценариев структурной реконфигурации СЛО решать задачу разработки планов *структурно-функциональной реконфигурации* СЛО с использованием моделей многокритериального планирования операций обработки, приема-передачи и хранения информационных и/или материальных потоков с учетом временных интервалов постоянства структуры СЛО.

Направление 5. И, наконец, в пятом направлении предлагается решить задачу параметрического синтеза облика СЛО, для которого возможно обеспечить гарантированный уровень качества планов структурно-функциональной реконфи-

гурации рассматриваемого класса объектов в динамически изменяющихся условиях.

Направление 6. В заключении предлагается провести аналитико-имитационное моделирование условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО с целью выявления эмерджентных свойств СЛО, неучтенных предлагаемой неформальной декомпозицией и агрегированием структурно-сложной системы.

Графическая иллюстрация сути предлагаемого агрегативно-декомпозиционного подхода приведена на рисунке 1.5.2.

В результате реализации четвертого, пятого и шестого направлений предложенного подхода осуществляется преодоление приведенных (второй и третьей) частных проблем при решении задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

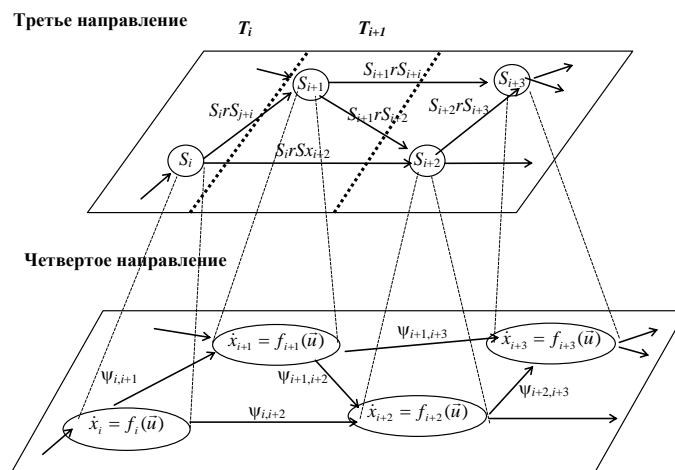


Рисунок 1.5.2 - Графическая иллюстрация подхода

Таким образом, обобщая проведенный системный анализ проблемы планирования реконфигурации СЛО, направления диссертационных исследований могут быть представлены схемой на рисунке 1.5.3. Сплошными тонкими стрелками обозначена логическая взаимосвязь направлений предлагаемого диссертационного исследования. Пунктирные стрелки показывают влияние реализации направлений исследования на преодоление частных проблем, имеющих даже при выдвинутых предложениях. Широкие стрелки говорят о том, что при проведении этапов

исследований требуется учитывать приведенные на рисунке 1.5.3. выдвинутые ранее предположения.

Как показывает проведённый анализ, задачи приведенных направлений исследования также являются достаточно сложными, но для рассматриваемой прикладной области принципиально разрешимыми.

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

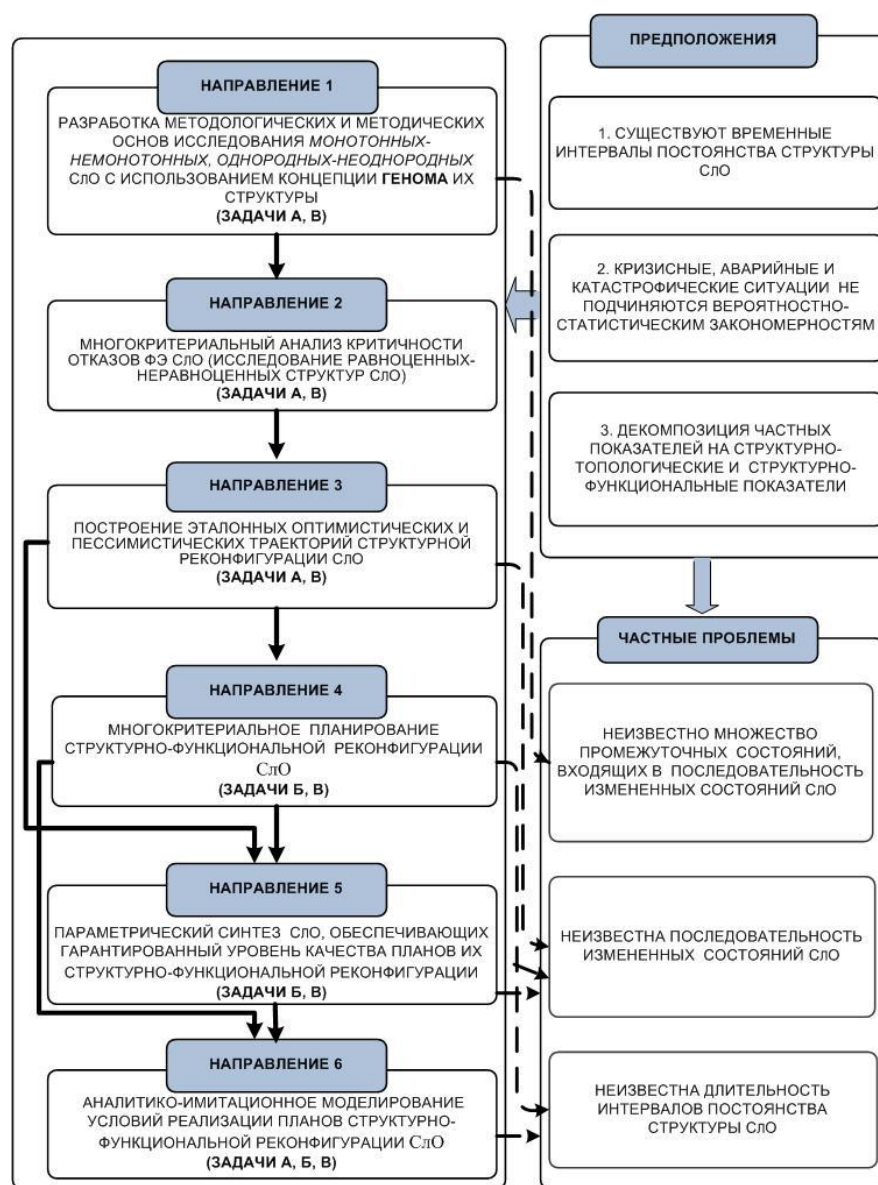


Рисунок 1.5.3 - Направления диссертационных исследований

Задачи класса А – задачи анализа структурной динамики СЛО:

- исследования монотонных-немонотонных, однородных-неоднородных СЛО на основе концепции генома структуры объекта;
- построения сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СЛО при деструктивных воздействиях по критическим ФЭ объекта.

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:

- разработки планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО;
- параметрического синтеза СЛО, обеспечивающих гарантированный уровень значений интегрального показателя качества планов структурно-функциональной реконфигурации рассматриваемого класса объектов в динамически изменяющихся условиях.

В состав данного класса входят *четвертая* и *пятая* задачи диссертационного исследования.

Задачи класса В (вспомогательные задачи):

- вычисление структурно-топологических и структурно-функциональных показателей: структурной надежности СЛО, значимости и вкладов ФЭ в структурную надежность СЛО, структурной живучести, интенсивности и равномерности применения ФЭ при выполнении технологических операций управления;
- проведение экспертного опроса и экспертного оценивания значений показателей критичности отказов ФЭ СЛО;
- многокритериального анализа критичности отказов ФЭ СЛО с учетом количественных и качественных показателей;
- построения классов эквивалентных сценариев структурной реконфигурации СЛО;

- выделения эталонных сценариев структурной реконфигурации СЛО;
а также *шестая* и *седьмая* задачи диссертационного исследования.

На основании вышеизложенного, содержание методологических основ решения поставленной в диссертации проблемы представлено на рисунке 1.5.4.

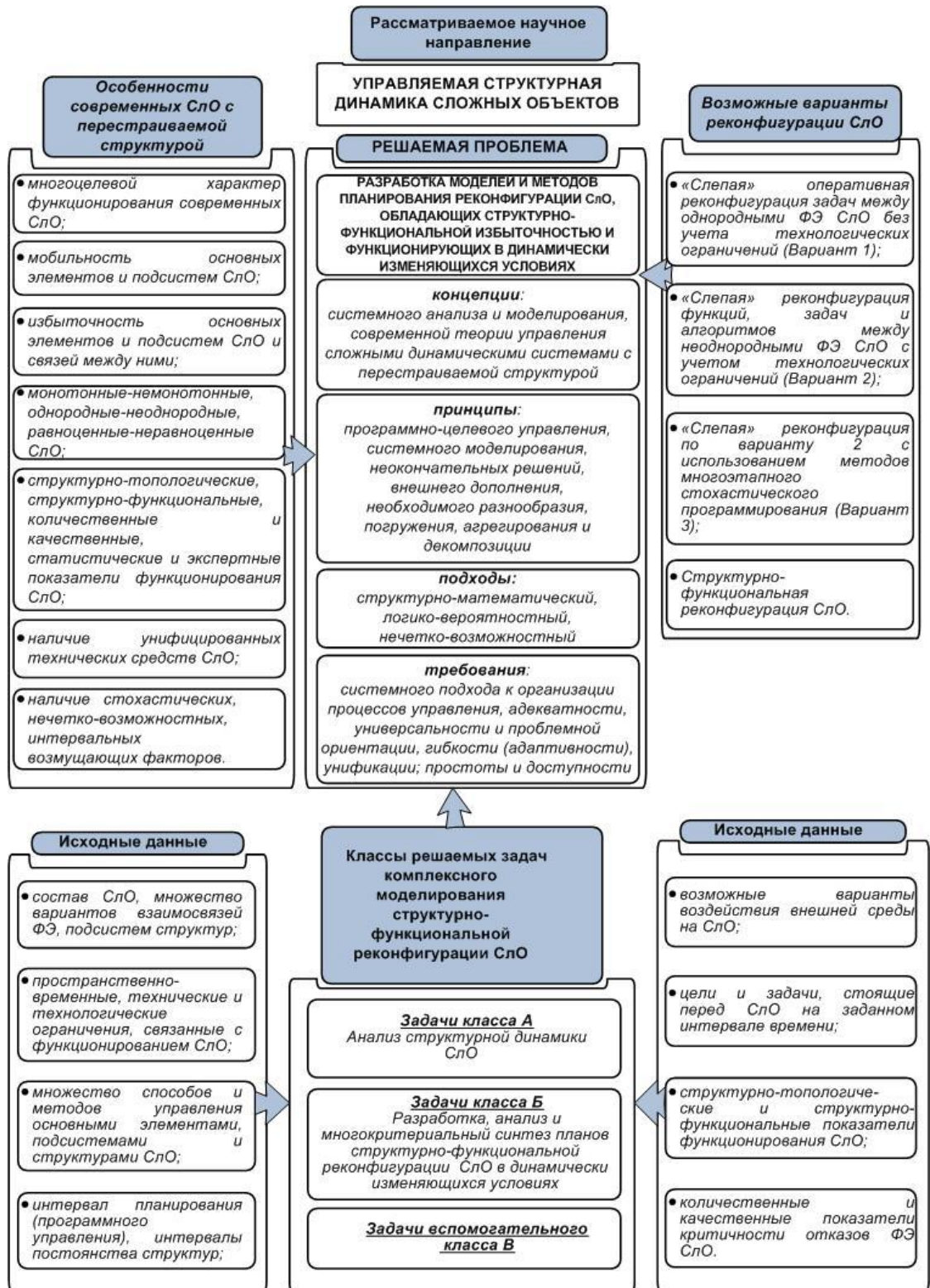


Рисунок 1.5.4 - Методологические основы решения проблемы

В последующих разделах диссертации проведём детализацию и решение отдельных задач, входящих в классы задач А, Б и В.

Выводы

В заключение данного раздела можно сделать следующие выводы:

1. В результате проведенного системного анализа было установлено, что в современных условиях обеспечение непрерывности технологических процессов, а также повышение надежности и живучести функционирования соответствующих сложных объектов с перестраиваемой структурой является одним из важнейших стратегических направлений развития современных социально-экономических и технических комплексов. Это обусловлено необходимостью сохранять устойчивость и стабильность функционирования СЛО в различных условиях неблагоприятных воздействий внешних и внутренних факторов как природно-техногенного характера, так и инспирированных человеком.

2. В ходе исследований установлено, что для нейтрализации угроз и минимизации потерь, вызываемых нештатными, аварийными, чрезвычайными и катастрофическими ситуациями, приводящими к лавинообразному нарастанию деградиционных 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.

3. Проанализированы основные специфические особенности процессов управления сложными системами в чрезвычайных и катастрофических ситуациях, показано, что применительно к современным СЛО их реконфигурацию следует рассматривать не только в узком смысле («слепая» реконфигурация) как технологию управления структурами СЛО для компенсации отказов ФЭ, но и в широком смысле (структурно-функциональная реконфигурация) как технологию управления, направленную на повышение надежности и живучести функционирования СЛО в динамически изменяющихся условиях. С учетом функционально-структурного подхода проведен морфологический анализ задач реконфигурации

СлО. Показано, что в зависимости от складывающейся обстановки следует оперативно осуществлять перераспределение целей, функций и решаемых задач (алгоритмов) между элементами и подсистемами СлО. В первую очередь к таким задачам можно отнести задачи приёма, передачи, хранения и обработки информационных и/или материальных потоков.

4. Анализ современных существующих вариантов «слепой» реконфигурации показал, что процесс формирования промежуточных состояний СлО с единой общесистемной точки зрения практически не рассматривался, предлагаемые постановки задачи «слепой» реконфигурации СлО характеризуются большой размерностью, не учитывают следующие существенные операции: учёт и анализ текущих характеристик решаемых в СлО задач и выполняемых функций; анализ и оценивание текущего состояния СлО в целом; оперативный расчёт, оценивание и анализ целевых и информационно-технических возможностей СлО для обоснованного перераспределения функций СлО между её работоспособными ФЭ и подсистемами.

5. Проведено концептуальное и теоретико-множественное описание проблемы многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СлО, которое показало, что данные системы обладают целым рядом особенностей, среди которых, прежде всего, следует выделить многоцелевой характер функционирования СлО, описываемый структурно-топологическими и структурно-функциональными показателями. Значения частных показателей качества функционирования СлО в каждом состоянии зависят от: множества отказавших, работоспособных, частично работоспособных ФЭ; распределения операций обработки, сохранения, приема-передачи информационных и/или материальных потоков; перераспределения этих операций между работоспособными или частично работоспособными ФЭ.

6. Сформулированы и обоснованы общие и частные требования, предъявляемые к разработке новых принципов, моделей, методов и методик многокритериального оценивания, анализа и выбора наиболее предпочтительного плана структурно-функциональной реконфигурации СлО для повышения надежности и жи-

вучести функционирования СЛО в динамически изменяющихся условиях. Проведённый анализ данных требований позволил сформулировать основные направления агрегативно-декомпозиционного подхода к исследованию проблемы многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО с перестраиваемой структурой и методологические основы решения проблемы моделирования, многокритериального оценивания, анализа и выбора наиболее предпочтительного плана структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

2 Методологические основы исследования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур сложных объектов

В данном разделе подробно рассмотрим содержание первого направления агрегативно-декомпозиционного подхода к решению задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, посвященного исследованию монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СЛО [130,132,135,138,139,140-143,150,153,162,171]. В основе исследования лежит введенная автором концепция генома структуры СЛО.

2.1 Концепция генома структуры системы

2.1.1 Способы описания монотонной и немонотонной структуры системы

Традиционно при использовании многих структурных методов моделирования систем условие монотонности их функционирования считалось обязательным или рассматривалось по умолчанию [200,212,246]. Как правило, это связано со свойством природной монотонности многих реально существующих систем, которое заключается в отсутствии ФЭ системы, отказ или восстановление которого соответственно увеличивает или снижает надежность системы в целом. Согласно [212] все монотонные структуры можно разбить на два типа. При описании моделей монотонных структур первого типа используют графы связности, двух или многотерминальные сети. В этих графах логические связи между ФЭ представляются двумя способами:

- логическая операция "И" (конъюнкция) – обозначается с помощью последовательного соединения ФЭ;
- логическая операция "ИЛИ" (дизъюнкция) - обозначается с помощью параллельного соединения ФЭ.

К монотонным структурам второго типа относятся такие, взаимодействия ФЭ которых можно описать монотонными логическими функциями, но не представить графами связности. Как правило, такие ситуации возникают, когда описа-

ние условий работоспособности системы сопровождается дополнительными уточняющими не всегда строго формальными пояснениями. Таким образом, даже для монотонных структур графы связности уступают по своим возможностям основному аппарату моделирования – алгебре логики [113,193,212].

Может сложиться впечатление, что немонотонных структур не может быть вообще. Однако в последние годы возникло много новых направлений исследований, в которых становится важной проблема построения структурных моделей функционирования немонотонных сложных системных объектов [193]. Так, например, исследование систем в целенаправленной, неизвестной среде требует включения в структурную модель ФЭ и подсистем, отражающих процессы разрушения, поражения, проникновения, противодействия противоположной стороны, наличия форс-мажорных обстоятельств. К таким системам можно отнести военно-технические системы, систему обеспечения надежности цепей поставок, систему безопасности компьютерных сетей информационных услуг и т.п. [74,113,193,248,275].

Для снятия ограничения на монотонность и обеспечения возможности построения логических условий функционирования ФЭ как монотонных структур первого и второго типа, так и любых немонотонных структур профессором Можаяевым А.С. был разработан общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) [113,114,193], являющийся развитием классических методов логико-вероятностного исчисления, позволяющих исследовать монотонные структуры первого типа [210,212,226].

Главная особенность и принципиальное отличие ОЛВМ от классических монотонных ЛВМ заключается в том, что ОЛВМ включает новые средства графического представления структур систем (схемы функциональной целостности - СФЦ), включающие изобразительные средства функционально-полного набора логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ". Кроме того, предложенный профессором Можаяевым А.С. [114] универсальный графический аппарат СФЦ, а также графоаналитический метод решения логических уравнений, позволяют построить логико-вероятностную модель функционирования СЛО, учитывающую независи-

мые, несовместные события, множественные состояния ФЭ, многофункциональные элементы и подсистемы.

Так же к методам структурного моделирования можно отнести методы когнитивного моделирования, в котором наиболее распространенными классами моделей являются взвешенные (знаковые) орграфы, импульсные процессы и нечеткие когнитивные карты [89,95,96,103,217,247,280]. В основе когнитивного подхода лежат работы Р. Аксельрода и Робертса Ф.С. [207,291]. Как правило, с использованием когнитивного моделирования решаются задачи статистического и динамического анализа исследуемой ситуации посредством изучения структуры взаимовлияния факторов (концептов) друг на друга, оценки достижимости тех или иных целей, генерации возможных сценариев развития ситуации во времени, выработки управленческих решений. Для решения указанных задач применяют математический аппарат дискретных линейных динамических систем и нечеткую математику. В большинстве случаев когнитивное моделирование использовалось для социально-экономических систем. Однако, если под вершиной когнитивной карты понимать техническое средство, технологическую операцию, т.е. некий ФЭ, а под связью между вершинами – влияние работоспособности одного ФЭ на другой ФЭ, то когнитивными моделями можно описывать и исследовать функционирование СЛО. Другими словами, когнитивная карта отражает взаимодействие ФЭ СЛО различной природы (механической, энергетической, информационной и т.д.). Функционирование системы предполагает постоянное взаимодействие образующих его ФЭ. Поэтому внешние воздействия, причинив повреждения одним ФЭ системы, окажут влияние на показатели качественного состояния и элементов, не подвергнувшихся влиянию этого воздействия непосредственно.

Нечеткая когнитивная карта представляет собой причинно-следственную сеть (или нечеткую положительно-отрицательную семантическую сеть), в которой веса связей лежат на отрезке $[-1,1]$. Положительно-отрицательные связи можно интерпретировать в терминах нечеткой логики. На когнитивной карте положительные связи типа « x влияет на y » в логической интерпретации можно рассмат-

ривать как импликацию $x \Rightarrow y$ или $\bar{x} \Rightarrow \bar{y}$. Отрицательные связи можно представлять как $\bar{x} \Rightarrow y$ или $x \Rightarrow \bar{y}$. Однако при решении практических задач на концепт (фактор) y может оказывать влияние некоторый набор концептов, причем как положительное, так и отрицательное. При этом следует отметить, что влияние может оказываться как одновременно всеми концептами набора, так и отдельными концептами данного набора. В логической интерпретации данные условия можно представить логическими связками «И», «ИЛИ» (конъюнкциями и дизъюнкциями). Формально логическая интерпретация имеет следующий вид

$$x_1^{\delta_1} \wedge \dots \wedge x_n^{\delta_n} \Rightarrow y, \quad x_1^{\delta_1} \vee \dots \vee x_n^{\delta_n} \Rightarrow y, \quad \text{где } x_i^{\delta_i} = \begin{cases} x_i, & \text{если } \delta_i = 0 \\ \bar{x}_i, & \text{если } \delta_i = 1 \end{cases}. \quad \text{Для структурного}$$

построения когнитивной карты в указанных условиях требуется использовать функционально полный набор логических операций «И», «ИЛИ» и «НЕ».

Для реализации операции «НЕ» в работах [89,95,96,103,207,217,247,280,291] были введены отрицательные веса на дугах орграфа. Нахождение взаимовлияния концептов нечеткой когнитивной карты состоит в определении совокупного причинного эффекта от вершины (концепта) i до вершины j по правилам [217]:

$$w^*(i, j) = \sum_{l=1}^m T w(q, q+1), \quad \text{где } S - \text{ оператор } S\text{-нормы, } T - \text{ оператор } T\text{-нормы,}$$

$A_l = (i, k_1^l, k_2^l, \dots, k_{n_l}^l, j)$ - путь от вершины i до вершины j , $l = 1, \dots, m$.

Некоторые примеры S-норм и T-норм приведены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 - Примеры S-норм и T-норм

S-норма	T-норма
$S_1(x, y) = \max\{x, y\}$	$T_1(x, y) = \min\{x, y\}$
$S_2(x, y) = x + y - xy$	$T_2(x, y) = xy$
$S_3(x, y) = \begin{cases} x, & y = 0 \\ y, & x = 0 \\ 1, & x, y > 0 \end{cases}$	$T_3(x, y) = \begin{cases} x, & y = 1 \\ y, & x = 1 \\ 1, & x, y < 1 \end{cases}$

Если $S \equiv \max$ и $T \equiv \min$, то для определения взаимовлияния концептов используется операция максиминной композиции. Если $S \equiv \max$ и T – норма, то для определения взаимовлияния концептов используется операция макстриангулярной композиции. Для определения матрицы W^* взаимовлияния концептов требуется вычислить транзитивное замыкание нечеткого графа (используется операция макстриангулярной композиции). При этом нечеткий граф получается из нечеткой когнитивной карты по следующим правилам [217].

1. Если матрица когнитивной карты $W = \|w(i, j)\|_{n \times n}$ имеет размерность $n \times n$, то матрица нечеткого графа $R = \|r(k, q)\|_{2n \times 2n}$ для отражения только положительных связей имеет размерность $2n \times 2n$;

2. Элементы матрицы $R = \|r(k, q)\|_{2n \times 2n}$ вычисляются следующим образом:

Если $w(i, j) > 0$, то $r(2i - 1, 2j - 1) = w(i, j)$, $r(2i, 2j) = w(i, j)$.

Если $w(i, j) < 0$, то $r(2i - 1, 2j) = -w(i, j)$, $r(2i, 2j - 1) = -w(i, j)$.

В результате транзитивного замыкания R^* матрицы $R = \|r(k, q)\|_{2n \times 2n}$ нечеткого графа взаимовлияние концептов характеризуется положительно-отрицательной парой $(v^+(i, j), v^-(i, j))$:

$$v^+(i, j) = \max\{r^*(2i - 1, 2j - 1), r^*(2i, 2j)\},$$

$$v^-(i, j) = -\max\{r^*(2i - 1, 2j), r^*(2i, 2j - 1)\}.$$

Кроме того на нечеткой когнитивной карте рассматривается автономный процесс изменения состояний вершин в дискретном временном пространстве по следующему правилу: $x_i(t + 1) = \sum_{j=1}^n x_j(t) T w_{ij}$.

Хотя в рассматриваемом подходе учитывается операция «НЕ», тем не менее описать немонотонную структурную модель функционирования любой системы не представляется возможным. По всей видимости это так же связано с наличием дополнительных уточняющих не всегда строго формальных пояснений. По аналогии с монотонными структурами, назовем немонотонными структурами первого типа те, которые можно представить с помощью нечеткой когнитивной карты. К

немонотонным структурам второго типа будем относить структуры взаимодействия ФЭ, которые можно описать немонотонными логическими функциями, но не удастся представить нечеткими когнитивными картами.

Реализация функционально полной логической базы требует принципиальной переработки средств и методов структурного построения когнитивных карт исследуемых проблем. В данной ситуации на помощь может прийти созданный профессором Можяевым А.С. при разработки ОЛВМ [114] новый логически полный графический аппарат - СФЦ. Принятое в ОЛВМ графическое обозначение и аналитическое описание функциональной вершины приведено на рисунке 2.1.1.

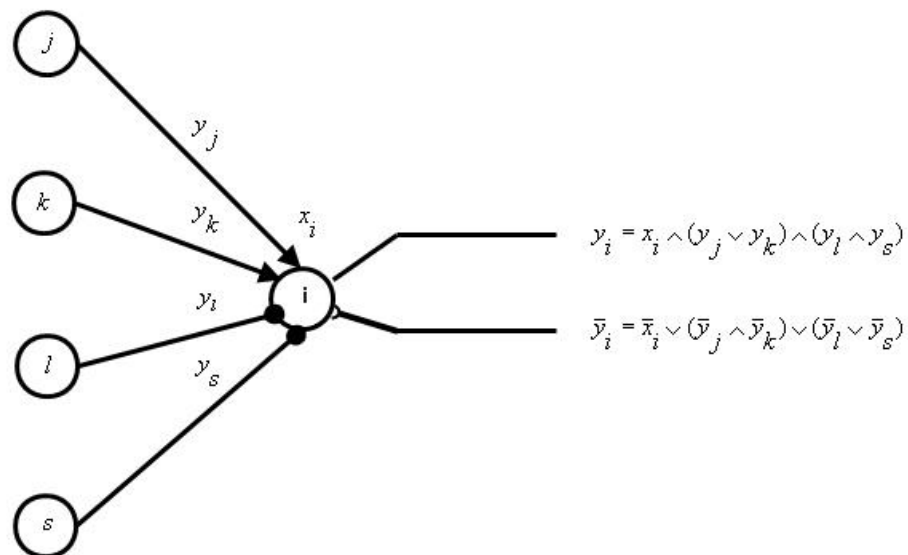


Рисунок 2.1.1 - Вершина когнитивной карты в интерпретации СФЦ ОЛВМ

При построении логической модели функционирования исследуемых систем используются два типа направленных дуг: дизъюнктивные (операция «ИЛИ») дуги – направленность функционального подчинения обозначается стрелками, конъюнктивные (операция «И») дуги - направленность связей логического подчинения на концах дуг обозначается жирными точками. Дуге, непосредственно исходящей из вершины i (прямой выход), сопоставляется функция y_i . Прямая интегративная выходная функция y_i представляет все условия свершения сложного выходного функционального события элемента i в исследуемой системе. Реализация функции y_i зависит, в общем случае, от состояния i -го элемента x_i , характеризующего его надежность, и от реализации логической совокупности заходя-

щих интегративных функций обеспечивающих элементов системы $\{j, k, l, s\}$. Кроме того, введены инверсные выходы (операция «НЕ») вершин. Инверсная интегративная выходная функция \bar{y}_i представляет все условия не свершения сложного выходного функционального события элемента i в исследуемой системе. Аналогично, инверсные выходы могут быть определены во всех элементах когнитивной карты. Это позволяет графически отобразить как условия реализации (например, безотказной работы), так и условия не реализации (отказа, авария, поражение) соответствующих системных функций на выходах любой вершины формируемой структурной модели системы.

Нахождение взаимовлияния вершин нечеткой когнитивной карты (в данной интерпретации) осуществляется по тому же правилу $w^*(i, j) = \sum_{l=1}^m T w(q, q+1)$ с тем

лишь различием, что в качестве S-нормы и T-нормы используются операции вероятностной суммы и произведения $S(x, y) = x + y - xy$, $T(x, y) = xy$. Для расчета взаимовлияния вершин когнитивной карты с такими нормами можно использовать функции надежности или отказа системы, представленные в виде полинома

[114,210,212,226]: $w^*(i, j) = R(i, j) = \sum_{k=1}^v (-1)^{k-1} \sum_{l=1}^{C_v^k} \prod_{q \in A_l} P_q$, где v - количество кратчай-

ших путей, C_v^k - число сочетаний из v по k , $P_q \in [0,1]$ - характеристика (вероятность, возможность) надежной работы q -го элемента.

Подводя итог проведенному анализу способов описания монотонных и немонотонных структур, приведем классификацию рассмотренных способов на рисунке 2.1.2.

Следует отметить, что каждая разработанная СФЦ является неявной (символической), но математически строгой (в форме системы логических уравнений) детерминированной моделью исследуемых свойств системы.

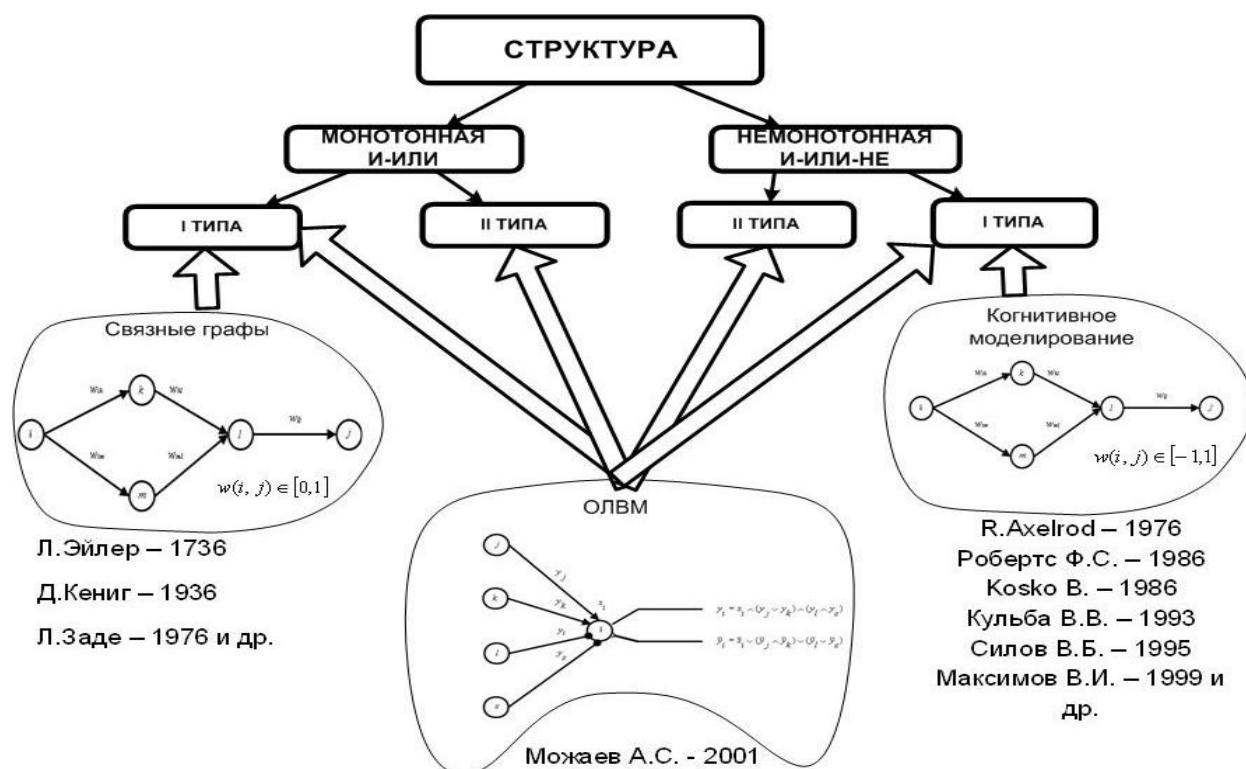


Рисунок 2.1.2 - Классификация способов описания структур систем

Технология автоматизированного моделирования, имеющая название ОЛВМ, реализована в программном комплексе автоматизированного структурного моделирования «Арбитр» и обеспечивает исследование функционирования разнородных систем различной физической природы и назначения, обладающих высокой структурной сложностью [193].

2.1.2 Геном монотонной структуры системы

Основные понятия теории графов и сетей.

Пусть $G = \{V, E\}$ граф с множеством вершин V и множеством ребер E и выделено некоторое подмножество вершин $W = V^+ \cup V^- \subseteq V$. Совокупность $\Gamma = (W, G)$ будем называть сетью. Элементы множества W называются полюсами. Если $\text{card}(W) = k$, то сеть называется k -полюсной. Если $V^+ = \{v^+\}$ и $V^- = \{v^-\}$, то сеть называется двухполюсной $\Gamma = (\{v^+, v^-\}, G)$. Двухполюсную сеть будем обозначать $\Gamma(v^+, v^-)$.

Более подробно рассмотрим важный класс конечных сетей – двухполюсные сети. Приведем некоторые понятия, связанные с двухполюсными сетями [44,236,266]. Подграфом сети $\Gamma(v^+, v^-)$ будем понимать произвольный подграф графа G . Пусть в сети $\Gamma(v^+, v^-)$ выделен подграф G^1 , содержащий хотя бы одно ребро. Тогда вершина подграфа G^1 называется *граничной*, если она является либо полюсом сети, либо концом ребра сети $\Gamma(v^+, v^-)$, не принадлежащего G^1 . Подграф сети называется *отростком*, если он обладает единственной граничной вершиной. Пример сети с *отростком* представлен на рисунке 2.1.3.

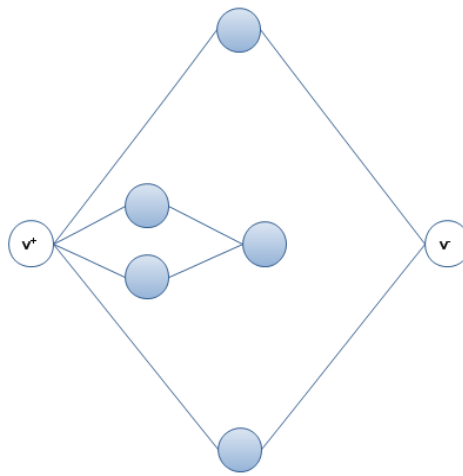


Рисунок 2.1.3 - Сеть с отростком

Подсетью сети $\Gamma(v^+, v^-)$ называется ее подграф, имеющий ровно две граничные вершины, которые являются полюсами подсети. Сеть $\Gamma(v^+, v^-)$ называется *связной*, если ее граф G является связным. Связная сеть $\Gamma(v^+, v^-)$ называется *сильно связной*, если через каждое ее ребро проходит цепь, соединяющая полюса $\{v^+, v^-\}$.

В дальнейшем будем рассматривать сильно связанные сети $\Gamma(v^+, v^-)$. Связная сеть $\Gamma(v^+, v^-)$ является *сильно связной* тогда и только тогда, когда она не содержит *отростков* [266]. *Тривиальной* называется двухполюсная сеть с одним ребром. Сильно связная сеть называется *разложимой*, если она обладает хотя бы одной нетривиальной подсетью. Иначе сильно связная сеть называется *неразложимой*.

Пусть $\Gamma(v^+, v^-)$ разложимая сеть, тогда она обладает $\Gamma_1(v_1, v_2)$ нетривиальной подсетью. Если в сети $\Gamma(v^+, v^-)$ заменить подсеть $\Gamma_1(v_1, v_2)$ ребром (v_1, v_2) , то получим сеть $\Gamma_2(v^+, v^-)$. Таким образом, разложимая сеть $\Gamma(v^+, v^-)$ может быть задана сетью $\Gamma_2(v^+, v^-)$, ребром (v_1, v_2) и сетью $\Gamma_1(v_1, v_2)$. Такое задание называется *разложением* сети $\Gamma(v^+, v^-)$. Сеть $\Gamma_2(v^+, v^-)$ называется *внешней*, а сеть $\Gamma_1(v_1, v_2)$ - *внутренней* сетью разложения. Сеть $\Gamma(v^+, v^-)$ называется *суперпозицией* сетей $\Gamma_2(v^+, v^-)$, $\Gamma_1(v_1, v_2)$.

Для сети $\Gamma(v^+, v^-)$, представленной на рисунке 2.1.4а, внешняя $\Gamma_2(v^+, v^-)$ и внутренняя $\Gamma_1(v_1, v_2)$ сети ее разложения, расположены на рисунке 2.1.4б.

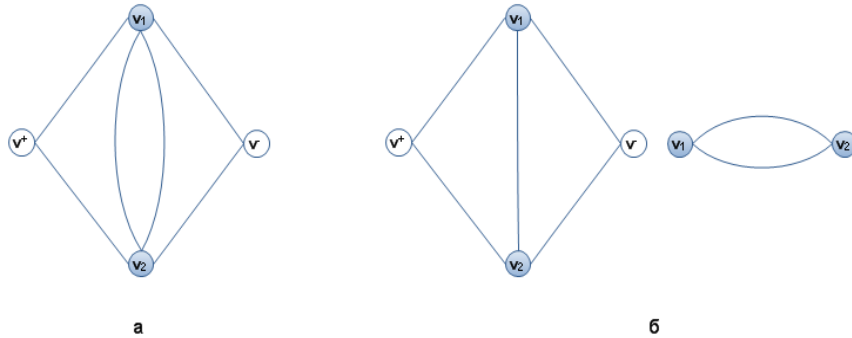
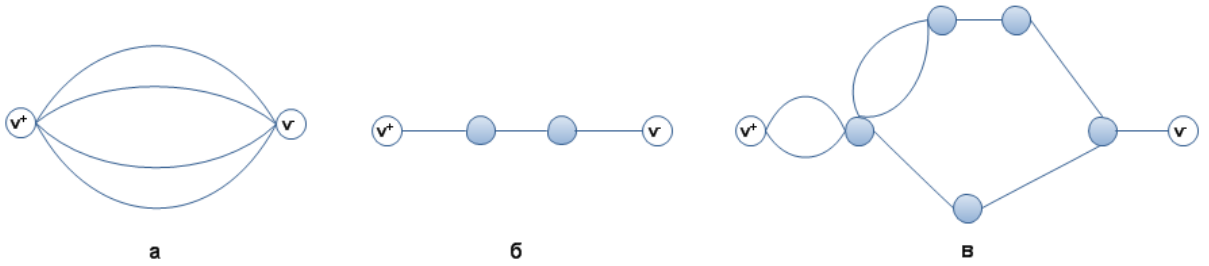


Рисунок 2.1.4 - Пример разложения сети

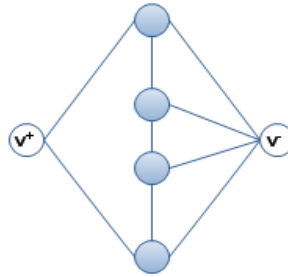
Сеть, состоящая из n параллельных ребер, соединяющих полюса $\{v^+, v^-\}$, обозначается через $\Gamma_n^p(v^+, v^-)$. Сеть $\Gamma_n^p(v^+, v^-)$ (рисунок 2.1.5а) получается суперпозицией простейших неразложимых сетей Γ_2^p .

Сеть, состоящая из n последовательных ребер (цепь), соединяющих полюса $\{v^+, v^-\}$, обозначается через $\Gamma_n^s(v^+, v^-)$. Сеть $\Gamma_n^s(v^+, v^-)$ (рисунок 2.1.5б) получается суперпозицией простейших неразложимых сетей Γ_2^s .

Сеть, которая может быть получена суперпозицией простейших неразложимых сетей Γ_2^p и Γ_2^s , называется π -сетью (параллельно-последовательная, П-структура) (рисунок 2.1.5в).

Рисунок 2.1.5 - Параллельно-последовательные π – сети

Нетривиальная неразложимая сеть, отличная от $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$ и $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$, называется H – сетью (H – структура). На рисунке 2.1.6 приведен пример одной из множества H – сетей .

Рисунок 2.1.6 - Пример H – сети

Разложимая сеть называется p – разложимой (соответственно s – разложимой , H – разложимой), если внешняя сеть разложения есть $\Gamma_n^p(v^+, v^-)$ (соответственно $\Gamma_n^s(v^+, v^-)$, H – сеть). Если сеть $\Gamma(v^+, v^-)$ разложима, то она либо p – разложима , либо s – разложима , либо H – разложима [44,266].

p – расщеплением сети $\Gamma(v^+, v^-)$ называется p – разложение , при котором внутренние сети разложения отличны от $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$ и сетей, являющихся p – разложимыми .

s – расщеплением сети $\Gamma(v^+, v^-)$ называется s – разложение , при котором внутренние сети разложения отличны от $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ и сетей, являющихся s – разложимыми .

H –*расщеплением* сети $\Gamma(v^+, v^-)$ называется разложение, внешней сетью которого является H –*сеть* .

Система всех нетривиальных сетей, которая возникает при расщеплении сети $\Gamma(v^+, v^-)$, называется *каноническим расщеплением сети*.

Каноническое расщепление сети $\Gamma(v^+, v^-)$, представленной на рисунке 2.1.7а, изображено на рисунке 2.1.7б.

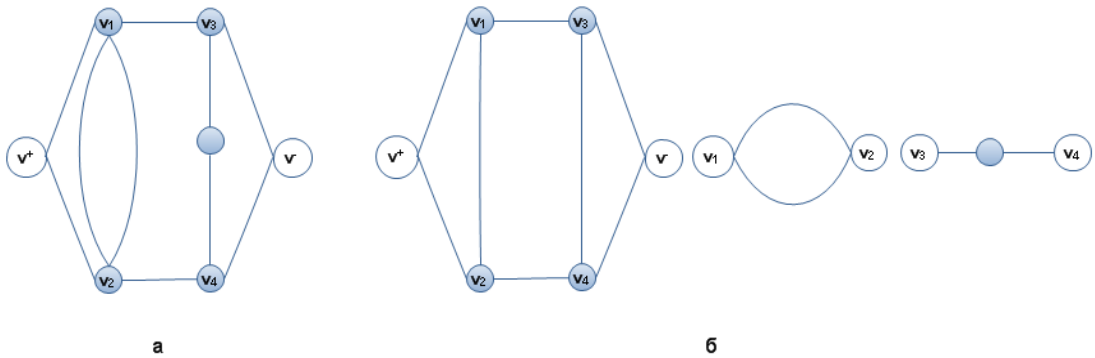


Рисунок 2.1.7 - Каноническое расщепление сети

Верно следующее утверждение: каждая сильно связная нетривиальная сеть $\Gamma(v^+, v^-)$, допускающая расщепление, имеет единственное каноническое расщепление [44,266].

Элементы из множества $V \setminus W$ называются *внутренними вершинами* сети $\Gamma(v^+, v^-)$. Внутренняя вершина v_1 сети $\Gamma(v^+, v^-)$ *зависит* от вершины v_2 , если каждая цепь, соединяющая полюса и проходящая через v_1 , проходит и через v_2 . Внутренние вершины v_1 и v_2 сети $\Gamma(v^+, v^-)$ называются *эквивалентными*, если v_1 зависит от v_2 и v_2 зависит от v_1 . Вершина v_1 *слабее* вершины v_2 (v_2 *сильнее* v_1), если v_1 зависит от v_2 и не эквивалентна ей. Внутренняя вершина v_1 сети $\Gamma(v^+, v^-)$ называется *минимальной*, если она не слабее никакой другой внутренней вершины сети. Внутренняя вершина сети называется *разделяющей*, если через нее проходят все цепи, соединяющие полюса.

Верно следующее утверждение: если $\Gamma(v^+, v^-)$ H-сеть, а v_1 и v_2 внутренние вершины, то существует цепь, проходящая через v_1 и не проходящая через v_2 [44,266].

Вершины v_2 и v_3 сети $\Gamma(v^+, v^-)$ (рисунок 2.1.8) зависят от вершин v_1 и v_4 и слабее их, вершины v_2 и v_3 эквивалентные, вершина v_5 сильнее вершин v_1 и v_4 , вершина v_5 разделяющая.

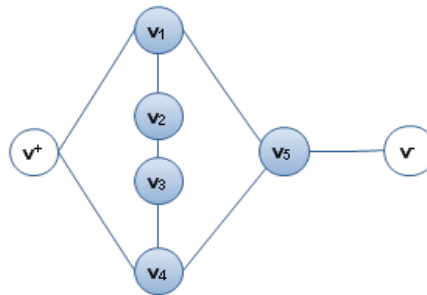


Рисунок 2.1.8 - Различные типы внутренних вершин сети

Две сети *изоморфны*, если их графы изоморфны и полюса одной сети взаимно однозначно соответствуют полюсам другой сети.

Операцией подразделения ребра графа называется операция удаления ребра и добавление двух новых, инцидентных вершинам удаленного ребра и соединенных между собой новой вершиной.

Две сети называются *гомеоморфными*, если обе они могут быть получены из одной и той же сети подразбиением ее ребер.

Определение и свойства генома сетевой структуры

Как правило [93,193,210,212,226,272,273] задача структурного анализа СЛО сводится к построению соответствующих структурных функций: функций надежности, функций безопасности, функций живучести, функций работоспособности, минимальных сечений отказов, путем ортогонализации ФАЛ и замещения логических аргументов в ФАЛ вероятностями их истинности, а логических операций соответствующими арифметическими.

Минимальным сечением отказов сетевой структуры $\Gamma(v^+, v^-)$ СЛО называется минимальный разрез сети, разбивающий ее на две компоненты связности, одна из которых содержит полюс v^+ , а другая v^- .

Вероятность отказа работы сети $\Gamma(v^+, v^-)$ СЛО определяется составом ее ребер и структурой их взаимосвязей. Расчет вероятности отказа работы $\Gamma(v^+, v^-)$ можно осуществлять по следующей формуле [114,210,212,226]:

$$T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = P\{\bigvee_{t=1}^m R_t\} = \sum_i P(R_i) - \sum_i \sum_j P(R_i \wedge R_j) + \\ + \sum_i \sum_j \sum_k P(R_i \wedge R_j \wedge R_k) - \dots + (-1)^{m-1} P(R_1 \wedge R_2 \wedge \dots \wedge R_m), \quad (2.1.1)$$

где $\{R_t, t = 1, \dots, m\}$ - множество минимальных сечений отказов.

Приведенную формулу (2.1.1) можно переписать в следующем виде (полином отказа СЛО)

$$T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = \sum_{t=1}^m (-1)^{t-1} \sum_{i=1}^{C_m^t} \prod_{q \in V_i(R, t)} Q_q, \quad (2.1.2)$$

где m – количество минимальных сечений отказов, C_m^t - число сочетаний из m по t , $V_i(R, t)$ - подмножество ребер $\Gamma(v^+, v^-)$ из $\{1, 2, \dots, n\}$, получающихся при i -ом варианте объединения ребер различных t минимальных сечений из множества всех минимальных сечений R , Q_q - вероятность отказа q -го ребра.

Используя полином отказа $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ от n переменных Q_i можно не только количественно оценить ненадежную работу СЛО при разных Q_i , но и определить вклад каждого элемента системы в отказ ее работы [114,210,226]. При условии равновероятного отказа работы всех ребер $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = Q$ из выражений (2.1.2) получим полином $T(Q)$ от одной переменной. Полином отказа $T(Q)$, как показано в [272,273], отображает некоторые интересные и очень полезные свойства сети, связанные с ее структурным построением.

Продemonстрируем сказанное на следующем примере. На рисунке 2.1.9 приведена сетевая структура, состоящая из 5-ти вершин (вершины 1, 5 – полюса, вершины 2,

3, 4 – внутренние) и 10-ти ребер. Для данной структуры 5 минимальных сечений отка-

ЗОВ: $R_1 = \{Q_1, Q_{10}\}, R_2 = \{Q_2, Q_3, Q_7, Q_9, Q_{10}\}, R_3 = \{Q_3, Q_4, Q_6, Q_7, Q_9, Q_{10}\}, R_4 = \{Q_5, Q_6, Q_8, Q_9, Q_{10}\},$
 $R_5 = \{Q_2, Q_4, Q_5, Q_8, Q_9, Q_{10}\}$

Полином отказа данной структуры имеет следующий вид:

$$T(Q_1, Q_2, \dots, Q_{10}) = Q_1 Q_{10} + Q_2 Q_3 Q_7 Q_9 Q_{10} + Q_3 Q_4 Q_6 Q_7 Q_9 Q_{10} + Q_5 Q_6 Q_8 Q_9 Q_{10} + Q_2 Q_4 Q_5 Q_8 Q_9 Q_{10} -$$

$$Q_1 Q_2 Q_3 Q_7 Q_9 Q_{10} - Q_1 Q_3 Q_4 Q_6 Q_7 Q_9 Q_{10} - Q_1 Q_5 Q_6 Q_8 Q_9 Q_{10} - Q_1 Q_2 Q_4 Q_5 Q_8 Q_9 Q_{10} - Q_2 Q_3 Q_4 Q_6 Q_7 Q_9 Q_{10} -$$

$$Q_2 Q_3 Q_5 Q_6 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10} - Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10} - Q_3 Q_4 Q_5 Q_6 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10} - Q_2 Q_4 Q_5 Q_6 Q_8 Q_9 Q_{10} +$$

$$Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_6 Q_7 Q_9 Q_{10} + Q_1 Q_2 Q_3 Q_5 Q_6 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10} + Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10} +$$

$$Q_1 Q_3 Q_4 Q_5 Q_6 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10} + Q_1 Q_2 Q_4 Q_5 Q_6 Q_8 Q_9 Q_{10} + Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 Q_6 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10} + Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 Q_6 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10} -$$

$$Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 Q_6 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10} - Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 Q_6 Q_7 Q_8 Q_9 Q_{10}$$

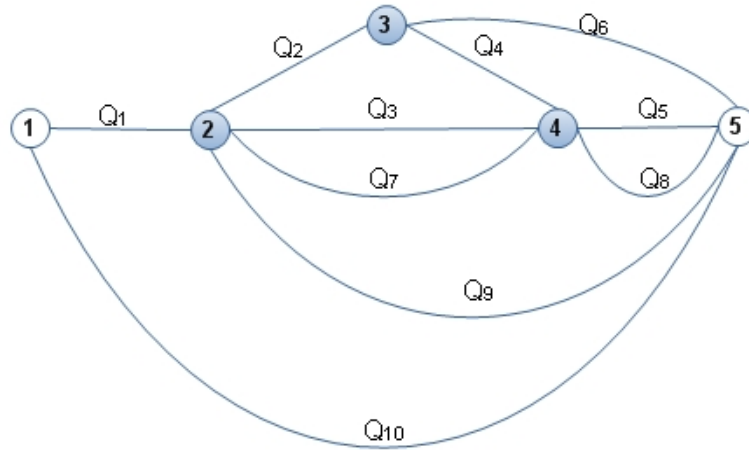


Рисунок 2.1.9 - Двухполюсная сеть

или в компактном виде $T(Q) = Q^2 + 2Q^5 - 4Q^7 - Q^8 + 5Q^9 - 2Q^{10}$.

Каждому структурному состоянию СЛО будет соответствовать свой полином $T(Q)$ или для компактности записи вектор, составленный из коэффициентов данного полинома $\vec{\chi} = (0, 1, 0, 0, 2, 0, -4, -1, 5, -2)$. В дальнейшем вектор $\vec{\chi} = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$, состоящий из коэффициентов полинома отказа структуры, будем называть **геномом сетевой структуры**, отвечающим за свойства сети.

Согласно [272,273] по виду генома $\vec{\chi} = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ можно провести анализ отдельных свойств структурного состояния СЛО, используя следующие правила:

- сумма коэффициентов полинома $T(Q)$ равна 1 (сумма компонент генома равна 1, т.е. $\chi_1 + \chi_2 + \dots + \chi_n = 1$);
- степень младшего члена полинома равна наименьшей мощности среди минимальных сечений отказов структуры (номер первой не нулевой компоненты генома, т.е. l - номер компоненты генома, для которой $\chi_l > 0$ и $\chi_i = 0, \forall i < l$);
- коэффициент при младшем члене полинома всегда положителен и численно равен числу минимальных сечений отказов наименьшей мощности (первая не нулевая компонента генома, т.е. $\chi_l > 0$ и $\chi_i = 0, \forall i < l$);
- степень старшего члена полинома равна числу ребер в структуре (n - размерность генома);
- число чередований знаков «+» и «-» в полиноме больше или равно количеству внутренних вершин сетевой структуры (число чередований знаков в геноме).

Для нашего примера (рисунок 2.1.9) существует единственное сечение мощности два $R_1 = \{Q_1, Q_{10}\}$, число ребер равно десяти, число внутренних вершин равно трем.

2.1.3 Свойства старшей компоненты генома структуры

Проведем анализ свойств π -сети (П-структуры), за которые отвечает старшая компонента генома структуры.

Лемма 1.

1) Если внешняя сеть сети $\Gamma(v^+, v^-)$ есть $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$ и внутренние сети $\Gamma_1(v^+, v^-)$ и $\Gamma_2(v^+, v^-)$ описываются соответственно геномами $\vec{\chi}^1 = (\chi_1^1, \chi_2^1, \dots, \chi_n^1)$ и $\vec{\chi}^2 = (\chi_1^2, \chi_2^2, \dots, \chi_m^2)$, то старшая компонента генома сети $\Gamma(v^+, v^-)$ равна $\chi_{n+m} = \chi_n^1 \chi_m^2$.

2) Если внешняя сеть сети $\Gamma(v^+, v^-)$ есть $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ и внутренние сети $\Gamma_1(v^+, \tilde{n})$ и $\Gamma_2(\tilde{n}, v^-)$ (s – разделяющая внутренняя вершина) описываются соот-

ветственно геномами $\vec{\chi}^1 = (\chi_1^1, \chi_2^1, \dots, \chi_n^1)$ и $\vec{\chi}^2 = (\chi_1^2, \chi_2^2, \dots, \chi_m^2)$, то старшая компонента генома сети $\Gamma(v^+, v^-)$ равна $\chi_{n+m} = -\chi_n^1 \chi_m^2$.

Доказательство. Обозначим полином отказа внутренней сети $\Gamma_1(v^+, v^-)$ в 1 случае ($\Gamma_1(v^+, \tilde{n})$ - 2 случай) через $T_1(Q)$, а для сети $\Gamma_2(v^+, v^-)$ в 1 случае ($\Gamma_2(\tilde{n}, v^-)$ - 2 случай) - $T_2(Q)$.

Тогда в 1 случае полином отказа сети $\Gamma(v^+, v^-)$ вычисляется по формуле $T(Q) = T_1(Q) \cdot T_2(Q)$, а во 2 случае по формуле $T(Q) = T_1(Q) + T_2(Q) - T_1(Q) \cdot T_2(Q)$.

Следовательно, коэффициенты при старших членах полинома $T(Q)$ и соответственно χ_{n+m} будут вычисляться по приведенным в лемме 1 формулам.

Лемма 1 доказана.

Лемма 2.

Старшая компонента генома любой π -сети (П-структуры) равна ± 1 , т.е. $\chi_n^\pi = \pm 1$.

Доказательство.

Любая π -сеть (П-структура) является суперпозицией простейших неразложимых сетей Γ_2^p и Γ_2^s .

Геном нетривиальной неразложимой сети $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$ и $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ (рисунок 2.1.10) имеет вид $\vec{\chi}_2^p = (0, 1)$ и $\vec{\chi}_2^s = (2, -1)$.



Рисунок 2.1.10 - Полиномы отказа сетей $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$, $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$

Следовательно, согласно лемме 1 $\chi_n^\pi = \pm 1$.

Лемма 2 доказана.

Следствие 1. Любая разложимая сеть $\Gamma(v^+, v^-)$ (П-структура), не имеющая в каноническом расщеплении *Н-сетей* (Н-структур), имеет старшую компоненту генома равную $\chi_n = \pm 1$.

Перейдем к рассмотрению *Н-сетей* (Н-структур).

Простейшая *Н-сеть* получается путем применения операции подразделения ребер сети $\Gamma_2^P(v^+, v^-)$ и соединения ребром внутренних минимальных вершин (рисунок 2.1.11).

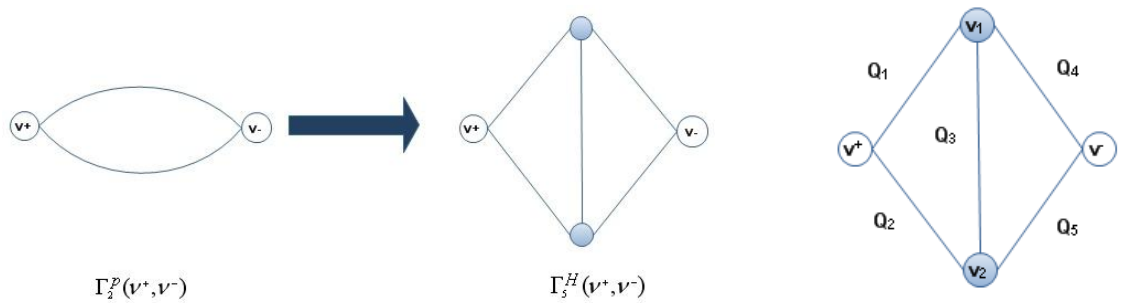


Рисунок 2.1.11 - Образование мостиковой структуры (*Н-сеть*)

Обозначим *Н-сеть*, представленную на рисунке 2.1.11, $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$. Полином отказа сети $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ [193,210] имеет вид $T_5^H(Q) = 2Q^2 + 2Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5$, т.е. $\vec{\chi}_5^H = (0, 2, 2, -5, 2)$. Все сети гомеоморфные $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ получаются подразбиением ее ребер. Примеры таких сетей приведены на рисунке 2.1.12.

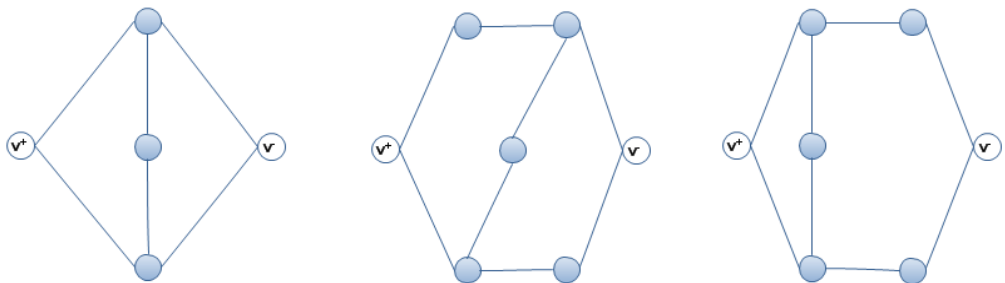


Рисунок 2.1.12 - Примеры сетей гомеоморфных сети $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$

Лемма 3.

Все сети гомеоморфные сети $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ имеют старшую компоненту своего генома равную $\chi_{5,n}^H = 2$, если n нечетное число, и $\chi_{5,n}^H = -2$, если n четное число.

Доказательство.

Помимо расчета вероятности отказа работы сетевой структуры $\Gamma(v^+, v^-)$ по формулам (2.1.1), (2.1.2), можно вычислять вероятность безотказной работы $\Gamma(v^+, v^-)$ по следующей формуле [114,210,212,226]:

$$R(P_1, P_2, \dots, P_n) = P\{\bigvee_{l=1}^d \Pi_l\} = \sum_i P(\Pi_i) - \sum_i \sum_j P(\Pi_i \wedge \Pi_j) + \sum_i \sum_j \sum_k P(\Pi_i \wedge \Pi_j \wedge \Pi_k) - \dots + (-1)^{d-1} P(\Pi_1 \wedge \Pi_2 \wedge \dots \wedge \Pi_d); \quad (2.1.3)$$

где $\{\check{I}_l, l=1, \dots, d\}$ - множество кратчайших цепей успешного функционирования $\Gamma(v^+, v^-)$.

Приведенную формулу (2.1.3) можно переписать в следующем виде

$$R(P_1, P_2, \dots, P_n) = \sum_{l=1}^k (-1)^{l-1} \sum_{i=1}^{C_k^l} \prod_{q \in W_i(\check{I}, l)} P_q; \quad (2.1.4)$$

где k – количество кратчайших цепей между полюсами, C_k^l - число сочетаний из k по l , $W_i(R, l)$ - подмножество ребер $\Gamma(v^+, v^-)$ из $\{1, 2, \dots, n\}$, получающихся при i -ом варианте объединения ребер различных l цепей из множества всех цепей Π , P_q - вероятность надежной работы q -го ребра.

При условии равновероятной надежной работы всех ребер $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$ из выражений (2.1.4) получим полином $R(P)$ от одной переменной.

Рассмотрим в сети $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ (рисунок 2.1.11) все кратчайшие цепи: $\Pi_1 = P_1 P_4$, $\Pi_2 = P_1 P_3 P_5$, $\Pi_3 = P_2 P_3 P_4$, $\Pi_4 = P_2 P_5$. Тогда вычисляя члены полинома надежности

$$R(P_1, P_2, \dots, P_n) = \sum_{l=1}^k (-1)^{l-1} \sum_{i=1}^{C_k^l} \prod_{q \in W_i(\check{I}, l)} P_q, \text{ при } l=2 \text{ цепи } \Pi_2, \Pi_3 \text{ дают вклад в}$$

старший член полинома $-P^5$, при $l=3$ все сочетания цепей по три дают вклад в

старший член полинома $+4P^5$, при $l = 4$ сочетания цепей по четыре дают вклад в старший член полинома $-P^5$. В целом коэффициент при старшем члене полинома надежности сети $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ равен $+2$.

Гомеоморфные $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ сети получаются подразбиением ребер, следовательно, рассмотренным свойством будут обладать и они.

Согласно соотношению двойственности монотонных структур [93] полиномы надежной работы и отказа любой сети $\Gamma(v^+, v^-)$ связаны между собой следующим выражением $R(P) + T(1 - P) = 1$, то коэффициенты при старших членах этих полиномов по модулю совпадают. Причем, если n нечетное число, то коэффициенты одного знака (т.е. $\chi_{5,n}^H = 2$), если n четное число, то – разных знаков (т.е. $\chi_{5,n}^H = -2$).

Лемма 3 доказана.

Лемма 4.

Операция подразбиения ребра сети $\Gamma(v^+, v^-)$ или замена ребра сети $\Gamma(v^+, v^-)$ на Γ_2^p сеть не влияет на абсолютную величину старшей компоненты ее генома.

Доказательство.

При выполнении операции подразбиения ребра, имеющего вероятность отказа Q_q , эта вероятность в формуле (2.1.2) будет заменена на $Q_q = Q_q' + Q_q'' - Q_q' Q_q''$, в случае замены ребра на сеть Γ_2^p в формулу (2.1.2) будет подставляться $Q_q = Q_q' Q_q''$. Следовательно, абсолютная величина старшей компоненты генома сети $\Gamma(v^+, v^-)$ останется без изменения.

Лемма 4 доказана.

Следствие 2. Замена ребра в сетях гомеоморфных $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ (Н-структурах) на π -сеть (П-структуру) не влияет на абсолютную величину старшей компоненты их генома.

Пример такой замены представлен на рисунке 2.1.13.

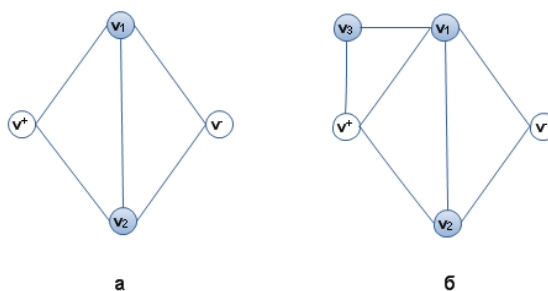


Рисунок 2.1.13 - Замена ребра в сети $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ на π -сеть

Для сети $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ (рисунок 2.1.13а) геном $\vec{\chi}_5^H = (0, 2, 2, -5, 2)$, а для сети, представленной на рисунке 2.1.13б, $\vec{\chi} = (0, 1, 3, 0, -9, 8, -2)$.

Следствие 3. Старшая компонента генома сильно связной двухполюсной сети $\Gamma(v^+, v^-)$, состоящей из n ребер, равна $\chi_n = \pm 2$, тогда и только тогда, когда в ее каноническом расщеплении имеется ровно одна Н-сеть Γ_5^H .

Построение более сложных Н-сетей .

Сложные Н-сети можно получить из сети $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$ путем подразбиения ребер и либо соединением ребрами внутренних не зависящих друг от друга вершин, либо соединением внутренних вершин с полюсами так, чтобы вновь образованная сеть не была суперпозицией Н-сети и π -сети, т.е. чтобы каноническое расщепление новой сети состояло только из Н-сети.

Известно [266], что все внутренние вершины Н-сети являются минимальными вершинами сети. Выполняя операцию подразбиения ребер сети $\Gamma_5^H(v^+, v^-)$, вновь образуемая внутренняя вершина (вершины) являются зависимыми от вершин ребра, которое было подвержено подразбиению. Для того, чтобы вновь образованные вершины были минимальными, их необходимо связать реб-

рами либо с полюсами сети, либо с уже существующими минимальными вершинами сети, либо между собой.

Рассмотрим, как будет изменяться старшая компонента генома N -сети при различном соединении вновь образованных вершин ребрами.

Примеры построения сложных N -сетей выше описанным способом приведены на рисунке 2.1.14.

Вычислим геномы приведенных на рисунке 2.1.14 сложных N -сетей. Для N -сети, представленной на рисунке 2.1.14а геном равен $\vec{\chi}^H = (0, 1, 3, 1, -12, 11, -3)$, для сети на рисунке 2.1.14б - $\vec{\chi}^H = (0, 0, 2, 4, -2, -13, 14, -4)$, для сети на рисунке 2.1.14в - $\vec{\chi}^H = (0, 0, 2, 0, 4, -3, -13, 16, -5)$, для сети на рисунке 2.1.14д - $\vec{\chi}^H = (0, 2, 2, -1, -9, 10, -3)$, для сети на рисунке 2.1.14е - $\vec{\chi}^H = (0, 1, 3, 2, -12, 11, -3)$, для сети на рисунке 2.1.14ж - $\vec{\chi}^H = (0, 1, 1, 3, -2, -11, 13, -4)$, для сети на рисунке 2.1.14г - $\vec{\chi}^H = (0, 2, 4, -3, -19, 32, -19, 4)$, для сети на рисунке 2.1.14з - $\vec{\chi}^H = (0, 3, 4, -9, -10, 27, -18, 4)$.

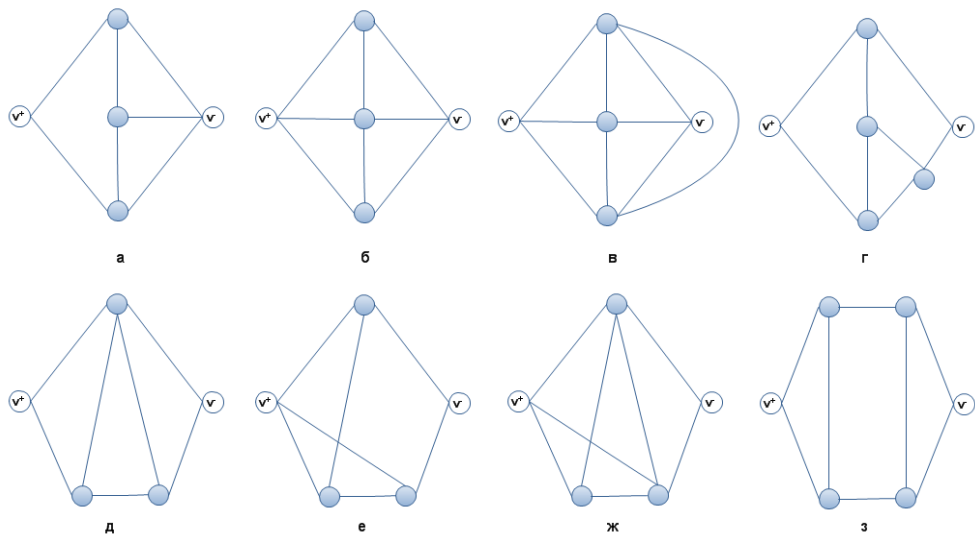


Рисунок 2.1.14 - Примеры построения сложных N -сетей

Из приведенных примеров можно заметить, что при каждом соединении вновь образованной вершины с полюсом или с минимальной вершиной сети абсолютная величина старшей компоненты генома возрастает на 1 (рисунок 2.1.14а, рисунок 2.1.14д, рисунок 2.1.14е), при каждом соединении минимальных вершин

между собой или минимальной вершины с полюсом старшая компонента генома по абсолютной величине так же увеличивается на 1 (рисунок 2.1.14б, рисунок 2.1.14в, рисунок 2.1.14ж), при соединении ребром вновь образованных не минимальных вершин между собой абсолютная величина старшей компоненты генома увеличивается на 2 (рисунок 2.1.14г, рисунок 2.1.14з).

Следует также отметить, что приведенные выше *леммы 1 и 4* верны и для всех сложных *Н-сетей*. Согласно *лемме 1* и *лемме 4* можно сформулировать следующие следствия.

Следствие 4. Если абсолютная величина старшей компоненты генома сильно связной двухполюсной сети $\Gamma(v^+, v^-)$, состоящей из n ребер, χ_n равна простому числу, то в каноническом расщеплении $\Gamma(v^+, v^-)$ имеется ровно одна сложная *Н-сеть*.

Следствие 5. Если абсолютная величина старшей компоненты генома сильно связной двухполюсной сети $\Gamma(v^+, v^-)$, состоящей из n ребер, χ_n разложима на множители, то в каноническом расщеплении $\Gamma(v^+, v^-)$ может быть либо одна сложная *Н-сеть*, либо несколько сложных *Н-сетей*, у которых абсолютные величины старших компонент геномов являются множителями χ_n исходной сети $\Gamma(v^+, v^-)$.

2.1.4 Геном немонотонной структуры системы. Обобщенное понятие генома структуры системы.

Во многих работах [52,113,114,193,200,210,212,226,246] исследование надежности, живучести, безопасности систем осуществлялось с применением монотонных ФАЛ. Тем не менее, в практике исследования СЛО встречаются случаи, когда логическая функция, описывающая процесс функционирования СЛО, является немонотонной.

В работе [52] рассмотрены два типа немонотонных ФАЛ.

К *первому типу* относят ФАЛ, которые в сокращенной ДНФ (дизъюнктивно-нормальной форме) представимы в следующем виде $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = (\bigvee_{k \in M} Z_k) \bigvee (\bigvee_{k \in L} Z_k)$, где $\bigvee_{k \in M} Z_k$ - конъюнкции, содержащие \bar{x}_i , $\bigvee_{k \in L} Z_k$ - конъюнкции, не содержащие \bar{x}_i и x_i .

Ко *второму типу* относятся ФАЛ, которые в сокращенной ДНФ представимы в следующем виде $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = (\bigvee_{k \in M} Z_k) \bigvee (\bigvee_{k \in N} Z_k) \bigvee (\bigvee_{k \in L} Z_k)$, где $\bigvee_{k \in M} Z_k$ - конъюнкции, содержащие \bar{x}_i , $\bigvee_{k \in N} Z_k$ - конъюнкции, содержащие x_i , $\bigvee_{k \in L} Z_k$ - конъюнкции, не содержащие \bar{x}_i и x_i .

Немонотонные логические функции первого типа можно привести к монотонным путем замены инверсных переменных следующим образом $y_i = \bar{x}_i$. При этом $P(y_i) = 1 - P(x_i)$.

Для П-структур и Н-структур, которые можно описать монотонными ФАЛ, в предыдущих параграфах введено понятие генома структуры, представляющего собой вектор, компонентами которого являются коэффициенты полинома отказа структуры, составленной из однородных элементов. Кроме того, приведены различные топологические свойства, которые хранит в себе геном монотонных структур первого типа.

Следует отметить, что при введении в П-структуру или Н-структуру элементов, описываемых немонотонными ФАЛ (например, \bar{x}_i - инверсный элемент), то в целом такая структура будет представлена немонотонной ФАЛ первого типа.

Проведем исследования простейших П-структур и Н-структур в случаях наличия и отсутствия элементов, описываемых немонотонной ФАЛ.

Простейшие неразложимых П-сети Γ_2^P , Γ_2^S в случаях наличия и отсутствия элементов с немонотонной ФАЛ представлены на рисунке 2.1.15. Полином отказа для структуры Γ_2^P без инверсного элемента (рисунок 2.1.15а) имеет полином отказа $T_1(Q_1, Q_2) = Q_1 Q_2$, с инверсным элементом — $T_2(Q_1, Q_2) = Q_2 - Q_1 Q_2$. Полином от-

каза для структуры Γ_2^s (рисунок 2.1.15б) соответственно имеет вид $T_3(Q_1, Q_2) = Q_1 + Q_2 - Q_1Q_2$ и $T_4(Q_1, Q_2) = 1 - Q_1 + Q_1Q_2$.

Под однородностью монотонных структур будем подразумевать одинаковую вероятность отказа всех элементов $Q_1 = Q_2 = Q$. Для структур, описываемых немонотонными ФАЛ, под однородностью понимаем $Q_1 = 1 - Q$, $Q_2 = Q$. Для однородных структур соответствующие полиномы отказа приведены на рисунке 2.1.15.

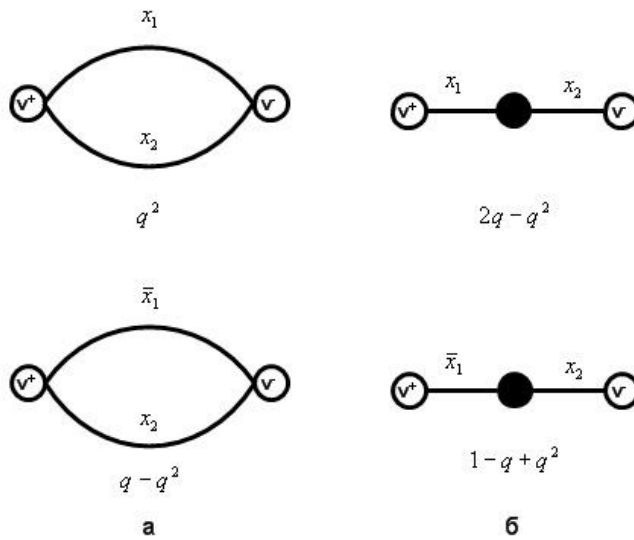


Рисунок 2.1.15 - Простейшие П-сети

Для немонотонных структур в полиноме отказа (надежности) может присутствовать свободный член равный 1. Поэтому под **геномом** как монотонной, так и немонотонной **структуры** системы (общий случай) будем понимать вектор коэффициентов полинома отказа $\vec{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$, причем $\chi_0 \in \{0, 1\}$. Следовательно, геномы приведенных структур (рисунок 2.1.15) имеют вид $\vec{\chi}_1 = (0, 0, 1)$, $\vec{\chi}_2 = (0, 1, -1)$, $\vec{\chi}_3 = (0, 2, -1)$, $\vec{\chi}_4 = (1, -1, 1)$.

Проведем исследование простой Н-сети (мостиковой структуры) с инверсными элементами.

Рассмотрим несколько вариантов введения инверсных элементов в мостиковую структуру.

Вариант 1. Инверсный элемент находится на грани простой Н-сети (рисунок 2.1.16).

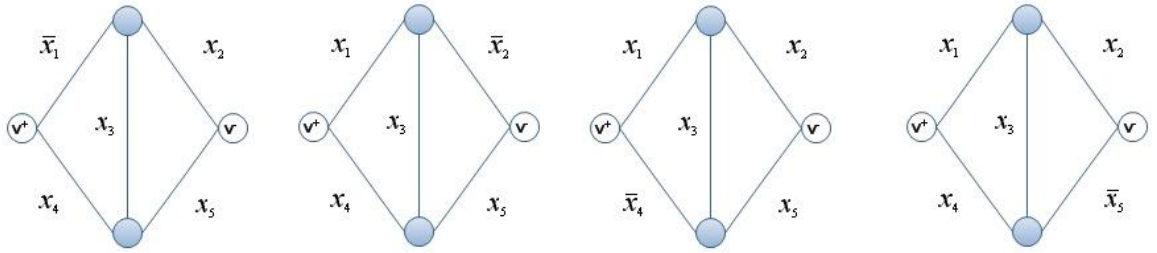


Рисунок 2.1.16 - Мостиковая структура с инверсными гранями

Приведем полином отказа для первой из рассматриваемых структур $T(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) = (1 - Q_1)(Q_4 + Q_3Q_5 - Q_2Q_3Q_4 - Q_3Q_4Q_5 - Q_2Q_4Q_5 - Q_2Q_3Q_5 + 2Q_2Q_3Q_4Q_5) + Q_2Q_3Q_4 + Q_2Q_5 - Q_2Q_3Q_4Q_5$.

Для однородной структуры соответствующий полином отказа имеет вид: $T(Q) = Q + Q^2 - 4Q^3 + 5Q^4 - 2Q^5$. Обобщенный геном данной структуры равен $\vec{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_5) = (0, 1, 1, -4, 5, -2)$. Несмотря на то, что структура имеет инверсный элемент, полином отказа представляет собой монотонную функцию, сохраняющую «0» и «1», т.е. $T(0) = 0, T(1) = 1$. Для оставшихся структур (рисунок 2.1.16) результаты будут аналогичные.

Вариант 2. Инверсный элемент находится на перемычке простой Н-сети (рисунок 2.1.17).

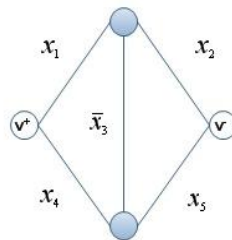


Рисунок 2.1.17 - Мостиковая структура с инверсной перемычкой

Полином отказа данной структуры имеет следующий вид $T(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) = (1 - Q_3)(Q_1Q_5 + Q_2Q_4 - Q_1Q_4Q_5 - Q_1Q_2Q_4 - Q_1Q_2Q_5 - Q_2Q_4Q_5 + 2Q_1Q_2Q_4Q_5) + Q_1Q_4 + Q_2Q_5 - Q_1Q_2Q_4Q_5$.

Для однородной структуры соответствующий полином отказа: $T(Q) = 4Q^2 - 6Q^3 + 5Q^4 - 2Q^5$. Геном данной структуры равен $\vec{\chi} = (0, 0, 4, -6, 5, -2)$. Несмотря на то, что структура имеет инверсный элемент полином отказа пред-

ставляют собой, как и в *варианте 1*, монотонную функцию, сохраняющую «0» и «1», т.е. $T(0) = 0, T(1) = 1$.

Вариант 3. Два инверсных элемента находятся у одного полюса простой Н-сети (рисунок 2.1.18).

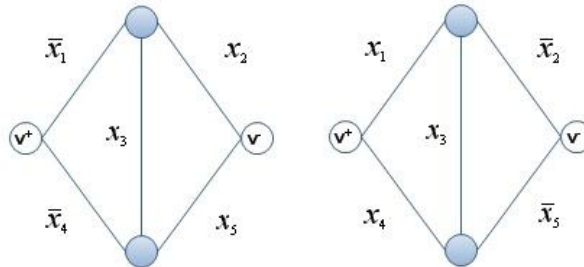


Рисунок 2.1.18 - Мостиковая структура с инверсными полюсными гранями

Полином отказа для левой структуры представляет собой $T(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) = (1 - Q_1)(Q_3Q_5 - Q_2Q_3Q_5) + (1 - Q_4)(Q_2Q_3 - Q_2Q_3Q_5) + (1 - Q_1)(1 - Q_4)(1 - Q_3Q_5 - Q_2Q_3 - Q_2Q_5 + 2Q_2Q_3Q_5) + Q_2Q_5$.

Для однородной структуры соответствующий полином отказа имеет вид: $T(Q) = 1 - 2Q + Q^2 + 4Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5$. Генем данной структуры равен $\vec{\chi}_1 = (1, -2, 1, 4, -5, 2)$.

В рассматриваемом случае полином отказа представляет собой немонотонную функцию, не сохраняющую «0», т.е. $T(0) = 1, T(1) = 1$.

Для правой структуры (рисунок 2.1.18) результаты будут аналогичные.

Вариант 4. Два инверсных элемента находятся на смежных гранях простой Н-сети (рисунок 2.1.19).

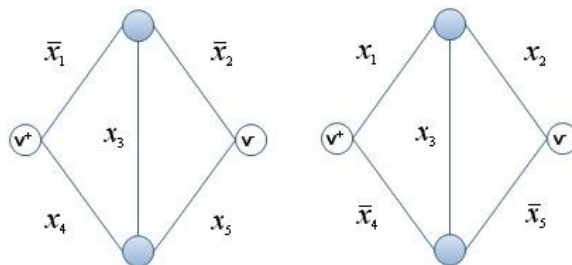


Рисунок 2.1.19 - Мостиковая структура с инверсными смежными гранями

Полином отказа для левой структуры представляет собой

$$T(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) = (1 - Q_1)(Q_4 + Q_3Q_5 - Q_3Q_4Q_5) + (1 - Q_2)(Q_5 + Q_3Q_4 - Q_3Q_4Q_5) + (1 - Q_1)(1 - Q_2)(2Q_3Q_4Q_5 - Q_3Q_4 - Q_3Q_5 - Q_4Q_5).$$

Для однородной структуры соответствующий полином отказа имеет вид:

$T(Q) = 2Q - 3Q^2 + 4Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5$. Генем данной структуры равен $\vec{\chi}_1 = (0, 2, -3, 4, -5, 2)$. В рассматриваемом случае полином отказа представляет собой немонотонную функцию, не сохраняющую «1», т.е. $T(0) = 0$, $T(1) = 0$.

Для правой структуры (рисунок 2.1.19) результаты будут аналогичные.

Вариант 5. Два инверсных элемента находятся на противоположных гранях простой H-сети (рисунок 2.1.20).

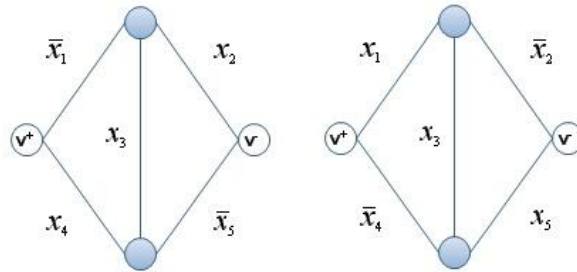


Рисунок 2.1.20 - Мостиковая структура с инверсными противоположными гранями

Полином отказа для левой структуры представляет собой

$$T(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) = (1 - Q_1)(Q_4 - Q_2Q_3Q_4) + (1 - Q_5)(Q_2 - Q_2Q_3Q_4) + (1 - Q_1)(1 - Q_5)(Q_3 - Q_2Q_3 - Q_2Q_4 - Q_3Q_4 + 2Q_2Q_3Q_4) + Q_2Q_3Q_4.$$

Для однородной структуры соответствующий полином отказа имеет вид:

$T(Q) = 3Q - 7Q^2 + 8Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5$. Генем данной структуры равен $\vec{\chi}_1 = (0, 3, -7, 8, -5, 2)$.

В рассматриваемом случае полином отказа представляет собой монотонную функцию, сохраняющую «0» и «1», т.е. $T(0) = 0$, $T(1) = 1$.

Для правой структуры (рисунок 2.1.20) результаты будут аналогичные.

Вариант 6. Два инверсных элемента находятся на грани и перемычке простой H-сети (рисунок 2.1.21).

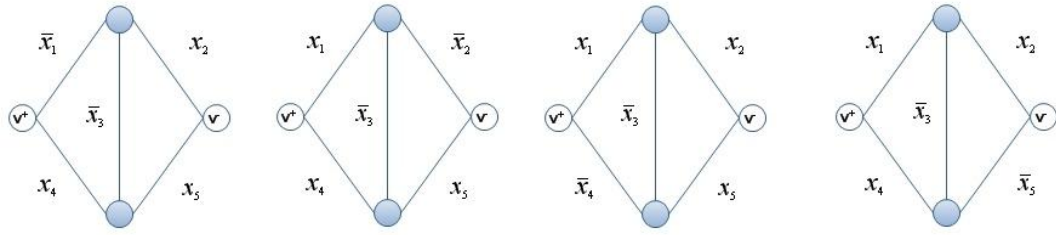


Рисунок 2.1.21 - Мостиковая структура с инверсными гранью и перемычкой

Полином отказа для первой структуры представляет собой

$$T(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) = (1 - Q_1)(Q_4 - Q_2 Q_4 Q_5) + (1 - Q_3)(Q_2 Q_4 - Q_2 Q_4 Q_5) + \\ + (1 - Q_1)(1 - Q_3)(Q_5 - Q_2 Q_5 - Q_2 Q_4 - Q_4 Q_5 + 2Q_2 Q_4 Q_5) + Q_2 Q_5.$$

Для однородной структуры соответствующий полином отказа имеет вид:

$$T(Q) = 2Q - 4Q^2 + 6Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5. \quad \text{Геном данной структуры равен} \\ \vec{\chi}_1 = (0, 2, -4, 6, -5, 2).$$

В рассматриваемом случае полином отказа представляют собой монотонную функцию, сохраняющую «0» и «1», т.е. $T(0) = 0$, $T(1) = 1$.

Для оставшихся структур (рисунок 2.1.21) результаты будут аналогичные.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие промежуточные выводы:

➤ для структур (монотонных и немонотонных), введено обобщенное понятие генома структуры, представляющего собой вектор $\vec{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$, компонентами которого являются коэффициенты полинома функции отказа структуры, составленной из однородных элементов;

➤ если $\chi_0 = 0$ и сумма компонент вектора равна 1, то полином функции структурного отказа $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$ описывает монотонную структуру СЛО;

➤ если $\chi_0 = 0$ и сумма компонент вектора равна 0, то структура СЛО является немонотонной и полином функции структурного отказа не сохраняет «1» (т.е. $T(1) = 0$);

➤ если $\chi_0 = 1$ и сумма компонент вектора равна 1, то структура СЛО является немонотонной и полином функции структурного отказа не сохраняет «0» (т.е. $T(0) = 1$);

➤ если $\chi_0 = 1$ и сумма компонент вектора равна 0, то структура СЛО является немонотонной и полином функции структурного отказа не сохраняет «0» и «1» (т.е. $T(0) = 1, T(1) = 0$).

2.2 Исследование структурной надежности СЛО

Продолжая раскрывать первое направление предлагаемого подхода к решению проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, остановимся на исследовании структурно-топологических частных показателей качества функционирования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СЛО в различных реконфигурируемых состояниях, определяемых набором отказавших и работоспособных (частично работоспособных) ФЭ, с использованием предложенной концепции генома структурного построения объектов.

Одним из таких структурно-топологических показателей может являться показатель структурной надежности (структурного отказа), т.е. интегральная оценка надежности (отказа) СЛО, связанная с ее структурным построением.

2.2.1 Показатель структурной надежности (отказа). Логико-вероятностный подход.

Используя введенную концепцию генома структуры системы, можно вычислить интегральные оценки структурного отказа СЛО.

Так в случае вероятностного описания отказов ФЭ для однородной монотонной или немонотонной структуры (одинаковая вероятность отказа ФЭ системы) функция отказа системы, представленная полиномом $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$, изменяет свои значения в интервале $[0, 1]$. При-

чем, чем ближе график функции отказа к прямой $T(Q) = 1$, тем менее надежна по своему структурному построению СЛО. Поэтому в качестве интегрального показателя структурного отказа системы в этом случае предлагается в [272,273] использовать

$F_{однор}(\chi) = \int_0^1 T(Q) dQ$. Тогда для вычисления показателя структурного

отказа СЛО можно использовать геном структуры по следующей формуле

$$F_{однор}(\chi) = \int_0^1 T(Q) dQ = \int_0^1 (\chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n) dQ = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1})^T.$$

Аналогично в случае неоднородной структуры (различная вероятность отказа ФЭ системы) можно использовать в качестве интегрального показателя

структурного отказа СЛО $F_{неоднор}(\chi) = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) dQ_1 dQ_2 \dots dQ_n$ или с использованием

генама структуры формулу

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

Следует отметить, что для вычисления $F_{неоднор}$ достаточно в полиноме $T(Q)$ вместо Q подставить $1/2$, т.е. $F_{неоднор} = T(0.5)$. Этот же результат был получен в работе [212].

2.2.2 Показатель структурной надежности (отказа). Нечетко-возможностный подход

Хотя вероятностные методы широко и успешно применяются в научных исследованиях для моделирования аспектов неясности и неопределенности, проявляется повышенный интерес к невероятностным моделям случайности, нечеткости и неопределенности.

Это вызвано тем, что зачастую объекты, входящие в структуру СЛО, не имеют хорошо определенной стохастической компоненты. Если же ее удастся выявить, то возникают проблемы построения и проверки на адекватность вероятно-

стной модели. Указанные проблемы связаны со следующими причинами [195,244,267]:

во-первых, построение вероятностной модели требует больших объемов наблюдений, которые, как правило, оказываются неполными, неточными и противоречивыми;

во-вторых, процесс построения большой выборки наблюдений длителен по времени, в течение которого СЛО и окружающая ее среда изменяется, что приводит к неадекватности получаемых вероятностных закономерностей;

в-третьих, если указанные выше трудности решены, то построенная вероятностная модель может оказаться настолько сложной для ее использования на практике.

Для моделирования структурной надежности (отказа) СЛО в условиях выше упомянутых причин воспользуемся нечетко-возможностным подходом, в основе которого лежит понятие пространства с мерой возможности.

Пространство с мерой возможности можно представить как совокупность $(X, \beta(X), P)$ трех объектов: множество X элементарных событий, $\beta(X)$ σ -алгебры всех подмножеств X , называемых событиями, и функции $P: \beta(X) \rightarrow [0,1]$, называемой мерой возможности ($P(A)$ - возможность события $A \in \beta(X)$), обладающей следующими свойствами.

1. $P(A \cup B) = \max(P(A), P(B)), \forall A, B \in \beta(X)$ - аддитивность.
2. $P(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i) = \sup_i P(A_i) \forall A_i \in \beta(X), i = 1, 2, \dots$ - счетная аддитивность.
3. $A \subseteq B \Rightarrow P(A) \leq P(B) \forall A, B \in \beta(X)$ - монотонность.
4. $P(\emptyset) = 0, P(X) = 1$ - нормировка.
5. $P(\bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcap_{i \geq n} A_i) \leq \sup_n \inf_{i \geq n} P(A_i)$ - полунепрерывность снизу.

Возможность события $A \in \beta(X)$ определяется функцией распределения возможности $g: X \rightarrow [0,1]$ следующим образом $P(A) = \sup_{x \in A} g(x)$. В пространстве с

мерой возможности определяется нечеткий элемент $\mu \equiv \eta(\bullet)$ ($\eta: X \rightarrow [0,1]$ - измеримая функция), функцию принадлежности которого будем интерпретировать как функцию распределения возможностей $\eta(x) = P(\{x\}) = g(x), \forall x \in X$.

Далее будем предполагать, что структура СЛО состоит из нечетких элементов $\mu_i \equiv \eta_i(\bullet), i = 1, 2, \dots, n$, характеризующих возможность отказа ФЭ структуры. Рассмотрим две простые неразложимые П-сети $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ и $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$ с нечеткими элементами (рисунок 2.2.1).

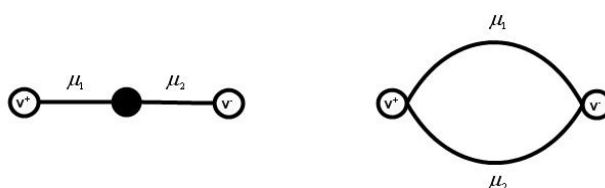


Рисунок 2.2.1 - Простые неразложимые П-сети

Тогда для первой структуры $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ функцию распределения возможности отказа структуры можно записать, используя операции с нечеткими элементами, следующим образом $T_2^s(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \vee \mu_2$, а для второй структуры $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$ - $T_2^p(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \wedge \mu_2$. Заменяя операции \wedge, \vee на алгебраическое произведение и сумму, получим в первом случае $T_2^s(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \cdot \mu_2$, а во втором $T_2^p(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \cdot \mu_2$.

Применив этот подход для произвольной сетевой структуры, полином возможности отказа структуры с однородными нечеткими элементами ($\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = \mu$) примет вид $T(\mu) = \chi_0 + \chi_1\mu + \chi_2\mu^2 + \dots + \chi_n\mu^n$, где $\vec{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ - геном структуры.

Рассмотрим вопрос, связанный с построением интегрального показателя возможности отказа структуры.

Согласно теории возможности [195] на классе функций $L(X)$ определен интеграл по мере возможности. Класс функций $L(X)$ обладает следующими свойствами.

Он включает в себя функции $f : X \rightarrow L$, где $L = ([0, 1], \leq, +, \bullet)$ шкала значений возможности на отрезке $[0, 1]$, упорядоченных неравенством \leq , с операциями сложения «+» и умножения « \bullet »: $a + b = \max\{a, b\}$ и $a \bullet b = \min\{a, b\}$, обладающих свойствами.

$$1. \forall \alpha \in [0, 1], \forall f \in L(X) \Rightarrow \alpha \bullet f \in L(X).$$

2. $\forall f \in L(X), \forall v : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ - инволюции (непрерывной строго монотонно убывающей функции $v(0) = 1, v(1) = 0$) $\Rightarrow v \circ f = v(f(x)) \in L(X)$.

$$3. \forall f_i \in L(X), i = 1, 2, \dots \Rightarrow \bigoplus_{i=1}^{\infty} f_i(x) = \sup_i f_i(x) \in L(X), \bigodot_{i=1}^{\infty} f_i(x) = \inf_i f_i(x) \in L(X).$$

Интеграл $p : L(X) \rightarrow L$ по мере возможности $P(A) = \sup_{x \in A} g(x)$, заданной распределением g , определен [195] следующим образом:

$$p(f) = \sup_{x \in X} \min\{f(x), g(x)\}.$$

Введенный Суджено [126] нечеткий интеграл от $f \in L(X)$ по нечеткой мере вычисляется по следующей формуле $s(f) = \sup_{\alpha \in [0, 1]} \min\{\alpha, P(\{x | f(x) \geq \alpha\})\}$. Если мера возможности задана распределением $g \in L(X)$, то интегрирование по Суджено и интегрирование введенное [195] дает одинаковый результат. Действительно,

$$\begin{aligned} s(f) &= \sup_{\alpha \in [0, 1]} \min\{\alpha, P(\{x | f(x) \geq \alpha\})\} = \sup_{\alpha \in [0, 1]} \min\{\alpha, \sup_{x \in X} \{g(x) | f(x) \geq \alpha\}\} = \\ &= \sup_{\alpha \in [0, 1]} \sup_{\substack{x \in X \\ f(x) \geq \alpha}} \min\{\alpha, g(x)\} = \sup_{x \in X} \sup_{f(x) \geq \alpha \geq 0} \min\{\alpha, g(x)\} = \sup_{x \in X} \min\{f(x), g(x)\} = p(f). \end{aligned}$$

Полином возможности отказа структуры $T(\mu) = \chi_0 + \chi_1 \mu + \chi_2 \mu^2 + \dots + \chi_n \mu^n$ всегда находится в пределах $0 \leq T(\mu) \leq 1$. Для монотонных структур $T(\mu)$ монотонно возрастает и $T(0) = 0, T(1) = 1$. Для немонотонных структур полиномы возможности отказа могут либо не сохранять «0» ($T(0) = 1$), либо не сохранять «1» ($T(1) = 0$), либо то и другое ($T(0) = 1, T(1) = 0$). Однако, полиномы возможности отказа являются функциями $T : [0, 1] \rightarrow L$. Другими словами, полиномы возможно-

сти отказа как для монотонных, так и для немонотонных структур относятся к классу $L([0, 1])$.

Тогда в качестве интегрального показателя возможности отказа структуры можно использовать вышеописанный интеграл по мере возможности

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

Для вычисления интегрального показателя возможности отказа структуры следует определить меру возможности и, если возможно, ее функцию распределения $g(\mu) \in L(X)$.

Для *монотонных однородных структур* график полинома функции структурного отказа имеют вид, представленный на рисунке 2.2.2.

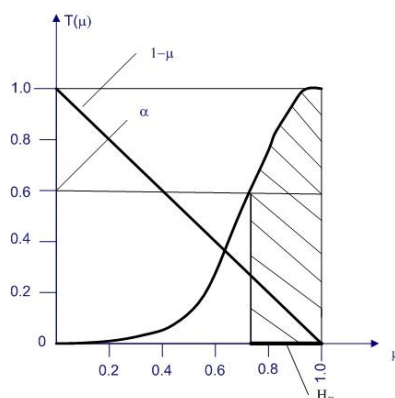


Рисунок 2.2.2 - График полинома монотонной структуры

В качестве меры возможности будем использовать $P(\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}) = P(H_\alpha) = \sup_{A \subseteq H_\alpha} |A| = \sup_{T(\mu) \geq \alpha} \{1 - \mu\}$, где $|A|$ -мера Лебега. Следовательно, в случае монотонных однородных структур функцией распределения меры возможности является $g(\mu) = 1 - \mu$.

Учитывая все вышесказанное для рассматриваемого случая нечетко-возможностного описания отказов элементов системы интегральный показатель возможности отказа структуры можно вычислять по формуле $F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}) = 1 - \mu_*$, где μ_* — решение уравнения $(\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot (1, \mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = 1 - \mu_*$.

Для *немонотонных однородных структур* рассмотрим несколько вариантов.

Вариант 1. Полином возможности отказа (рисунок 2.2.3) не сохраняет «0» и «1» ($T(0) = 1, T(1) = 0$).

В данном случае $P(\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}) = P(H_\alpha) = \sup_{A \subseteq H_\alpha} |A| = \sup_{T(\mu) \geq \alpha} \{\mu\}$ и соответственно ее функцией распределения является $g(\mu) = \mu$.

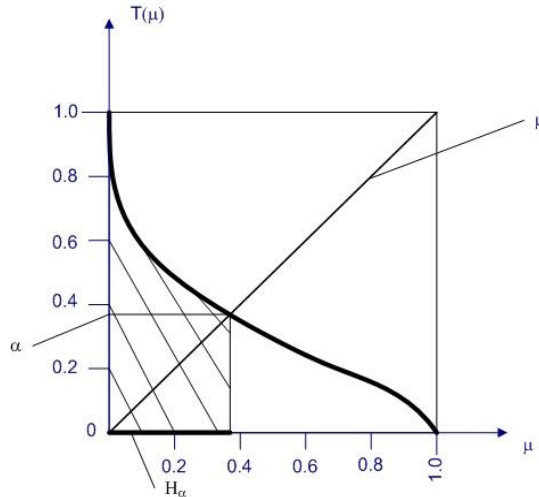


Рисунок 2.2.3 - График полинома немонотонной структуры (не сохраняет «0» и «1»)

Графическая интерпретация нахождения интегрального показателя возможности отказа выше приведенных случаев изображена на рисунке 2.2.4.

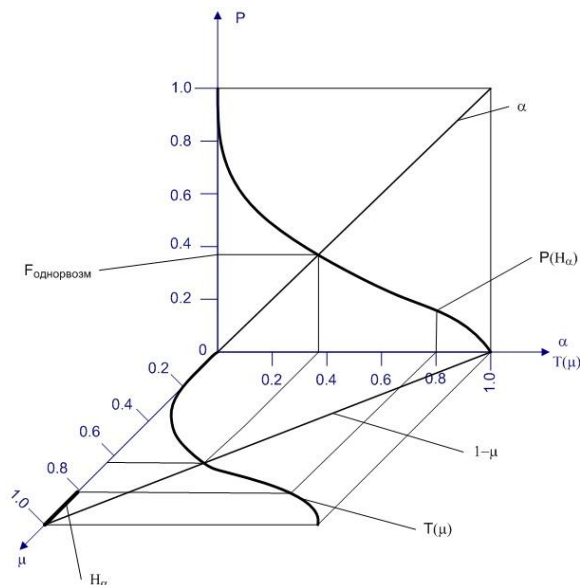


Рисунок 2.2.4 - Графическая интерпретация нахождения интегрального показателя возможности отказа монотонных и немонотонных (*вариант 1*) однородных структур

Для данного варианта интегральный показатель возможности отказа структуры можно вычислять следующим образом $F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}) = \mu_*$, где μ_* — решение уравнения $(\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot (1, \mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = \mu_*$.

Вариант 2. Полином возможности отказа немонотонной структуры либо не сохраняет «0» ($T(0) = 1$), либо не сохраняет «1» ($T(1) = 0$). Графики полиномов возможности отказа указанного варианта представлены на рисунке 2.2.5.

Мера возможности, когда $T(1) = 0$, есть $P(\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}) = P(H_\alpha) = \sup_{A \subseteq H_\alpha} |A| = \sup\{\mu^{\max} - \mu^{\min}\}$, где $\mu^{\max} = \sup\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}$ и $\mu^{\min} = \inf\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}$.

Мера возможности, когда $T(0) = 1$, есть $P(\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\}) = P(H_\alpha) = \sup_{A \subseteq H_\alpha} |A| = \sup\{1 - (\mu^{\max} - \mu^{\min})\}$, где $\mu^{\max} = \sup\{\mu | T(\mu) \leq \alpha\}$ и $\mu^{\min} = \inf\{\mu | T(\mu) \leq \alpha\}$.

Графическая интерпретация нахождения интегрального показателя возможности отказа в данном случае представлена на рисунке 2.2.5.

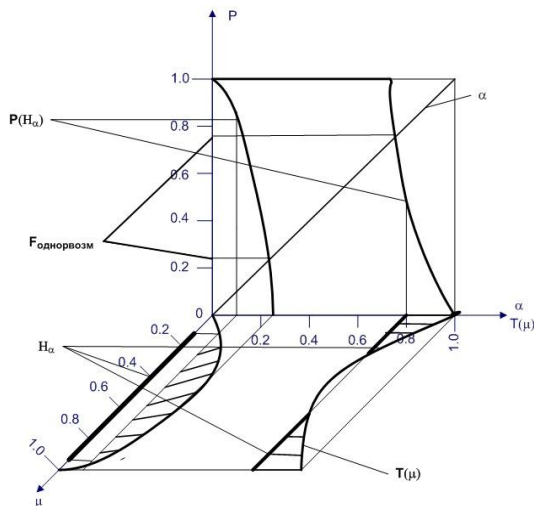


Рисунок 2.2.5 - Графическая интерпретация нахождения интегрального показателя возможности отказа немонотонных (*вариант 2*) однородных структур

Показатели значимости и вкладов отдельных ФЭ СЛО в структурную надежность (отказ).

Наряду с вычислением показателей структурного отказа (структурной надежности) СЛО, предлагаемый подход можно использовать для определения значимости, положительного и отрицательного вкладов отдельных ФЭ системы в ее структурный отказ (надежность). Для вычисления значимости i -го элемента в структурный отказ СЛО следует воспользоваться следующим полиномом [52,113,114,210,226]:

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

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

Наряду с характеристиками значимости ФЭ СЛО большое значение имеют показатели положительного и отрицательного вкладов этих элементов в ее структурный отказ (надежность). Это вызвано тем, что показатель значимости i -го ФЭ системы не зависит от текущего значения параметра Q_i . Значимость элемента СЛО характеризует влияние на систему только предельно возможного изменения этого параметра от 0 до 1.

Однако в действительности изменение параметра отказа i -го элемента осуществляется от его текущего значения либо до 1, либо до 0. Поэтому, вклады элементов характеризуют насколько изменится значение показателя структурного отказа (надежности) при указанных вариантах изменений параметра Q_i исследуемой системы. Полиномы для вычисления положительных и отрицательных вкладов элементов имеют следующий вид [52,113,114,210,226]:

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

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

В работах [52,113,114,210,226] значимость и вклады i -го элемента рассчитываются по следующим формулам:

$$g_i = \xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)|_{Q_i=0.5, i=1, \dots, n}, \beta_i^+ = B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)|_{Q_i=0.5, i=1, \dots, n},$$

$\beta_i^- = B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)|_{Q_i=0.5, i=1, \dots, n}$, где запись $Q_i = 0.5, i = 1, \dots, n$ — означает, что в соответствующий полином вместо всех Q_i необходимо подставить 0.5.

Каждому из рассматриваемых полиномов $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, $B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ можно сопоставить соответствующий геном $\vec{\chi}_\xi^i$, $\vec{\chi}_+^i$, $\vec{\chi}_-^i$, используя которые можно вычислять значимость и вклады ФЭ в структурное построение СЛО как с использованием однородных и неоднородных вероятностных оценок, так и с помощью возможностей оценок по формулам, приведенным в параграфах 2.2.1-2.2.2.

Кроме того, важно отметить, что полиномы $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, $B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ вне зависимости от того характеризует ли полином отказа $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ монотонную или немонотонную структуру могут иметь одно из ниже перечисленных свойств:

- монотонно возрастают, сохраняют «0» и «1» (т. е. $\xi_i(0) = 0, \xi_i(1) = 1$; $\beta_i^+(0) = 0; \beta_i^+(1) = 1; \beta_i^-(0) = 0, \beta_i^-(1) = 1$);
- монотонно убывают, не сохраняют «0» и «1» (т. е. $\xi_i(0) = 1, \xi_i(1) = 0$; $\beta_i^+(0) = 1, \beta_i^+(1) = 0; \beta_i^-(0) = 1, \beta_i^-(1) = 0$);
- немонотонны, сохраняют либо «0», либо «1» (т. е. $\xi_i(0) = 1, \xi_i(1) = 1$; $\xi_i(0) = 0, \xi_i(1) = 0; \beta_i^+(0) = 1, \beta_i^+(1) = 1; \beta_i^+(0) = 0, \beta_i^+(1) = 0; \beta_i^-(0) = 1, \beta_i^-(1) = 1; \beta_i^-(0) = 0, \beta_i^-(1) = 0$).

Следует отметить, что нулевое значение значимости i -го ФЭ говорит о том, что данный элемент не влияет на показатель структурного отказа системы, положительное значение значимости i -го ФЭ характеризует отрицательное влияние i -

го элемента на структурный отказ системы, отрицательное значение значимости i -го ФЭ определяет то максимально возможное уменьшение структурного отказа системы, если перевести элемент в безотказное состояние.

2.2.3 Исследование структурной надежности П-структур.

Проведем исследование структурной надежности монотонных П-сетей с использованием изложенных выше подходов. Любая монотонная П-сеть [44,266] образуется путем суперпозиции простейших неразложимых сетей Γ_2^p и Γ_2^s (рисунков 2.2.1), которые являются «кирпичиками» параллельно-последовательных монотонных структур (П-структур). Начнем анализ структурной надежности с этих «кирпичиков». Полиномы структурного отказа (надежности), вычисляемые с использованием логико-вероятностного и нечетко-возможностного подходов, получаются из предположения независимости событий [52,113,114,210,226]. Пусть события зависимые, тогда для структуры $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ полином структурной надежности с использованием условной вероятности имеет вид $R_2^s(p_1, p_2) = P(x_1 \wedge x_2) = P(x_2|x_1) \cdot P(x_1)$. Условная вероятность надежной работы элемента x_2 при условии безотказной работы элемента x_1 может быть либо $P(x_2|x_1) \leq P(x_2)$, либо $P(x_2|x_1) \geq P(x_2)$.

Рассмотрим *первый случай* $P(x_2|x_1) \leq P(x_2)$. Введем параметр $\lambda \in [0,1]$ и пусть $P(x_2|x_1) = \lambda P(x_2) = \lambda p_2$. В этом случае $R_2^s(p_1, p_2) = \lambda p_1 p_2$. Для структуры с нечетким описанием по аналогии будем считать, что $R_2^s(\mu_1, \mu_2) = \lambda \mu_1 \mu_2$. Произведем расчет интегральных показателей структуры $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ в рассматриваемом случае.

$$F_{\text{неоднор}}(R_2^s(p_1, p_2)) = \iint_{[0,1]} \lambda p_1 p_2 dp_1 dp_2 = \frac{\lambda}{4}. \quad F_{\text{однор}}(R_2^s(p_1, p_2)) = \int_{[0,1]} \lambda p^2 dp = \frac{\lambda}{3}.$$

$$F_{\text{однорвозм}}(R_2^s(\mu_1, \mu_2)) = 1 - \mu_* = \frac{2\lambda + 1 - \sqrt{1 + 4\lambda}}{2\lambda}, \text{ т.к. } \lambda \mu_*^2 = 1 - \mu_*.$$

Значения интегральных показателей для различных значений параметра λ приведены на рисунке 2.2.6.



Рисунок 2.2.6 - Интегральные оценки структурной надежности $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$

Таким образом, интегральная возможностная оценка структурной надежности в условиях независимости событий ($\lambda = 1$) является верхней оценкой структурной надежности сети $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$.

Рассмотрим *второй случай* $P(x_2|x_1) \geq P(x_2)$. Поскольку $0 \leq P(x_2|x_1) \leq 1$, то введем обозначение $\tilde{p}_2 = P(x_2|x_1)$. Тогда полином структурной надежности $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ будет иметь вид $R_2^s(p_1, p_2) = p_1 \tilde{p}_2$. Для структуры с нечетким описанием полином имеет вид $R_2^s(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \tilde{\mu}_2$. Интегральные показатели структуры $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ будут иметь значения соответствующие значениям, полученным для первого случая при $\lambda = 1$. Следовательно, интегральная возможностная оценка (при $\lambda = 1$) является наибольшей оценкой структурной надежности сети $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$.

Полином структурной надежности сети $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$ при условии зависимых события представляет собой $R_2^p(p_1, p_2) = 1 - P(\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2) = 1 - P(\bar{x}_2|\bar{x}_1) \cdot P(\bar{x}_1)$. Для случая $P(\bar{x}_2|\bar{x}_1) \leq P(\bar{x}_2)$ полином структурной надежности равен $R_2^p(p_1, p_2) = 1 - \lambda(1 - p_1)(1 - p_2)$, т.е. $R_2^p(p_1, p_2) = 1 - \lambda + \lambda(p_1 + p_2) - \lambda p_1 p_2$. Если события несовместные ($\lambda = 0$), то $R_2^p(p_1, p_2) = 1$. Если события независимые ($\lambda = 1$),

то $R_2^p(p_1, p_2) = p_1 + p_2 - p_1 p_2$. Что совпадает с правилами преобразования конъюнкций и дизъюнкций при построении полинома надежности (отказа) [226]. Аналогично полином надежности запишем для структуры с нечеткими элементами $R_2^p(\mu_1, \mu_2) = 1 - \lambda + \lambda(\mu_1 + \mu_2) - \lambda\mu_1\mu_2$.

Тогда интегральные показатели структуры $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$, введенные выше, рассчитываются по следующим формулам:

$$F_{\text{неоднор}}(R_2^p(p_1, p_2)) = \iint_{[0,1]} (1 - \lambda + \lambda(p_1 + p_2) - \lambda p_1 p_2) dp_1 dp_2 = 1 - \frac{\lambda}{4}.$$

$$F_{\text{однор}}(R_2^p(p_1, p_2)) = \int_{[0,1]} (1 - \lambda + 2\lambda p - \lambda p^2) dp = 1 - \frac{\lambda}{3}.$$

$$F_{\text{однорвозм}}(R_2^p(\mu_1, \mu_2)) = 1 - \mu_* = \frac{\sqrt{1 + 4\lambda} - 1}{2\lambda}, \text{ т.к. } 1 - \lambda + 2\lambda\mu_* - \lambda\mu_*^2 = 1 - \mu_*.$$

Значения интегральных показателей для различных значений параметра λ приведены на рисунке 2.2.7.



Рисунок 2.2.7 - Интегральные оценки структурной надежности $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$

Таким образом, интегральная возможностная оценка структурной надежности в условиях независимости событий ($\lambda = 1$) является нижней оценкой структурной надежности сети $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$.

В заключении проведем исследование интегральных возможностных показателей структурной надежности (отказа) для неоднородных П-сетей. Вычислим

возможностные оценки для структур $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ и $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$, состоящих из неоднородных элементов. Обозначим интегральную возможностную оценку неоднородной сети через $F_{\hat{\alpha}\hat{\alpha}\hat{\alpha}\hat{\alpha}\hat{\alpha}\hat{\alpha}}$.

Для сети $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$

$$F_{\text{неодвозм}}(R_2^s(\mu_1, \mu_2)) = \iint_{[0,1]} (R_2^s(\mu_1, \mu_2) \circ P_1) \circ P_2 = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} R_2^s(\mu_1, \mu_2) \circ P_1 \right) \circ P_2 = \frac{3-\sqrt{5}}{2}.$$

$$\int_{[0,1]} R_2^s(\mu_1, \mu_2) \circ P_1 = 1 - \mu_1^* = \frac{\mu_2}{1 + \mu_2}, \text{ т.к. } \mu_1^* \mu_2 = 1 - \mu_1^*.$$

$$\int_{[0,1]} \frac{\mu_2}{1 + \mu_2} \circ P_2 = 1 - \mu_2^* = \frac{3-\sqrt{5}}{2}, \text{ т.к. } \frac{\mu_2^*}{1 + \mu_2^*} = 1 - \mu_2^* \Rightarrow \mu_2^* = \frac{\sqrt{5}-1}{2}.$$

Для сети $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$

$$F_{\text{неодвозм}}(R_2^p(\mu_1, \mu_2)) = \iint_{[0,1]} (R_2^p(\mu_1, \mu_2) \circ P_1) \circ P_2 = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} R_2^p(\mu_1, \mu_2) \circ P_1 \right) \circ P_2 = \frac{\sqrt{5}-1}{2}.$$

$$\int_{[0,1]} R_2^p(\mu_1, \mu_2) \circ P_1 = 1 - \mu_1^* = \frac{1}{2 - \mu_2}, \text{ т.к. } \mu_1^* + \mu_2 - \mu_1^* \mu_2 = 1 - \mu_1^*.$$

$$\int_{[0,1]} \frac{1}{2 - \mu_2} \circ P_2 = 1 - \mu_2^* = \frac{\sqrt{5}-1}{2}, \text{ т.к. } \frac{1}{2 - \mu_2^*} = 1 - \mu_2^* \Rightarrow \mu_2^* = \frac{3-\sqrt{5}}{2}.$$

Полученные результаты совпадают с возможностными оценками однородной сети

$$F_{\text{однорвозм}}(R_2^s(\mu_1, \mu_2)) = \frac{2\lambda + 1 - \sqrt{1 + 4\lambda}}{2\lambda}, \quad F_{\text{однорвозм}}(R_2^p(\mu_1, \mu_2)) = \frac{\sqrt{1 + 4\lambda} - 1}{2\lambda}$$

(при $\lambda = 1$).

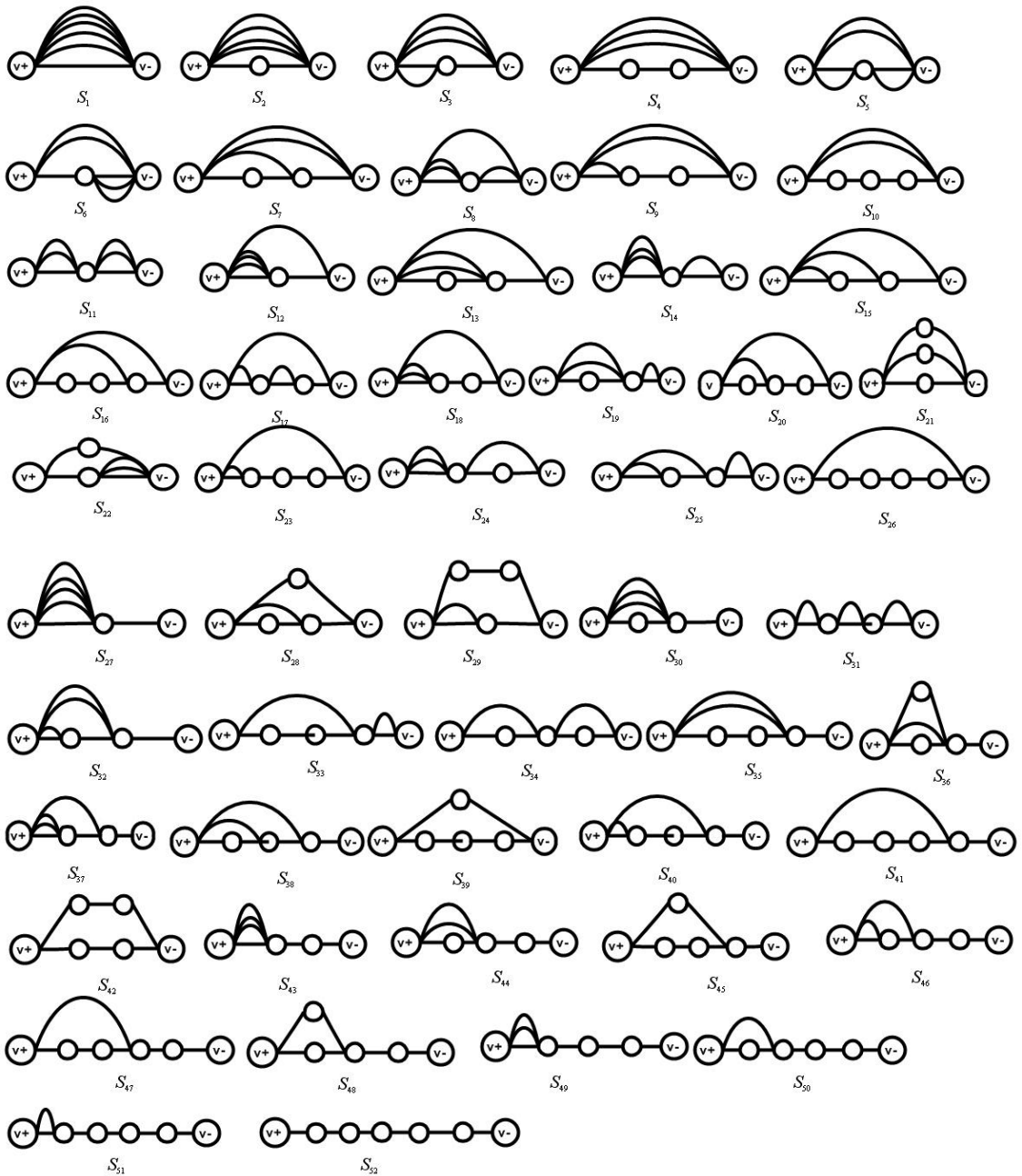


Рисунок 2.2.8 - П-сети, составленные из шести элементов

Учитывая тот факт, что любая П-сеть является суперпозицией сетей $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ и $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$, можно предположить, что данные свойства будут сохраняться и для всех П-сетей. Проверим данное предположение на следующем примере. Рассмотрим различные П-сети, составленные из шести элементов (дуг) (рисунок 2.2.8).

Результаты вычислительных экспериментов представлены на рисунке 2.2.9.



Рисунок 2.2.9 - Результаты вычисления интегральных оценок отказа структур

Проведенные исследования позволяют сделать некоторые промежуточные выводы:

- полученные результаты позволяют провести сравнительный анализ топологии структур СЛО (так при приближении рассматриваемых П-сетей к своим предельным состояниям S_1 (самая надежная из рассматриваемых сетей) и S_{52} (самая ненадежная из рассматриваемых сетей) наблюдается расхождение значений интегральных показателей, что позволяет ввести шкалу для сравнения структур по их месту положения от своих крайних структур S_1, S_{52} , которая отражает наличие или отсутствие в структуре дублирующих связей);
- полученные интегральные оценки возможности структурной надежности (отказа) однородной сети и вероятностной оценки структурной надежности (отказа) неоднородной сети являются верхними и нижними границами интегрального показателя структурной надежности (отказа) СЛО;
- интегральные вероятностные оценки структурной надежности (отказа) однородной структуры расположены между интегральной вероятностной

оценкой неоднородной сети и показателем возможности структурной надежности (отказа) однородной сети;

➤ обобщенная интегральная оценка структурной надежности (отказа) СЛО может быть представлена с использованием введенных вероятностных и возможностных показателей в виде числового интервала (в общем случае – нечетким треугольным или трапециевидальным числом [62,126,172]).

2.2.4 Исследование структурной надежности Н-структур.

Проведем исследование структурной надежности (отказа) Н-структур. Для начала рассмотрим влияние на структурную надежность (отказ) выполнения операций подразбиения ребер и введение связей между существующими и вновь образованными вершинами (структурная реконфигурация) простейших Н-сетей.

Операция подразбиения ребер Н-сети. Результатом выполнения операции подразбиения ребер простейшей Н-сети (мостиковой структуры) являются Н-сети, представленные на рисунке 2.2.10.

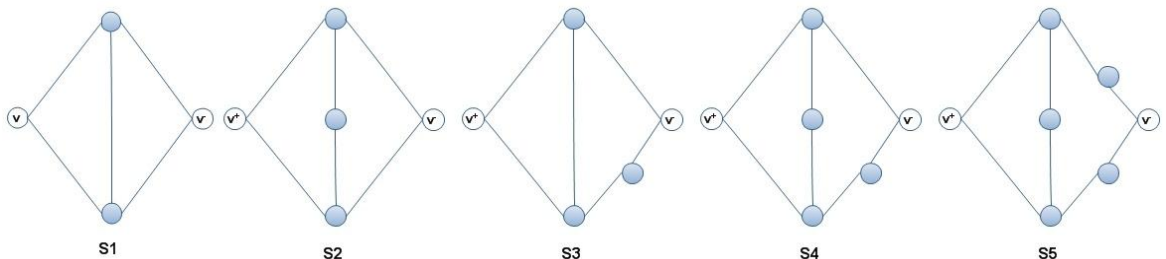


Рисунок 2.2.10 - Операция подразбиения ребер Н-сети

Геномы представленных Н-сетей имеют следующие значения:

$$\vec{\chi}_{S1} = (0, 2, 2, -5, 2), \quad \vec{\chi}_{S2} = (0, 2, 4, -11, 8, -2), \quad \vec{\chi}_{S3} = (0, 3, 2, -10, 8, -2), \quad \vec{\chi}_{S4} = (0, 3, 5, -21, 23, -11, 2), \\ \vec{\chi}_{S5} = (0, 5, 4, -35, 54, -39, 14, -2).$$

Вычисленные интегральные показатели отказа однородной, неоднородной структуры и возможность отказа однородной структуры приведены на рисунке 2.2.11.

Операция введения новых связей Н-сети. Образовавшиеся после подразбиения ребер внутренние вершины являются *слабыми* вершинами сети, расположен-

ными либо между *минимальными* вершинами, либо между *минимальной* вершиной и *полюсом* сети.

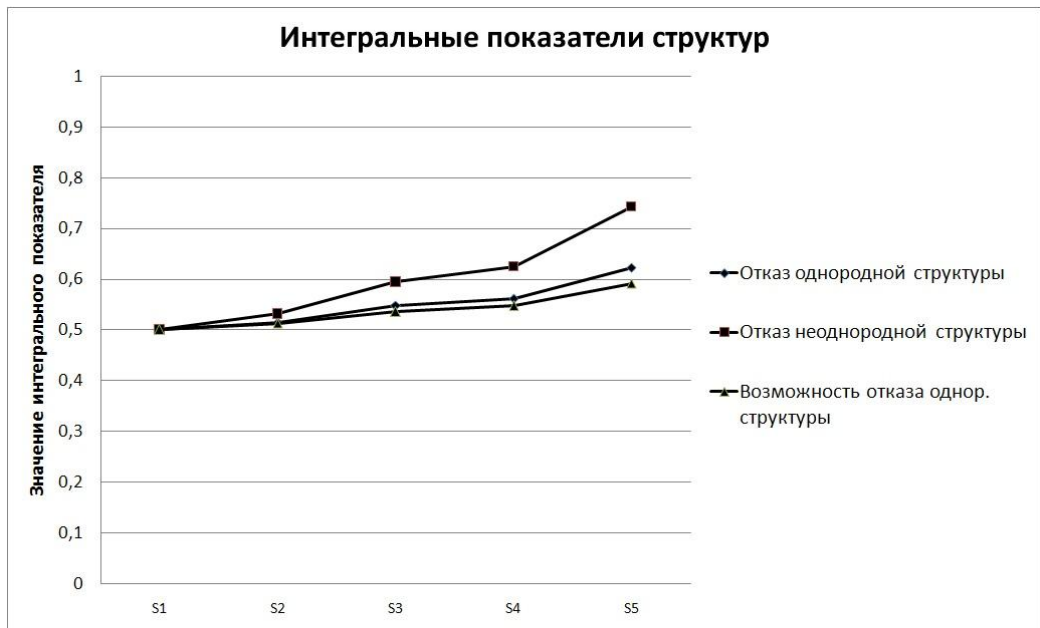


Рисунок 2.2.11 - Интегральные показатели отказа структуры после операции подразделения ребер

Ведем новые ребра между «слабая-полюс» вершинами, «слабая-слабая» вершинами, «слабая-минимальная» вершинами, «минимальная-минимальная» вершинами и «полюс-полюс» вершинами. Вновь образованные сети представлены на рисунке 2.2.12.

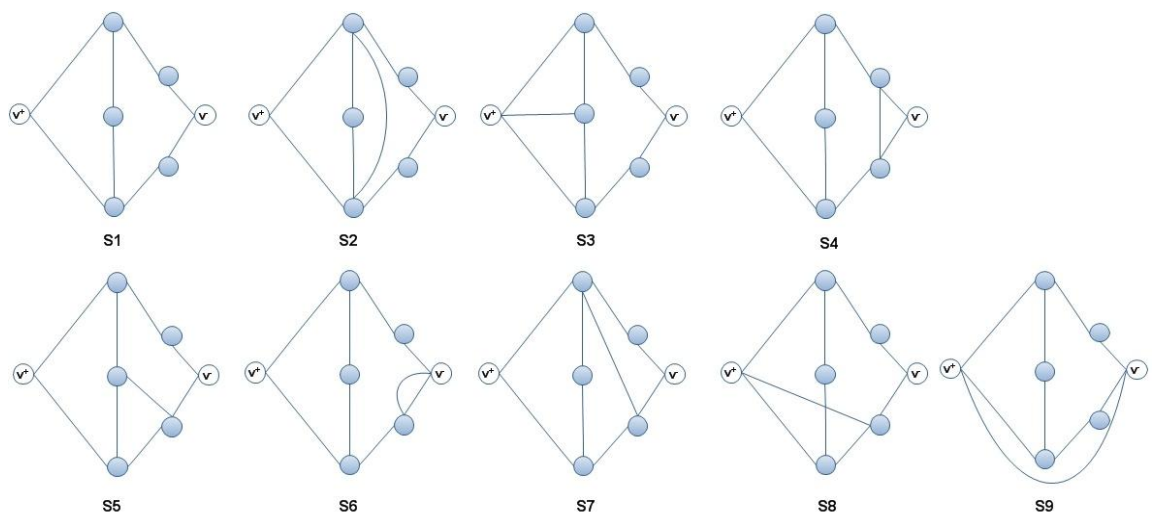


Рисунок 2.2.12 - Вновь образованные Н-сети

Геномы Н-сетей, полученных в результате добавления новых связей, имеют следующие значения:

$$\vec{\chi}_{S1} = (0,5,4,-35,54,-39,14,-2), \vec{\chi}_{S2} = (0,5,-4,5,-28,49,-38,14,-2), \vec{\chi}_{S3} = (0,4,1,-4,-23,54,-47,19,-3),$$

$$\vec{\chi}_{S4} = (0,3,6,-13,-18,59,-56,24,-4),$$

$$\vec{\chi}_{S5} = (0,3,5,-8,-28,69,-61,25,-4), \vec{\chi}_{S6} = (0,3,7,-22,9,20,-26,12,-2), \vec{\chi}_{S7} = (0,3,3,-2,-32,64,-52,20,-3),$$

$$\vec{\chi}_{S8} = (0,2,4,-1,-31,59,-48,19,-3), \vec{\chi}_{S9} = (0,0,5,4,-35,54,-39,14,-2).$$

Интегральные показатели отказа однородных и неоднородных Н-сетей (рисунок 2.2.12), вычисленные с использованием вероятностной меры и меры возможности представлены на рисунке 2.2.13.

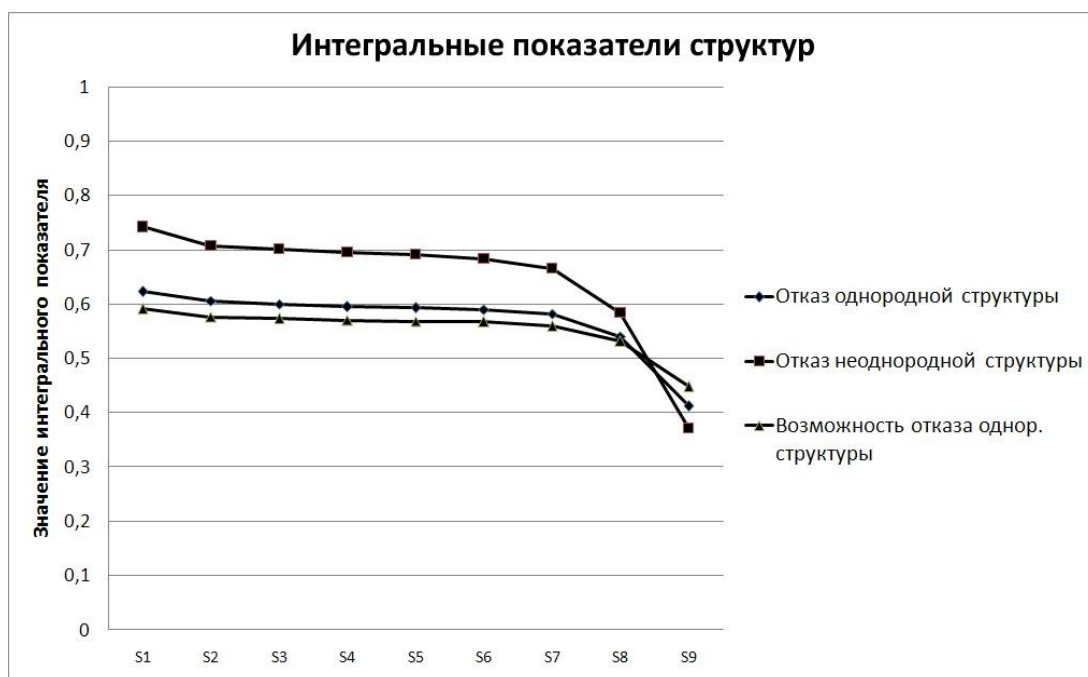


Рисунок 2.2.13 - Интегральные показатели отказа структуры после введения новых связей

Далее исследуем Н-сети с инверсными элементами (рисунок 2.2.14), приведенные в параграфе 2.1.4.

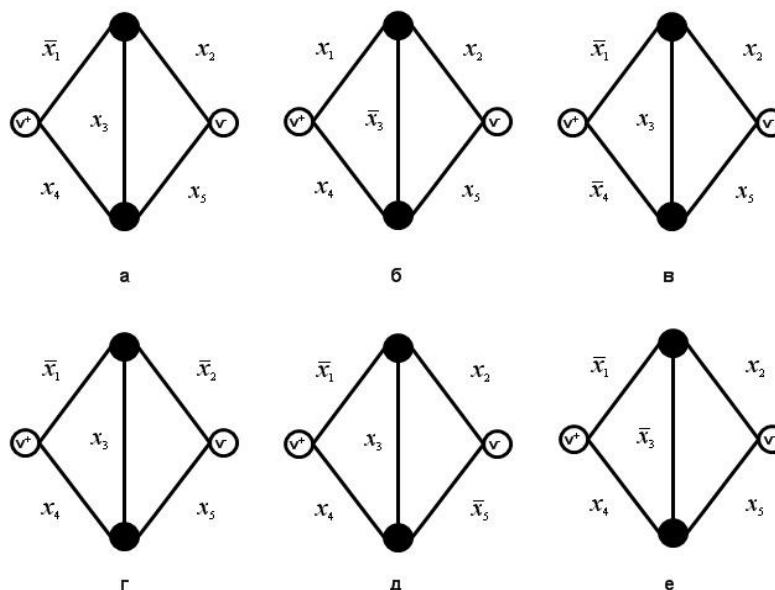


Рисунок 2.2.14 - Мостиковая структура с инверсными ребрами

Для однородных структур (рисунок 2.2.14) полиномы отказа и соответствующие им геномы имеет вид:

$$T_a(q) = q + q^2 - 4q^3 + 5q^4 - 2q^5, \quad \vec{\chi}_a = (0, 1, 1, -4, 5, -2);$$

$$T_b(q) = 4q^2 - 6q^3 + 5q^4 - 2q^5, \quad \vec{\chi}_b = (0, 0, 4, -6, 5, -2);$$

$$T_c(q) = 1 - 2q + q^2 + 4q^3 - 5q^4 + 2q^5, \quad \vec{\chi}_c = (1, -2, 1, 4, -5, 2);$$

$$T_d(q) = 2q - 3q^2 + 4q^3 - 5q^4 + 2q^5, \quad \vec{\chi}_d = (0, 2, -3, 4, -5, 2);$$

$$T_e(q) = 3q - 7q^2 + 8q^3 - 5q^4 + 2q^5, \quad \vec{\chi}_e = (0, 3, -7, 8, -5, 2);$$

$$T_f(q) = 2q - 4q^2 + 6q^3 - 5q^4 + 2q^5, \quad \vec{\chi}_f = (0, 2, -4, 6, -5, 2).$$

Несмотря на то, что структура имеет инверсные элементы, полиномы отказа для вариантов на рисунке 2.2.14 а), б), д), е) представляют собой монотонные функции, сохраняющие «0» и «1» ($T_a(0) = T_b(0) = T_d(0) = T_e(0) = 0$, $T_a(1) = T_b(1) = T_d(1) = T_e(1) = 1$). Для вариантов на рисунке 2.2.14 в), г) полиномы отказа немонотонные и $T_c(0) = 1$, $T_c(1) = 1$, $T_g(0) = 0$, $T_g(1) = 0$.

Произведем расчеты значений интегральных показателей структурного отказа Н-сетей, представленных на рисунке 2.2.14.

Структура на рисунке 2.2.14a имеет следующие значения показателей структурного отказа

$$F_{\text{однор}}(\vec{\chi}_a) = \vec{\chi}_a \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{6}\right)^T = 0.5 ,$$

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}_a) = \vec{\chi}_a \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{32}\right)^T = 0.5 , F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}_a) = 0.5 .$$

Рассмотрим особый случай. Пусть элементы $\{x_2, x_3, x_4, x_5\}$ структуры однородны и имеется инверсный элемент \bar{x}_1 . Проведем расчет интегрального показателя возможности отказа.

$$T_a(\mu_1, \mu) = \mu + 2\mu^2 - 3\mu^3 + \mu^4 - \mu_1(\mu + \mu^2 - 4\mu^3 + 2\mu^4)$$

$$F_{\text{неодвозм}}(T_1(\mu_1, \mu)) = \iint_{[0,1]} (T_a(\mu_1, \mu) \circ G_1) \circ G = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} T_a(\mu_1, \mu) \circ G_1 \right) \circ G = 0.5 .$$

Полином $T_a(\mu_1, \mu)$ монотонно убывает по переменной μ_1 . Следовательно,

$$\int_{[0,1]} T_a(\mu_1, \mu) \circ G_1 = \mu_1^* = \frac{\mu + 2\mu^2 - 3\mu^3 + \mu^4}{1 + \mu + \mu^2 - 4\mu^3 + 2\mu^4}, \text{ т.к. } \mu + 2\mu^2 - 3\mu^3 + \mu^4 - \mu_1^*(\mu + \mu^2 - 4\mu^3 + 2\mu^4) = \mu_1^* .$$

Полином $\frac{\mu + 2\mu^2 - 3\mu^3 + \mu^4}{1 + \mu + \mu^2 - 4\mu^3 + 2\mu^4}$ монотонно возрастает. Следовательно,

$$\int_{[0,1]} \frac{\mu + 2\mu^2 - 3\mu^3 + \mu^4}{1 + \mu + \mu^2 - 4\mu^3 + 2\mu^4} \circ G = 1 - \mu^* = 0.5, \text{ т.к. } \frac{\mu^* + 2\mu^{*2} - 3\mu^{*3} + \mu^{*4}}{1 + \mu^* + \mu^{*2} - 4\mu^{*3} + 2\mu^{*4}} = 1 - \mu^* \Rightarrow \mu^* = 0.5 .$$

Структура на рисунке 2.2.14б имеет следующие значения показателей структурного отказа

$$F_{\text{однор}}(\vec{\chi}_b) = \vec{\chi}_b \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{6}\right)^T = 0.5 ,$$

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}_b) = \vec{\chi}_b \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{32}\right)^T = 0.5 , F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}_b) = 0.5 .$$

Пусть элементы $\{x_1, x_2, x_4, x_5\}$ структуры однородны и имеется инверсный элемент \bar{x}_3 . Вычислим интегральный показатель возможности отказа.

$$T_b(\mu_3, \mu) = 4\mu^2 - 4\mu^3 + \mu^4 - \mu_3(2\mu^2 - 4\mu^3 + 2\mu^4)$$

$$F_{\text{неодвозм}}(T_b(\mu_3, \mu)) = \iint_{[0,1]} (T_b(\mu_3, \mu) \circ G_3) \circ G = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} T_b(\mu_3, \mu) \circ G_3 \right) \circ G = 0.5 .$$

$$\int_{[0,1]} T_b(\mu_3, \mu) \circ G_3 = \mu_3^* = \frac{4\mu^2 - 4\mu^3 + \mu^4}{1 + 2\mu^2 - 4\mu^3 + 2\mu^4}, \text{ т.к. } 4\mu^2 - 4\mu^3 + \mu^4 - \mu_3^*(2\mu^2 - 4\mu^3 + 2\mu^4) = \mu_3^* .$$

$$\int_{[0,1]} \frac{4\mu^2 - 4\mu^3 + \mu^4}{1 + 2\mu^2 - 4\mu^3 + 2\mu^4} \circ G = 1 - \mu^* = 0.5, \text{ т.к. } \frac{4\mu^{*2} - 4\mu^{*3} + \mu^{*4}}{1 + 2\mu^{*2} - 4\mu^{*3} + 2\mu^{*4}} = 1 - \mu^* \Rightarrow \mu^* = 0.5.$$

Структура на рисунке 2.2.14в имеет следующие значения показателей

$$\text{структурного отказа } F_{\text{однор}}(\vec{\chi}_6) = \vec{\chi}_6 \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{6}\right)^T = 0.667,$$

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}_6) = \vec{\chi}_6 \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{32}\right)^T = 0.5, F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}_6) = 0.586.$$

Теперь пусть элементы $\{x_2, x_3, x_5\}$ структуры однородны и инверсные элементы $\{\bar{x}_1, \bar{x}_4\}$ однородные. Проведем расчет значения интегрального показателя возможности отказа.

$$T_6(\mu_1, \mu) = (1 - \mu_1)^2(1 - 3\mu^2 + 2\mu^3) + 2(1 - \mu_1)(\mu^2 - \mu^3) + \mu^2$$

$$F_{\text{неоднорвозм}}(T_6(\mu_1, \mu)) = \iint_{[0,1]} (T_6(\mu_1, \mu) \circ G_1) \circ G = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} T_6(\mu_1, \mu) \circ G_1 \right) \circ G = 0.5.$$

$$\int_{[0,1]} T_6(\mu_1, \mu) \circ G_1 = \mu_1^* = \frac{3 - 4\mu^2 + 2\mu^3 - \sqrt{5 - 12\mu^2 + 4\mu^3 + 16\mu^4 - 16\mu^5 + 4\mu^6}}{2(1 - 3\mu^2 + 2\mu^3)},$$

$$\text{т.к. } (1 - \mu_1^*)^2(1 - 3\mu^2 + 2\mu^3) + 2(1 - \mu_1^*)(\mu^2 - \mu^3) + \mu^2 = \mu_1^*$$

$$\int_{[0,1]} \frac{3 - 4\mu^2 + 2\mu^3 - \sqrt{5 - 12\mu^2 + 4\mu^3 + 16\mu^4 - 16\mu^5 + 4\mu^6}}{2(1 - 3\mu^2 + 2\mu^3)} \circ G = 1 - \mu^* = 0.5,$$

$$\text{т.к. } \frac{3 - 4\mu^{*2} + 2\mu^{*3} - \sqrt{5 - 12\mu^{*2} + 4\mu^{*3} + 16\mu^{*4} - 16\mu^{*5} + 4\mu^{*6}}}{2(1 - 3\mu^{*2} + 2\mu^{*3})} = 1 - \mu^* \Rightarrow \mu^* = 0.5$$

Структура на рисунке 2.2.14г имеет следующие значения показателей

$$\text{структурного отказа } F_{\text{однор}}(\vec{\chi}_2) = \vec{\chi}_2 \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{6}\right)^T = 0.333,$$

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}_2) = \vec{\chi}_2 \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{32}\right)^T = 0.5, F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}_2) = 0.414.$$

Теперь пусть элементы $\{x_3, x_4, x_5\}$ структуры однородны и инверсные элементы $\{\bar{x}_1, \bar{x}_2\}$ однородны. Проведем расчет значения интегрального показателя возможности отказа.

$$T_2(\mu_1, \mu) = (1 - \mu_1)^2(2\mu^3 - 3\mu^2) + 2(1 - \mu_1)(\mu + \mu^2 - \mu^3)$$

$$F_{\text{неодвозм}}(T_2(\mu_1, \mu)) = \iint_{[0,1]} (T_2(\mu_1, \mu) \circ G_1) \circ G = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} T_2(\mu_1, \mu) \circ G_1 \right) \circ G = 0.5 .$$

$$\int_{[0,1]} T_2(\mu_1, \mu) \circ G_1 = \mu_1^* = \frac{1 + 2\mu - 4\mu^2 + 2\mu^3 - \sqrt{1 + 4\mu - 4\mu^2 + 12\mu^3 - 4\mu^4 - 8\mu^5 + 4\mu^6}}{2(2\mu^3 - 3\mu^2)} ,$$

$$\text{т.к. } (1 - \mu_1^*)^2(2\mu^3 - 3\mu^2) + 2(1 - \mu_1^*)(\mu + \mu^2 - \mu^3) = \mu_1^*$$

$$\int_{[0,1]} \frac{1 + 2\mu - 4\mu^2 + 2\mu^3 - \sqrt{1 + 4\mu - 4\mu^2 + 12\mu^3 - 4\mu^4 - 8\mu^5 + 4\mu^6}}{2(2\mu^3 - 3\mu^2)} \circ G = 1 - \mu^* = 0.5,$$

$$\text{т.к. } \frac{1 + 2\mu^* - 4\mu^{*2} + 2\mu^{*3} - \sqrt{1 + 4\mu^* - 4\mu^{*2} + 12\mu^{*3} - 4\mu^{*4} - 8\mu^{*5} + 4\mu^{*6}}}{2(2\mu^{*3} - 3\mu^{*2})} = 1 - \mu^* \Rightarrow \mu^* = 0.5$$

Структура на рисунке 2.2.14d имеет следующие значения показателей

$$\text{структурного отказа } F_{\text{однор}}(\vec{\chi}_d) = \vec{\chi}_d \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{6}\right)^T = 0.5 ,$$

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}_d) = \vec{\chi}_d \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{32}\right)^T = 0.5 , F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}_d) = 0.5 .$$

Теперь пусть элементы $\{x_2, x_3, x_4\}$ структуры однородны и инверсные элементы $\{\bar{x}_1, \bar{x}_5\}$ однородные. Проведем расчет значения интегрального показателя возможности отказа.

$$T_d(\mu_1, \mu) = (1 - \mu_1)^2(\mu - 3\mu^2 + 2\mu^3) + 2(1 - \mu_1)(\mu - \mu^3) + \mu^3$$

$$F_{\text{неодвозм}}(T_d(\mu_1, \mu)) = \iint_{[0,1]} (T_d(\mu_1, \mu) \circ G_1) \circ G = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} T_d(\mu_1, \mu) \circ G_1 \right) \circ G = 0.5 .$$

$$\int_{[0,1]} T_d(\mu_1, \mu) \circ G_1 = \mu_1^* = \frac{1 + 4\mu - 6\mu^2 + 2\mu^3 - \sqrt{1 + 8\mu - 8\mu^2 + 4\mu^3 - 12\mu^4 + 12\mu^5 - 4\mu^6}}{2(\mu - 3\mu^2 + 2\mu^3)} ,$$

$$\text{т.к. } (1 - \mu_1^*)^2(\mu - 3\mu^2 + 2\mu^3) + 2(1 - \mu_1^*)(\mu - \mu^3) + \mu^3 = \mu_1^*$$

$$\int_{[0,1]} \frac{1 + 4\mu - 6\mu^2 + 2\mu^3 - \sqrt{1 + 8\mu - 8\mu^2 + 4\mu^3 - 12\mu^4 + 12\mu^5 - 4\mu^6}}{2(\mu - 3\mu^2 + 2\mu^3)} \circ G = 1 - \mu^* = 0.5,$$

$$\text{т.к. } \frac{1 + 4\mu^* - 6\mu^{*2} + 2\mu^{*3} - \sqrt{1 + 8\mu^* - 8\mu^{*2} + 4\mu^{*3} - 12\mu^{*4} + 12\mu^{*5} - 4\mu^{*6}}}{2(\mu^* - 3\mu^{*2} + 2\mu^{*3})} = 1 - \mu^* \Rightarrow \mu^* = 0.5$$

Структура на рисунке 2.2.14е имеет следующие значения показателей структурного отказа

$$F_{\text{однор}}(\vec{\chi}_e) = \vec{\chi}_e \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{6}\right)^T = 0.5,$$

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}_e) = \vec{\chi}_e \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{32}\right)^T = 0.5, F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}_e) = 0.5.$$

Теперь пусть элементы $\{x_2, x_4, x_5\}$ структуры однородны и инверсные элементы $\{\bar{x}_1, \bar{x}_3\}$ однородные. Проведем расчет значения интегрального показателя возможности отказа.

$$T_e(\mu_1, \mu) = (1 - \mu_1)^2(\mu - 3\mu^2 + 2\mu^3) + (1 - \mu_1)(\mu + \mu^2 - 2\mu^3) + \mu^2$$

$$F_{\text{неодвозм}}(T_e(\mu_1, \mu)) = \iint_{[0,1]} (T_e(\mu_1, \mu) \circ G_1) \circ G = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} T_e(\mu_1, \mu) \circ G_1 \right) \circ G = 0.5.$$

$$\int_{[0,1]} T_e(\mu_1, \mu) \circ G_1 = \mu_1^* = \frac{1 + 3\mu - 5\mu^2 + 2\mu^3 - \sqrt{1 + 6\mu - 9\mu^2 + 2\mu^3 + 9\mu^4 - 12\mu^5 + 4\mu^6}}{2(\mu - 3\mu^2 + 2\mu^3)},$$

$$\text{т.к. } (1 - \mu_1^*)^2(\mu - 3\mu^2 + 2\mu^3) + (1 - \mu_1^*)(\mu + \mu^2 - \mu^3) + \mu^2 = \mu_1^*$$

$$\int_{[0,1]} \frac{1 + 3\mu - 5\mu^2 + 2\mu^3 - \sqrt{1 + 6\mu - 9\mu^2 + 2\mu^3 + 9\mu^4 - 12\mu^5 + 4\mu^6}}{2(\mu - 3\mu^2 + 2\mu^3)} \circ G = 1 - \mu^* = 0.5,$$

$$\text{т.к. } \frac{1 + 3\mu^* - 5\mu^{*2} + 2\mu^{*3} - \sqrt{1 + 6\mu^* - 9\mu^{*2} + 2\mu^{*3} + 9\mu^{*4} - 12\mu^{*5} + 4\mu^{*6}}}{2(\mu^* - 3\mu^{*2} + 2\mu^{*3})} = 1 - \mu^* \Rightarrow \mu^* = 0.5$$

Результаты вычисления вероятностных и возможностных оценок однородных и неоднородных структур сведены в таблицу 2.2.1.

Таблица 2.2.1 - Оценки структурного отказа

Варианты	Вероятностная оценка		Возможностная оценка	
	Однородная	Неоднородная	Однородная	Неоднородная
вариант а), б), д), е) монотонная функция	0.5	0.5	0.5	0.5
вариант в) немонотонная функция	0.667	0.5	0.586	0.5
вариант г) немонотонная функция	0.333	0.5	0.414	0.5

Некоторые промежуточные выводы можно сделать на основании проведенных исследований Н-структур:

- подразбиение ребер, соединяющих минимальные вершины с полюсами, приводит к большему уменьшению структурной надежности по сравнению с подразбиением ребер между минимальными вершинами;
- полученные оценки $F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi})$ и $F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi})$, в основе расчета которых лежат положения концепции генома структуры, для монотонных Н-структур являются верхними и нижними границами интегрального показателя структурной надежности (отказа);
- для немонотонных Н-структур (таблица 2.2.1 – вариант в) и г)) предложенные вероятностные и возможностные показатели позволяют оценить диапазон изменения структурной надежности (отказа) структур СЛО;
- используемые в работах [52,113,114,193,210,226] вероятностные оценки структурной надежности нечувствительны к введению в Н-структуру элементов, описываемых немонотонными ФАЛ, поэтому при исследовании структурной надежности СЛО предлагаемые вероятностные и возможностные оценки могут оказаться полезными для получения дополнительной (по сравнению с существующими подходами) информации о структурном состоянии СЛО, наиболее слабых (опасных) его элементах (узлах, компонентах), а так же для выработки рекомендаций по увеличению надежности, живучести и безопасности систем.

2.3 Исследование структурной живучести СЛО

Несмотря на непрерывное повышение качества и надежности ФЭ современных СЛО, решить проблему живучести функционирования СЛО, не затрагивая их структуру и организацию функционирования, невозможно. С усложнением СЛО свойство живучести становится все более определяющим, что является естественным при стремлении совершенствовать СЛО до уровня биологических систем.

Поэтому в рамках исследований, посвященных разработке методологических основ исследования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СЛО, проведем анализ такого важного свойства СЛО как структурная живучесть.

2.3.1 Интегральный показатель структурной живучести СЛО

Для анализа свойства структурной живучести СЛО, а также для синтеза системы, обладающей требуемым свойством структурной живучести, требуется ввести количественную оценку, адекватно отражающую рассматриваемое свойство.

За основу возьмем подход, предложенный в работах [22,190]. При исследовании структурной живучести СЛО будем предполагать, что структура СЛО является монотонной первого типа и в ней возникают отказы функциональных элементов (ФЭ) различной кратности. *Обобщенный отказ i -ой кратности* (согласно [22,190]) означает, что рассматриваются структурные состояния СЛО, которые образуются при последовательном отказе всевозможных сочетаний (C_n^i) из всего множества ФЭ структуры по i различным ФЭ ($i \leq n$, где n число ФЭ рассматриваемой структуры СЛО). Среди множества структурных состояний для данного обобщенного отказа определяется множество работоспособных состояний, мощность которого обозначим R_i , или множество неработоспособных состояний, мощность которого обозначим N_i . При этом $R_i + N_i = C_n^i$.

Коэффициентом структурной живучести [22,190] СЛО для рассматриваемого обобщенного отказа назовем отношение числа работоспособных структурных состояний к общему числу состояний $G_i = \frac{R_i}{C_n^i}$.

Отношение же числа неработоспособных структурных состояний ($N_i = C_n^i - R_i$) к общему числу состояний будет определять *коэффициент структурной деградации СЛО* $D_i = \frac{N_i}{C_n^i}$.

Для определения структурной живучести и деградации СЛО следует исследовать процесс формирования работоспособных и неработоспособных структурных состояний. Причем необходимо отметить, что общее число структурных состояний при обобщенном отказе i -ой кратности может быть меньше C_n^i , т.к. отказ отдельных элементов может приводить к потере работоспособности одного или нескольких других элементов (зависимые отказы). Далее будем рассматривать независимые отказы ФЭ. Причем величина кратности обобщенного отказа задает уровень структурной деградации СЛО.

Зависимость коэффициента структурной живучести от кратности обобщенного отказа представляет собой функцию структурной живучести СЛО

$\Psi(i) = G_i = \frac{R_i}{C_n^i} = 1 - \frac{N_i}{C_n^i}$. Для сравнения различных структур по показателю структурной живучести введем относительную функцию структурной живучести

$\Psi(i/n)$, заданную на дискретном множестве обобщенных отказов, и произведем ее линейную интерполяцию кусочно-линейной функцией $\hat{\Psi}(x)$, $x \in [0,1]$. Тогда в качестве интегрального показателя структурной живучести СЛО можно ввести следующий функционал

$$F_g = \int_0^1 \hat{\Psi}(x) dx.$$

2.3.2 Вычисление работоспособных структурных состояний и интегральной оценки структурной живучести СЛО

Для вычисления интегрального показателя структурной живучести СЛО необходимо определить понятие *неработоспособного структурного состояния СЛО*. Будем считать, что СЛО находится в *неработоспособном структурном состоянии*, если при обобщенном отказе удалены все элементы, входящие, по крайней мере, хотя бы в одно из минимальных сечений отказов структуры СЛО.

Рассмотрим возможные варианты наличия в структуре СЛО минимальных сечений отказов.

Вариант 1: структура СЛО характеризуется k минимальными сечениями отказов, каждый из которых состоит из m элементов. Причем сечения отказов не имеют общих элементов.

В этом случае функция структурной живучести при обобщенном отказе i -ой кратности можно вычислить по формуле (2.3.1)

$$\Psi(i) = 1 - \frac{N_i}{C_n^i} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{\min\{\lfloor \frac{i}{m} \rfloor, k\}} (-1)^{j-1} C_k^j C_{n-jm}^{i-jm}}{C_n^i}, \quad (2.3.1)$$

где $\left\lfloor \frac{i}{m} \right\rfloor$ - целая часть отказавших минимальных сечений при данном обобщенном отказе.

Проанализируем формулу (2.3.1). Так при обобщенном отказе i -ой кратности в случае наличия в структуре j одновременно отказавших сечений число неработоспособных состояний можно вычислить по формуле (2.3.2)

$$N_i = C_k^j C_{n-jm}^{i-jm}, \quad (2.3.2)$$

где C_k^j - число сочетаний из k минимальных сечений по j -му числу отказавших сечений, C_{n-jm}^{i-jm} - число сочетаний из оставшихся $n - jm$ элементов по остальным отказавшим $i - jm$ элементам. Чередование знака в формуле (2.3.1) требуется для подсчета реального числа неработоспособных состояний (удаляем повторно учитываемые сочетания и добавляем лишне удаленные сочетания). Полное доказательство справедливости формулы (2.3.1) приводится в работах [22,190].

Вариант 2: структура СЛО характеризуется k минимальными сечениями отказов, каждый из которых состоит из m_j ($j=1, \dots, k$) элементов. Причем сечения отказов не имеют общих элементов (дизъюнктивное множество минимальных сечений отказов).

Тогда число неработоспособных структурных состояний при обобщенном отказе i -ой кратности примет следующий вид (2.3.3) [22,190]:

$$N_i = \sum_{j=1}^k \delta(i - m_j) C_{n-m_j}^{i-m_j} - \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}} +$$

$$+ \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \sum_{j_3 > j_2}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - m_{j_3}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}} - \dots (-1)^{k-1} \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - \dots - m_{j_k}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}}$$
(2.3.3)

где $\delta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ - дискретная функция Хэвисайда.

При условии $m_1 = m_2 = \dots = m_k = m$ формула (2.3.3) преобразуется в формулу (2.3.1).

Вариант 3: структура СлО характеризуется k минимальными сечениями отказов, каждый из которых состоит из m_j ($j=1, \dots, k$) элементов. Причем сечения отказов имеют общие элементы.

В данной ситуации число неработоспособных структурных состояний при обобщенном отказе i -ой кратности примет следующий вид:

$$N_i = \sum_{j=1}^k \delta(i - m_j) C_{n-m_j}^{i-m_j} - \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} + m_{j_1 j_2}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}+m_{j_1 j_2}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}+m_{j_1 j_2}} +$$

$$+ \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \sum_{j_3 > j_2}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - m_{j_3} + m_{j_1 j_2 j_3}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}+m_{j_1 j_2 j_3}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}+m_{j_1 j_2 j_3}} - \dots$$

$$\dots (-1)^{k-1} \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - \dots - m_{j_k} + m_{j_1 j_2 \dots j_k}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}+m_{j_1 j_2 \dots j_k}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}+m_{j_1 j_2 \dots j_k}}$$
(2.3.4)

В формуле (2.3.4) величины $m_{j_1 j_2 \dots j_k}$ представляют собой суммарное число общих элементов в минимальных сечениях отказов с номерами j_1, j_2, \dots, j_k .

Используя формулы (2.3.1), (2.3.3), (2.3.4) можно вычислить относительную функцию структурной живучести СлО, имеющих П-структуры и Н-структуры, и соответственно определить интегральный показатель структурной живучести системы

$$F_g = \int_0^1 \hat{\Psi}(x) dx.$$

Причем площадь области между графиками $y = \hat{\Psi}(x)$ и $y = 1$ можно интерпретировать как показатель структурной деградации СлО.

2.3.3 Оперативный анализ структурной живучести СЛО на основе концепции генома структуры

Однако, для вычисления структурной живучести по формулам (2.3.1), (2.3.3), (2.3.4) необходим набор минимальных сечений отказов, а также определение общих ФЭ в этих сечениях. В общем случае, нахождения минимальных сечений отказов является NP трудной задачей. При этом вычисление показателя структурной живучести с использованием обобщенной формулы (2.3.4) является сложной комбинаторной задачей.

Покажем, что геном структуры СЛО позволит преодолеть указанные трудности.

Верхняя граница интегрального показателя структурной живучести СЛО.

Геном структуры $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$, компонентами которого являются коэффициенты полинома $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$ функции минимальных сечений отказов структуры, составленной из однородных элементов. Геном структуры [130,132,135,138,139,140-143,150,153,162,171] содержит и позволяет определить следующую информацию в процессе структурного исследования сложных объектов:

во-первых, сведения о топологических свойствах структуры монотонной системы;

во-вторых, информацию о принадлежности исследуемого объекта к классу монотонных или немонотонных систем;

в-третьих, провести оценивание интегральных показателей надежности системы.

Так первая ненулевая компонента генома $\chi_r, r > 0$ равна числу минимальных сечений отказов мощности r , а размерность генома равна числу ФЭ СЛО [130,132,135,138,139,140-143,150,153,162,171]. Зная данные значения, можно, используя формулу (2.3.1), вычислить верхнюю границу интегрального показателя структурной живучести СЛО.

Проведем исследование структурной живучести фрагмента СлО, представленной двухполюсной сетью на рисунке 2.1.9.

Геном рассматриваемой структуры представляет собой вектор $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) = (0, 0, 1, 0, 0, 2, 0, -4, -1, 5, -2)$, по которому можно заключить, что структура содержит одно минимальное сечение мощности 2 и два минимальных сечения мощности 5. Всего же минимальных сечений в рассматриваемой

структуре пять:

$$S_1 = \{Q_1, Q_{10}\}, \quad S_2 = \{Q_2, Q_3, Q_7, Q_9, Q_{10}\}, \quad S_3 = \{Q_3, Q_4, Q_6, Q_7, Q_9, Q_{10}\},$$

$$S_4 = \{Q_5, Q_6, Q_8, Q_9, Q_{10}\}, \quad S_5 = \{Q_2, Q_4, Q_5, Q_8, Q_9, Q_{10}\},$$

одно сечение мощности 2, два сечения мощности 5 и два сечения мощности 6. При этом минимальные сечения имеют общие ФЭ: сечение S_1 имеет со всеми остальными сечениями один общий ФЭ Q_{10} , сечение S_2 с сечениями S_3, S_4, S_5 имеет соответственно общие ФЭ $\{Q_3, Q_7, Q_9, Q_{10}\}, \{Q_9, Q_{10}\}, \{Q_2, Q_9, Q_{10}\}$, сечение S_3 с сечениями S_4, S_5 - $\{Q_6, Q_9, Q_{10}\}, \{Q_4, Q_9, Q_{10}\}$, и, наконец, сечение S_4 с сечением S_5 - $\{Q_5, Q_8, Q_9, Q_{10}\}$.

Воспользуемся формулами (2.3.1), (2.3.3), (2.3.4) для вычисления значений показателя структурной живучести СлО. Вычисления проведем с использованием различных наборов минимальных сечений и сравним полученные оценки структурной живучести.

Вариант 1: воспользуемся полным набором минимальных сечений, учитывая общие ФЭ сечений. Вычисление осуществляем по формуле (2.3.4).

Вариант 2: воспользуемся сечением мощности 2 и двумя сечениями мощности 5 с учетом общих ФЭ. Применим формулу (2.3.4).

Вариант 3: воспользуемся только сечением мощности 2 и формулой (2.3.1).

Относительные функции структурной живучести рассматриваемой структуры, вычисленные для трех вариантов по приведенным формулам, изображены на рисунке 2.3.1.



Рисунок 2.3.1 - Относительные функции структурной живучести

Используя функционал $F_g = \int_0^1 \hat{\Psi}(x) dx$, вычислим интегральный показатель структурной живучести СЛО для рассматриваемых вариантов. Результаты вычисления следующие: верхняя оценка структурной живучести (вариант 3, сечение

мощности 2) равна $F_g^{<2>} = \int_0^1 \hat{\Psi}^{<2>}(x) dx = 0.744$, реальная оценка структурной живучести СЛО (вариант 1) равна $F_g^{<2,5,6>} = \int_0^1 \hat{\Psi}^{<2,5,6>}(x) dx = 0.695$, для варианта 2 (ис-

пользуем сечения из генома структуры) оценка структурной живучести равна $F_g^{<2,5>} = \int_0^1 \hat{\Psi}^{<2,5>}(x) dx = 0.705$.

Относительная погрешность при вычислении значения структурной живучести СЛО составила для варианта 2 (используем геном структуры) 1.4%, а для варианта 3 (верхняя оценка) 8.6%.

Погрешность результатов вычисления структурной живучести зависит от количества ФЭ СЛО. При увеличении числа ФЭ СЛО верхняя оценка структурной живучести будет значительно отличаться от реального значения показателя живучести. Однако предлагаемый подход позволяет оперативно получать верхнюю оценку живучести структурного состояния СЛО.

Приближенное вычисление интегрального показателя структурной живучести СЛО.

Согласно соотношению двойственности монотонных структур [93] полиномы надежной работы и отказа СЛО связаны между собой следующим выражением $R(P) + T(Q) = 1$, где $P + Q = 1$. Компонентами генома структуры $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ являются коэффициенты полинома $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$. Введем понятие *двойственного генома* структуры $\eta = (\eta_0, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$, компонентами которого являются коэффициенты полинома надежной работы СЛО $R(P) = \eta_0 + \eta_1 P + \eta_2 P^2 + \dots + \eta_n P^n$. Если геном структуры, в частности, хранит характеристики минимальных сечений отказов структуры, то двойственным геном структуры отражает характеристики минимальных путей (кратчайших путей успешного функционирования) СЛО. Так первая ненулевая компонента двойственного генома $\eta_l, l > 0$ равна числу минимальных путей мощности l .

Используя геном и его двойственный аналог можно вычислить приближенную оценку показателя структурной живучести СЛО [104,148,159,164,177]. На рисунке 2.3.2 представлена графическая интерпретация определения приближенной оценки структурной живучести СЛО, которая в некоторых случаях представляет собой ее нижнюю границу. Так первые ненулевые компоненты генома и двойственного генома структуры позволяют вычислить величины $a = 1 - \frac{\chi_k}{C_n^k}$ и $b = \frac{\eta_l}{C_n^l}$.

Тогда приближенную оценку структурной живучести можно вычислить следующим образом

$$\hat{F}_g = \frac{k-1}{n} + \frac{1+a}{2} \cdot \frac{1}{n} + \frac{a+b}{2} \cdot \frac{n-k-l}{n} + \frac{b}{2} \cdot \frac{1}{n} = \frac{2k-1}{2n} + \left(1 - \frac{\chi_k}{C_n^k} + \frac{\eta_l}{C_n^l}\right) \cdot \frac{n-k-l+1}{2n}, \quad (2.3.5)$$

а также $\chi_k > 0, \chi_i = 0 \forall 0 < i < k; \eta_l > 0, \chi_j = 0 \forall 0 < j < l$

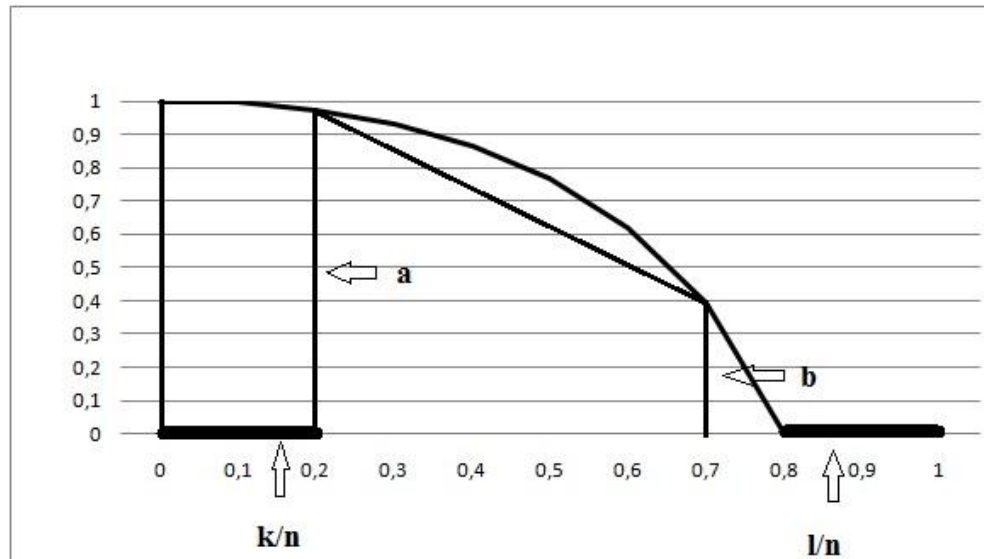


Рисунок 2.3.2 - Графическая интерпретация вычисления нижней оценки Геном и двойственный геном структуры, представленной на рисунке 2.1.9, соответственно равны

$$\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) = (0, 0, 1, 0, 0, 2, 0, -4, -1, 5, -2),$$

$$\eta = (\eta_0, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) = (0, 1, 1, 4, -10, -12, 56, -72, 46, -15, 2).$$

Следовательно, $\chi_k = 1$, $k = 2$, $\eta_l = 1$, $l = 1$, $n = 10$. Приближенная оценка показателя структурной живучести \hat{F}_g (для данной структуры ее нижняя оценка),

$$\text{вычисленная по формуле (2.3.5), равна } \hat{F}_g = \frac{3}{20} + \left(1 - \frac{1}{45} + \frac{1}{10}\right) \cdot \frac{8}{20} = 0.581.$$

Выводы

Подводя итог второго раздела можно сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ современных методов исследования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СЛО, на основании которого предложена классификация структур на монотонные и немонотонные структуры первого и второго типа, а также оригинальная концепция генома структуры объектов, основанная на уникальном представлении структуры объекта в виде вектора коэффициентов полинома структурной функции надежности (работоспособности, отказа). Указанные результаты позволяют, во-первых, на единой методологической основе проводить исследование структурно-топологических свойств СЛО, и, во-вторых, осуществлять оперативное вычисление интервальных, оптимистических и пессимистических оценок таких структурно-топологических показателей СЛО как структурная надежность и структурная живучесть.

2. Введено и обосновано обобщенное понятие генома монотонных и немонотонных структур СЛО. Определены условия для компонент генома структуры, которые позволяют производить классификацию СЛО, обладающих П-структурой и Н-структурой. Подробно рассмотрены свойства старшей компоненты генома. Выдвинуты гипотезы о характере изменения старшей компоненты генома при модификации Н-структур.

3. Изложены теоретические основы структурной надежности СЛО на основе логико-вероятностного и нечетко-возможностного подходов для монотонных и немонотонных (однородных и неоднородных) структур. Предложенные вероятностные и возможностные оценки структурной надежности, с одной стороны, реагируют на введение в систему подструктур, описываемых немонотонными ФАЛ, с другой стороны, показывают диапазон изменения (пессимистические и оптимистические оценки) интегральных показателей структурной надежности СЛО. Проведен анализ показателей значимости, положительных и отрицательных вкладов

отдельных ФЭ СЛО в показатель структурной надежности с позиции указанных подходов.

4. Изложены теоретические основы вычисления показателей структурной живучести и деградации СЛО. Известная интегральная оценка структурной живучести параллельно-последовательных структур с мажоритарными элементами обобщена для СЛО, имеющих сложную комбинированную структуру, часть элементов которой образует последовательное соединение, другая часть - параллельное, отдельные элементы или подструктуры образуют циклические (мостиковые) связи и отношения между собой (П-структура, Н-структура). Однако для реальных структурно-сложных объектов вычисление приведенных оценок представляет собой трудную комбинаторную задачу. Показано, что использование генома структуры и его двойственного аналога позволяет определить как верхнюю границу структурной живучести СЛО, так и приближенную оценку ее структурной живучести, которая для ряда структур также является нижней оценкой рассматриваемого показателя.

3 Методы, модели и алгоритмы многокритериального исследования критичности отказов функциональных элементов сложных объектов

В соответствии с предложенным планом диссертационных исследований, приведенным в разделе 1, остановимся на *втором направлении*, посвященному исследованию равноценных и неравноценных структур СЛО на основе многокритериального анализа критичных функциональных элементов СЛО, отказ которых приводит к изменению структурного состояния объекта.

3.1 Анализ современного состояния исследований критичности отказов функциональных элементов СЛО

Проведенный анализ публикаций по проблеме повышения надежности и живучести функционирования СЛО [11, 53, 102, 107, 123, 130, 139, 147, 156, 158, 170, 191, 210, 245] показал, что в настоящее время значительное внимание уделяется вопросам анализа критичности отказов элементов сложных систем на всех этапах их жизненного цикла – от проектирования до эксплуатации. Современные тенденции развития СЛО связаны с введением в их состав унифицированных, многофункциональных, высоконадежных ФЭ. Поскольку современные структурно-сложные системы содержат большое количество подсистем и элементов, в условиях ограниченных ресурсов обеспечить требуемую надежность и живучесть системы путем совершенствования или резервирования одновременно всех элементов не представляется возможным. Однако ясно, что различные компоненты системы имеют различную важность, отказы элементов системы могут приводить к различным последствиям, как по степени влияния на структурное состояние СЛО, по воздействию на внешнюю по отношению к СЛО среду, так и по степени влияния на качество выполнения задач по предназначению.

Выявление критичных элементов сложных систем позволяет сосредоточить усилия на совершенствовании компонентов системы, имеющих ключевое значение в обеспечении устойчивости, надёжности, безопасности, живучести. При этом в соответствии с [54], анализ критичности проводится для идентифика-

ции причин, сокращения частоты появления отказов и уменьшения тяжести их последствий.

Под *критичностью элемента* сложной системы обычно понимается сочетание тяжести последствий и частоты появления или других свойств отказа [11,55,63]. При анализе критичности отказов элементов сложных систем, критичность трактуется как более широкое понятие и рассматривается как векторное свойство [11,63,102]. Компонентами такого вектора служат различные частные показатели критичности. Таким образом, выявление критичных элементов сложных СЛО представляет собой задачу многокритериального выбора.

В процессе проведения ретроспективного анализа были изучены государственные и межгосударственные стандарты, регламентирующие проведение анализа видов и последствий отказов (АВПО) и анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО):

- ГОСТ 27.310-95 «Анализ видов, последствий и критичности отказов»;
- ГОСТ Р 51901.12-2007 «Метод анализа видов и последствий отказов»;
- МЭК 60812:2006 «Методы анализа надёжности систем. Метод анализа видов и последствий отказов».

Анализ видов последствий и критичности отказов [54] проводят с целью обоснования, проверки достаточности, оценки эффективности и контроля за реализацией управляющих решений, направленных на совершенствование конструкции, технологии изготовления, правил эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта объекта и обеспечивающих предупреждение возникновения и/или ослабление тяжести возможных последствий его отказов, достижение требуемых характеристик безопасности, экологичности, эффективности и надёжности.

С учётом рекомендаций, изложенных в [54,55], при проведении анализа видов, последствий и критичности отказов используются основные показатели критичности отказов, такие как вероятность отказа элемента и тяжесть последствий его отказа. Однако в государственном стандарте [55] предусмотрена возможность использования и других частных показателей критичности.

В работах [11,63] перечень частных показателей критичности отказов ФЭ, по которым проводится анализ, расширен и включает в себя:

- 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.

На наш взгляд при проведении анализа критичности отказов ФЭ СЛО количество и вид частных показателей может быть различным [9,69-71,136,146,156,158,174,279]. 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 анализа в разделе 2, к таким показателям можно отнести показатели структурной надежности (отказа), структурной значимости ФЭ СЛО, их положительного и отрицательного вкладов в показатель структурной надежности.

Помимо указанных структурно-топологических показателей, в перечень показателей критичности отказов ФЭ СЛО можно ввести структурно-функциональные показатели, связанные с интенсивностью использования ФЭ СЛО при выполнении различных технологических операций управления.

Вместе с тем, с одной стороны, для выявления и ранжирования критичных ФЭ СЛО следует разрешить проблему, связанную с критериальной неопределенностью. С другой стороны, существенной причиной, обуславливающей актуальность проблемы выявления критичных элементов, является сложность интерпретации абсолютных оценок надежности систем в условиях, когда они состоят из большого числа высоконадежных ФЭ со сложными функциональными взаимосвя-

зьями. В этом случае сами по себе числовые значения показателей надежности и безопасности не всегда позволяют провести сравнительный анализ различных вариантов построения СлО, и требуется привлечение дополнительной информации. Не случайно в теории надежности сложных систем в последнее время все большее распространение получают методы, учитывающие не только числовые значения показателей надежности ФЭ, но качественные оценки влияния отказа элемента на функционирование СлО.

Как видно из приведенного перечня частных показателей критичности отказов ФЭ [11,63], а также исследований структурно-топологических показателей (раздел 2), показатели могут иметь как количественный, так и качественный характер и для их измерения могут использоваться различные виды шкал.

Пример частных показателей критичности и их лингвистические шкалы из работ [11,63] приведен в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1 - Лингвистические шкалы показателей критичности отказов ФЭ

Показатели	Шкала
Тяжесть последствий отказа	1. Отказ приводит к отказу функционирования СлО 2. В результате отказа возникает необходимость в принятии экстренных мер для предотвращения отказа СлО 3. Отказ приводит к потере некоторых свойств объекта, что сокращает продолжительность его функционирования 4. Отказ приводит к потере некоторых свойств СлО, не влияющих на продолжительность его функционирования 5. Отказ изменяет режимы работы функционирования других элементов СлО, что увеличивает вероятности их отказа
Вероятность отказа	1. Элемент обладает относительно высокой вероятностью отказа в течение функционирования СлО 2. Отказ считается возможным и вероятным 3. Отказ считается возможным, но маловероятным 4. Отказ возможен, но крайне маловероятен 5. Отказ считается невозможным
Устойчивость к воздействию внешних неблагоприятных	1. Из опыта эксплуатации известно, что в условиях воздействия внешних факторов время функциони-

факторов	<p>рования меньше, чем проектное</p> <p>2. Опыт эксплуатации в условиях воздействия внешних факторов отсутствует, но анализ предсказывает, что время функционирования меньше проектного</p> <p>3. Фактическое время функционирования СЛО в реальных условиях близко к проектному.</p> <p>4. Известно, что реальное время функционирования СЛО больше проектного</p> <p>5. Отсутствуют неблагоприятные факторы внешнего воздействия в период функционирования СЛО</p>
Резервирование	<p>1. Резервирование невозможно</p> <p>2. Резервирование возможно, но отсутствует</p> <p>3. Однократное резервирование без контроля состояния резерва</p> <p>4. Однократное резервирование и состояние резерва контролируется</p> <p>5. Двукратное и более резервирование без контроля состояния резерва</p> <p>6. Двукратное и более резервирование, состояние резерва контролируется</p>
Контроль состояния элемента	<p>1. Состояние элемента не контролируется</p> <p>2. Осуществляется периодический контроль</p> <p>3. Осуществляется постоянный контроль без прогнозирования</p> <p>4. Осуществляется периодический контроль с прогнозированием</p> <p>5. Осуществляется постоянный контроль с прогнозированием</p>
Продолжительность существования риска отказа	<p>1. Риск существует в течение всего периода функционирования СЛО</p> <p>2. Риск существует до завершения второго этапа функционирования</p> <p>3. Риск существует до завершения первого этапа функционирования</p>
Возможность локализации	<p>1. Локализация нужна, но технически невозможна</p> <p>2. Предусмотрены меры к локализации отказа</p> <p>3. Специальные меры к локализации отказа не нужны</p>

В данных условиях, когда частные показатели критичности отказов ФЭ СЛО имеют не только количественный, но и качественный (лингвистический, ин-

тервальный, нечеткий) вид, проблема разрешения критериальной неопределенности существенно усложняется. Причём значения частных показателей критичности отказов ФЭ СлО могут быть получены как вычислительным, так и экспертным путём. В общем случае значения частных показателей критичности отказов могут быть представлены лингвистическими переменными. Поэтому при проведении анализа критичности отказов ФЭ СлО целесообразно использовать математический аппарат теории нечётких множеств, отношений и мер, а также теории экспертных оценок [146,157,172,227].

Далее рассмотрим подходы к вычислению предлагаемого структурно-функционального показателя интенсивности использования ФЭ СлО при выполнении технологических операций управления СлО, а также проведем исследования методов преодоления критериальной неопределенности в условиях, когда критичность отказа ФЭ оценивается набором лингвистических показателей.

3.2 Структурно-функциональный показатель интенсивности применения ФЭ СлО

Различные ФЭ СлО играют далеко не одинаковые роли, их отказы могут приводить к разным по степени влияния на состояние системы последствиям. Это обусловлено как различиями технического характера (пропускная способность, производительность и т.д.), так и различиями технологии управления объектами.

С целью определения роли конкретных компонентов в обеспечении работоспособности СлО следует проводить анализ показателей интенсивности и равномерности применения ФЭ при выполнении тех или иных функциональных задач.

Для анализа интенсивности и равномерности применения ФЭ СлО предлагается использовать подход, предложенный в [48,49], подразумевающий описание сложных систем в виде специальных *модельных графов и вычисления их производных*.

Использование такого подхода позволяет проводить анализ структурно-функциональных свойств СлО и вычислять различные показатели – интенсив-

ность применения элементов в тех или иных процессах, неравномерность участия элементов в различных технологических циклах управления и т.д.

Пусть задана схема некоторой системы управления, в которой с помощью шести различных средств управления СУ1, СУ2, СУ3, СУ4, СУ5, СУ6 осуществляется управление тремя объектами управления ОУ1, ОУ2, ОУ3 (рисунок 3.2.1). Причём связаны СУ и ОУ через некоторое коммутирующее устройство К.

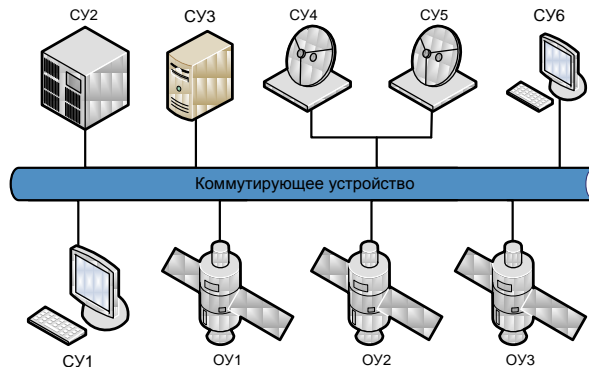


Рисунок 3.2.1 - Схема системы управления

Будем считать, что при управлении ОУ, СУ используются следующим образом:

- в процессе управления ОУ1 задействуются СУ1, СУ2, СУ3, СУ4, К;
- в процессе управления ОУ2 задействуются СУ4, СУ5, СУ6, К;
- в процессе управления ОУ3 задействуются все СУ и К.

Отобразим систему управления в виде гиперграфа G (рисунок 3.2.2), где процессы управления S_1, S_2, S_3 представляют собой ребра, соединяющие вершины $M = \{СУ3, СУ4, СУ5, СУ6, СУ2, К, СУ1, ОУ1, ОУ2, ОУ3\}$ данного графа.

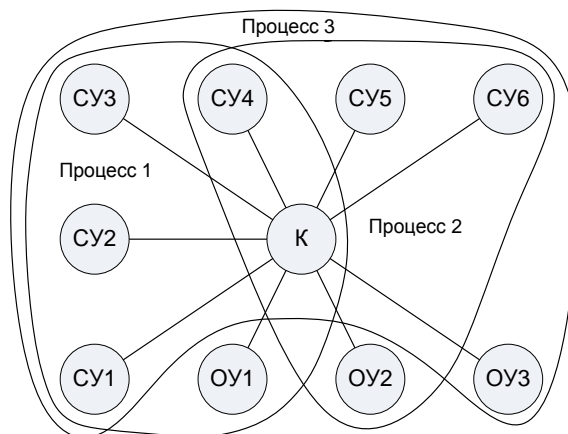


Рисунок 3.2.2 - Гиперграф системы управления

Матрицу инцидентности Q гиперграфа G можно задать следующим образом:

$$Q = \begin{matrix} & \text{СУ3} & \text{СУ4} & \text{СУ5} & \text{СУ6} & \text{СУ2} & \text{К} & \text{ОУ1} & \text{ОУ2} & \text{ОУ3} \\ \begin{matrix} \text{СУ3} \\ \text{СУ4} \\ \text{СУ5} \\ \text{СУ6} \\ \text{СУ2} \\ \text{К} \\ \text{ОУ1} \\ \text{ОУ2} \\ \text{ОУ3} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Каждой вершине из множества M сопоставим номера процессов управления (ребра), в которых эта вершина участвует. Такой процесс сопоставления называется *моделизацией* графа G [48].

Полученную таким образом на графе функцию, областью определения которой являются вершины графа, а областью значений – множество номеров процессов управления называют *модельным графом* и обозначают $G^M = \langle (M, W), U \rangle$, где W — множество номеров ребер, U — множество дуг, соединяющих вершины с одинаковыми номерами ребер гиперграфа [48].

Модельный граф исследуемой системы изображён на рисунке 3.2.3.

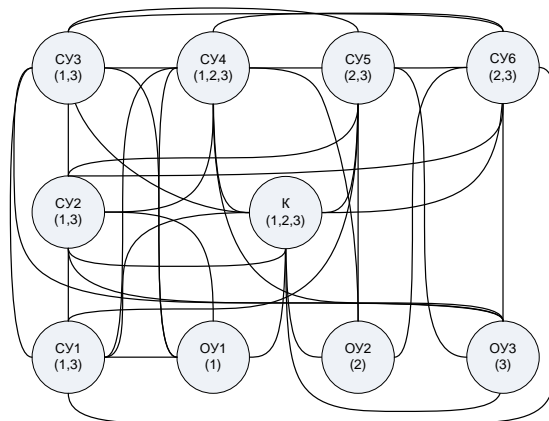


Рисунок 3.2.3 - Модельный граф G^M

Очевидно, что использование построенного модельного графа для анализа интенсивности применения элементов в процессе управления объектами затруднительно.

Для проведения анализа интенсивности применения элементов полученного модельного графа при управление объектами необходимо ввести понятие частотной матрицы отношений и понятие производной графа [48,49].

Частотной матрицей отношений $F = [f_{ij}]_{m \times m}$ называется матрица, элементы которой f_{ij} (взаимная частота участия вершин) равны числу процессов, в которые входят элементы i и j ($i \neq j$), f_{ii} (собственная частота участия вершины) - числу процессов, в которые входит элемент i .

Матрица F может быть вычислена из матрицы инцидентности Q по формуле $F = Q^T \times Q$, где Q^T - транспонированная матрица инцидентности.

Для изучаемой системы частотная матрица F будет иметь следующий вид:

$$F = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 3 & 2 & 2 & 2 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 3 & 2 & 2 & 2 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Для анализа равномерности применения элементов в различных событиях необходимо произвести вычисление производной графа G^M по событию S [48,49], где далее под событием понимается процесс управления.

Несмотря на то, что в дискретной математике не используется понятие предела, для решения оптимизационных и других задач дискретной математики в [48,49] введено понятие производной, основанное на использовании понятия частоты участия элементов в различных событиях.

Производной $\partial G / \partial S$ графа G^M по событию S называется граф, каждая пара вершин которого (v_i, v_j) взвешена отношением частоты $(f_{ii} - f_{ij}) + (f_{jj} - f_{ij})$ их несовместного участия в событии S к частоте f_{ij} совместного участия в собы-

$$\text{тии } S: \frac{\partial G}{\partial S}(v_i, v_j) = \frac{f_{ii} - 2f_{ij} + f_{jj}}{f_{ij}} .$$

Другими словами, на элементах графа G^M происходит событие S , например управление всеми ОУ, а производная $\partial G / \partial S$ будет характеризовать степень равномерности участия пар вершин графа G в этом событии. В представленном примере событие S представляет собой совокупность процессов управления S_1, S_2, S_3 объектами ОУ1, ОУ2, ОУ3.

Произведем вычисление производной $\partial G / \partial S$ графа G^M , представленную матрицей, симметричной относительно главной диагонали,

$$\frac{\partial G}{\partial S} = \begin{pmatrix} 0 & 1/2 & 2 & 2 & 0 & 1/2 & 0 & 1 & \infty & 1 \\ & 0 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 0 & 1/2 & 2 & 2 & 2 \\ & & 0 & 0 & 2 & 1/2 & 2 & \infty & 1 & 1 \\ & & & 0 & 2 & 1/2 & 2 & \infty & 1 & 1 \\ & & & & 0 & 1/2 & 0 & 1 & \infty & 1 \\ & & & & & 0 & 1/2 & 2 & 2 & 2 \\ & & & & & & 0 & 1 & \infty & 1 \\ & & & & & & & 0 & \infty & \infty \\ & & & & & & & & 0 & \infty \\ & & & & & & & & & 0 \end{pmatrix} .$$

Построим граф производной $\partial G / \partial S$ (рисунок 3.2.4). На данном графе приняты следующие обозначения: 1 – СУ3, 2 – СУ4, 3 – СУ5, 4 – СУ6, 5 – СУ2, 6 – К, 7 – СУ1, 8 – ОУ1, 9 – ОУ2, 10 – ОУ3.

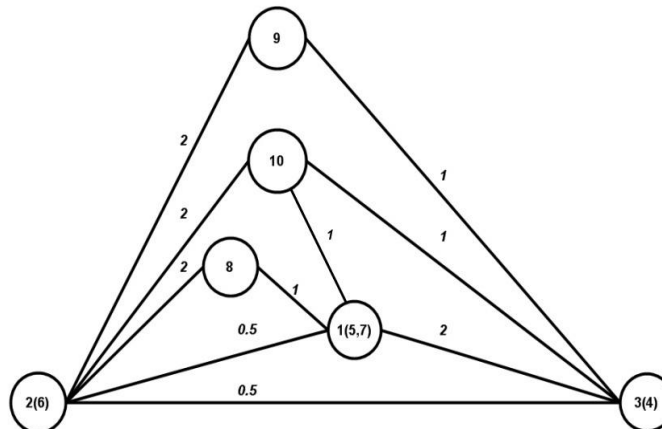


Рисунок 3.2.4 - Производная модельного графа G^M по событию S

Анализ полученных результатов позволяют сделать следующие выводы:

- в графе, представляющем производную модельного графа объединен-

ные вершины (2 и 6; 3 и 4; 1, 5 и 7) обладают одинаковой интенсивностью и равномерностью применения при управлении объектами, причем не используются по отдельности, только вместе (значение элемента матрицы $\partial G / \partial S$ равно 0);

➤ значение элемента матрицы $\partial G / \partial S$ равно ∞ (вершины не связаны) означает, что элементы совместно в управлении не участвуют;

➤ значение элемента матрицы $\partial G / \partial S$, находящееся в интервале $[0;1]$, означает, что элементы участвуют в управлении чаще совместно, чем по отдельности;

➤ значение элемента матрицы $\partial G / \partial S$ равно 1 означает, что элементы участвуют в управлении совместно настолько же часто, как и по отдельности;

➤ значение элемента матрицы $\partial G / \partial S$ больше 1 означает, что элементы участвуют в управлении чаще по отдельности, чем совместно.

Результаты такого анализа позволяют выявить ФЭ СЛО, наиболее интенсивно использующиеся при выполнении тех или иных функциональных задач. Для этого, используя производную модельного графа, путем нормировки значений $\partial G / \partial S$ строится нечеткое отношение технологической независимости ФЭ по следующему правилу. Обозначим число событий (технологических процессов), в которых участвуют ФЭ через n . В этом случае максимально возможное значение

элемента матрицы $\partial G / \partial S$, отличное от ∞ , равно $\frac{f_{ii} - 2f_{ij} + f_{jj}}{f_{ij}} = \frac{n - 2 + 1}{1} = n - 1$. Тогда нечеткое отношение технологической независимости можно задать матрицей

$Z = |z_{ij}|_{m \times m}$, значения элементов которой вычисляются следующим образом

$$z_{ij} = \frac{\partial G / \partial S_{ij}}{n}.$$

		1,5,7	2,6	3,4	8	9	10
	1,5,7	0	0.17	0.67	0.33	0	0.33
	2,6	0.17	0	0.17	0.67	0.67	0.67
	3,4	0.67	0.17	0	0	0.33	0.33
Z=	8	0.33	0.67	0	0	0	0
	9	0	0.67	0.33	0	0	0

$$10 \left\| \begin{array}{cccccc} 0.33 & 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\|$$

Далее нечеткое отношение интенсивности взаимного участия ФЭ при выполнении функциональных задач зададим матрицей $R = \|r_{ij}\|_{m \times m}$ по следующему

$$\text{правилу } r_{ij} = \begin{cases} 1 - z_{ij}, & \text{если } z_{ij} \neq 0 \\ 1, & \text{если } i = j \\ 0, & \text{если } z_{ij} = 0 \end{cases}.$$

$$R = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} & 1,5,7 & 2,6 & 3,4 & 8 & 9 & 10 \\ 1,5,7 & \left\| \begin{array}{cccccc} 1 & 0.83 & 0.33 & 0.67 & 0 & 0.67 \\ 2,6 & 0.83 & 1 & 0.83 & 0.33 & 0.33 & 0.33 \\ 3,4 & 0.33 & 0.83 & 1 & 0 & 0.67 & 0.67 \\ 8 & 0.67 & 0.33 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 9 & 0 & 0.33 & 0.67 & 0 & 1 & 0 \\ 10 & 0.67 & 0.33 & 0.67 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\| & \end{array} \end{array}$$

В качестве интегрального структурно-функционального показателя интенсивности применения ФЭ Сло предлагается использовать следующее выражение

$$f_{\text{интенсив}}(v_i) = \frac{\sum_{j=1}^m R(i, j)}{m}. \text{ Для рассматриваемого примера значения введенного показателя интенсивности применения ФЭ приведены в таблице 3.2.1.}$$

Таблица 3.2.1 - Интенсивность применения ФЭ

Номера ФЭ	Интенсивность применения
1, 5, 7	0,583
2, 6	0,611
3, 4	0,583
8	0,333
9	0,333
10	0,444

3.3 Многокритериальный анализ критичности отказов ФЭ СЛО

3.3.1 Место и роль задач многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СЛО

В связи со сложностью решения проблемы многокритериального анализа критичности отказов ФЭ СЛО, многообразием факторов, подлежащих учету, существенным повышением цены возможных ошибок в современных условиях резко возросло значение разработки научно обоснованного подхода к комплексному оцениванию и анализу критичности отказов ФЭ СЛО.

Анализ многочисленных публикаций по различным аспектам проблемы оценивания состояния СЛО [8,16,46,67,68,185,186,208,210,251,258] показывает, что в настоящее время наметилась прогрессивная тенденция к интеграции различных научных направлений, связанных с рассматриваемой проблематикой. Интегрированный подход к использованию достижений, полученных в рамках различных научных направлений по исследованию проблемы оценивания критичности отказов ФЭ СЛО, предполагает, прежде всего, рассмотрение всех вопросов оценивания на основе введения заданной системы наиболее общих понятий и определений.

Отношение предпочтения следует считать центральным понятием. Широкое привлечение аксиоматики бинарных отношений и развитие на этой основе теории полезности, рассмотрение функций полезности в экономико-прикладных исследованиях, целевых функций в задачах исследования операций и функционалов качества в задачах управления динамическими системами как частных способов задания отношений предпочтения - вот далеко не полный перечень возможностей обобщения на основе концепции предпочтения.

Однако следует подчеркнуть, что необходимость указанного подхода к обобщению нельзя было бы считать столь острой, если ограничиться рассмотре-

нием задач оценивания с одним отношением предпочтения (унипредпочтение). Суть данного подхода в том, что вывод об уровне критичности отказа ФЭ СЛО делается на основании значения одного показателя, скажем, надежности функционирования. При этом в рамках данного подхода внимание уделяется лишь одному из аспектов функционирования СЛО.

Требование достижения адекватного оценивания эффективности функционирования СЛО в различных условиях сложной обстановки выдвигает на передний план рассмотрение системы показателей количественных и качественных оценок критичности отказов ФЭ СЛО, т.е. задачи оценивания с многими отношениями предпочтения (мультипредпочтение).

Здесь, прежде всего, следует отметить, что отношение предпочтения, как правило, является математической моделью реально существующего предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР), определенного свойства СЛО. Обычно свойств несколько, и, следовательно, необходимая степень адекватного представления проблемы оценивания требует введения нескольких отношений предпочтения, учитывающих всю совокупность этих свойств.

В целях рассмотрения на единой основе задач оценивания критичности отказов ФЭ СЛО целесообразно использовать при общей постановке задачи структурно-математический подход.

Структура многокритериального оценивания (оценивания с несколькими отношениями предпочтения, с мультипредпочтением) может быть представлена в следующем виде:

$$\left(\{r_i\}_{i \in \Gamma}, \{F^k\}_{k \in \Gamma_1} \right) \quad (3.3.1).$$

Для такой структуры характерным является введение множества отношений предпочтения $\{r_i\}_{i \in \Gamma}$ или представляющих их функций $\{f_i\}_{i \in \Gamma}$, а также согласующего правила F или множества согласующих правил $\{F^k\}_{k \in \Gamma_1}$, направленных на преодоление критериальной неопределенности и разрешения противоречия между исходными отношениями предпочтения.

Вводимые согласующие правила F^k определяют результирующие функции выбора $f_{рез}^k = F^k(\{f_i\}_{i \in \Gamma})$.

Анализ структуры оценивания с мультипредпочтением (3.3.1) показывает, что задачи оценивания содержат специфическую неопределенность, проявляющуюся в необходимости согласования различных отношений предпочтения с помощью построения результирующего отношения предпочтения. Этот вид неопределенности иногда называют критериальной неопределенностью [43,84,97,98,112,189,204,205].

К этой совокупности отношений предпочтения предъявляется ряд требований.

Набор отношений предпочтения, предназначенный для оценки ФЭ СЛО, должен обладать рядом свойств, делающих его использование оправданным:

1. Полнота. Отношения предпочтения, входящие в набор, должны обеспечивать адекватную оценку критичности отказов ФЭ СЛО.

Иными словами, в наборе отношений предпочтения должны быть представлены отношения, характеризующие все основные аспекты оценки критичности отказов ФЭ.

Получив значения оценок по каждому из критериев, входящих в состав набора, мы должны иметь возможность определить требуемую оценку критичности отказов ФЭ СЛО.

2. Действенность (операционность). Поскольку отношения предпочтения предназначены для оценок ФЭ СЛО, они должны быть однозначно понимаемы как экспертами, так и ЛПР, т. е. характеризовать основные аспекты критичности отказов ФЭ СЛО и быть доступными для получения оценок представляющих их функций.

3. Разложимость. Принцип разложимости отражает тот факт, что эксперту либо ЛПР удобнее работать с небольшим числом отношений предпочтения. Если анализируемые элементы СЛО таковы, что критичность их отказа должна оцениваться с помощью слишком большого числа критериев, а, по оценке некоторых

авторов, критериев должно быть не более 7 ± 2 , то целесообразно разбить их (разложить) на более мелкие группы для удобства одновременной работы с ними. При попытках использования ЛПР большего, чем 7 ± 2 структурных единиц информации, резко возрастает количество его противоречивых ответов. Такое поведение ЛПР (либо экспертов) большинство психологов объясняют ограниченной емкостью кратковременной памяти человека.

4. Неизбыточность. Отношения предпочтения должны быть избыточны, чтобы избежать дублирования при оценке критичности отказов ФЭ СЛО. Бывает, что избыточность возникает за счет одновременного рассмотрения как функций, характеризующих получаемые результаты, так и средств их достижения либо одновременного рассмотрения, как входных характеристик системы, так и выходных.

5. Минимальная размерность. Этот принцип также направлен на то, чтобы процедура многокритериального оценивания не была без необходимости слишком громоздкой. В набор отношений предпочтения для оценки критичности отказов ФЭ СЛО целесообразно включать лишь те отношения, без которых такая оценка невозможна.

Для оценивания сложности получения информации от ЛПР и обоснованного выбора соответствующих методов многокритериального оценивания была предложена следующая классификация элементарных операций, выполняемых человеком [43,97,98]:

- операции с критериальными функциями (операции группы А);
- операции с оценками, получаемыми с использованием критериальных функций (операции группы Б).

При этом к сложным (С) относятся такие операции, при выполнении которых ЛПР допускает много противоречий, использует упрощенные стратегии. К допустимым (Д) операциям относятся типичные, часто совершаемые ЛПР на практике операции, либо операции, которые ЛПР выполняют с малыми противоречиями при использовании сложных стратегий. К неопределенным (Н), неопределенным сложным (НС) и допустимым (НД) относятся операции, для которых

отсутствуют данные психологических исследований, но возможен (с использованием известных фактов) по аналогии вывод о допустимости или сложности операций.

В таблице 3.3.1 произведена оценка сложности всех основных операций, выполняемых в процессе многокритериального оценивания [43,97,98].

Таблица 3.3.1 – Оценка сложности операций

Название операции	Оценка сложности операции
Назначение весовых коэффициентов критериальным функциям	С
Упорядочение критериальных функций по важности	НД
Сравнение двух оценок критериальных функций по шкале одной из критериальных функций	Д
Сравнение изменения оценок двух критериальных функций	Д
Определение в количественном виде изменения оценки одной критериальной функции, которое эквивалентно изменению оценки другой критериальной функции	НС
Определение удовлетворительного значения по одной критериальной функции	НД
Выделение трех критериальных функций, оценки по которым должны быть улучшены, могут быть улучшены, остаться не хуже уже достигнутого удовлетворительного уровня	Д

Анализ данных, приведенных в таблице 3.3.1, позволяет сформулировать ряд требований, которыми целесообразно руководствоваться при выборе конкретных методов многокритериального оценивания [43,97,98].

Требование 1. В методах принятия решений должны использоваться только такие способы получения информации от ЛПР и экспертов, которые соответствуют возможностям человеческой системы переработки информации.

Требование 2. В методах принятия решений должны быть предусмотрены средства проверки информации ЛПР и экспертов на непротиворечивость. При любых способах получения информации от них следует помнить о возможности случайных ошибок, об этапах обучения.

Требование 3. Результирующие правила принятия решений должны полностью соответствовать предпочтениям ЛПР.

Требование 4. Любые допущения относительно вида решающего правила должны быть математически обоснованы.

Первые два из перечисленных требований направлены на психологическое обоснование выбираемых методов, третье требование - на исключение допущений и предположений, не принадлежащих ЛПП, последнее требование направлено на математическое обоснование выбираемых методов.

3.3.2 Классификация современных методов многокритериального оценивания

К настоящему времени разработано большое разнообразие методов решения задач многокритериального оценивания [43, 84, 97, 98, 111, 112, 119, 189, 204, 205, 257]. Как правило, вводят соотношение – свертку, которая интегрирует сочетание оценок $f_i, i \in \Gamma = \{1, 2, \dots, m\}$ в скалярную характеристику качества. Данные методы иногда называют методами построения сверток показателей (либо методами скаляризации). При этом различают эвристические и аксиоматические свертки (рисунок 3.3.1).

Среди эвристических сверток показателей выделяют псевдоуниверсальные (аддитивные, мультипликативные, функции минимума, расстояния в соответствии с заданной метрикой, нечеткие и т.п.) и специализированные (экономические, физические, вероятностные, функциональные или их комбинации).

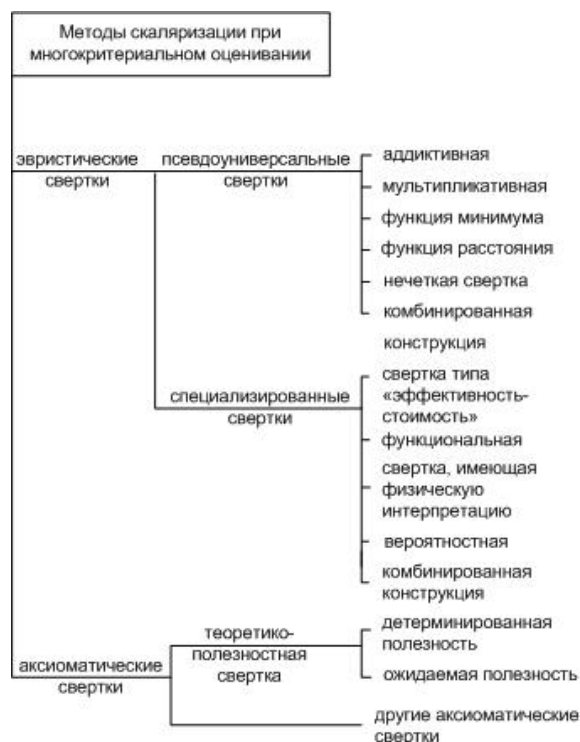


Рисунок 3.3.1 - Методы построения свертки показателей

При аксиоматическом подходе в качестве исходной информации для многокритериального оценивания используется ряд аксиом (правил), которым должно удовлетворять результирующее отношение предпочтения. В зависимости от формы и способов задания аксиом различают теоретико-полезностные свертки, которые, как правило, представляются либо детерминированными функциями полезности, либо функциями ожидаемой полезности.

При применении методов скаляризации часто осуществляется модификация функций $f_i (i \in \Gamma)$ как в интересах приведения всех функций к однородному (нормализованному) виду, так и в целях видоизменения содержательного характера этих функций. Данная модификация необходима, т.к. в большинстве случаев масштабы измерения критериальных функций f_i неодинаковы и требуется искусственно приводить их к одной мере. Обозначим через $v_i^* (i \in \Gamma)$ - максимально возможные значения функций f_i , а через v_{i*} - минимально допустимые (минимально целесообразные) значения этих функций. В частности в качестве v_i^* и v_{i*} могут соответственно приниматься максимальные и минимальные значения, достигаемые функцией f_i .

С учетом введенных обозначений основные виды модификаций могут быть представлены следующим образом: $v_i^* - f_i; f_i - v_{i^*}; \frac{f_i}{v_i^*}; \frac{v_i^* - f_i}{v_i^*}; \frac{v_i^* - f_i}{v_i^* - v_{i^*}}; \frac{f_i - v_{i^*}}{v_i^* - v_{i^*}}$.

В дальнейшем будем предполагать, что значения f_i нормализованы.

В качестве первых примеров свертки, используемых в методах многокритериального оценивания, рассмотрим **аддитивные свертки**:

$$f_{рез}^{(1)} = F^{(1)}(\{f_i\}_{i \in \Gamma}) = \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i; \quad (3.3.2)$$

где $\lambda_i \geq 0; \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$. Соответствующее такому представлению $f_{рез}^{(1)}$ правило согласования $F^{(k)}, k=1$ носит название принципа равномерной оптимальности.

Содержательное обоснование правомерности использования данного правила согласования оказывается убедительным для задач, где оценки ФЭ по каждой критериальной функции могут быть выражены (численно и в смысловом плане) в единицах оценок по какой-либо одной критериальной функции-компоненте векторного показателя [204]. Наиболее характерными примерами таких задач являются задачи с показателями, допускающими стоимостное выражение. В этом случае сумма значений частных критериальных функций вида (3.3.2), выраженная в денежных единицах, может рассматриваться как доход (либо потери).

Основными недостатками данного варианта свертки являются [98,204]:

1) слабая связь весовых коэффициентов $\lambda_i (i=1,2,\dots,m)$ с действительной ролью частных критериальных функций f_i при обобщенной оценке ФЭ с использованием $f_{рез}^k (k=1)$. При этом введение весовых коэффициентов лишь создает видимость большей объективности формулы (3.3.2), однако их определение сталкивается с серьезными трудностями, о которых речь шла в параграфе 3.3.1 (таблица 3.3.1);

2) трудность отыскания объективного способа нормирования частных критериальных функций f_i для приведения их к безразмерному виду, т.к. значимость каждой f_i определяется величинами v_i^* и v_{i^*} ;

3) коэффициенты в свертке частных показателей не учитывают нелинейный характер влияния показателей f_i друг на друга и в целом на обобщенный показатель критичности отказов ФЭ СЛО;

4) отдельные частные показатели могут иметь качественные оценки критичности отказов ФЭ СЛО.

Другим вариантом задания результирующей функции многокритериального оценивания является **мультипликативная свертка**:

$$f_{рез}^{(2)} = F^{(2)}(\{f_i\}_{i \in \Gamma}) = \prod_{i=1}^m f_i. \quad (3.3.3)$$

Выражение (3.3.3) представляет собой свертку-произведение оценок ФЭ по всем критериальным функциям. Правило согласования, реализуемое с использованием данного варианта свертки, называется принципом справедливого компромисса и формулируется следующим образом: справедливым следует считать такой компромисс, когда суммарный уровень относительного снижения одной или нескольких критериальных функций не превышает суммарного уровня относительного увеличения остальных критериальных функций.

Вместе с тем, рассматриваемый принцип также имеет ряд недостатков [187,188]:

1) возможна компенсация недостаточных значений величины одной критериальной функции f_i - избыточными значениями величин другой (других) критериальных функций f_j ($j \neq i, j \in \Gamma$);

2) происходит выравнивание (сглаживание) значений частных критериальных функций.

В выражении (3.3.3) можно учесть важность отдельных критериальных функций следующим образом:

$$f_{рез}^{(2)} = \prod_{i=1}^m f_i^{\lambda_i}. \quad (3.3.4)$$

Более сложный вариант свертки в задачах скаляризации определяется с использованием следующей результирующей функции [187,188]

$$f_{рез}^{(3)} = F^{(3)} \left(\left\{ \lambda_i (v_i^* - f_i) \right\}_{i \in \Gamma} \right), \quad (3.3.5)$$

где $F^{(3)}$ - интерпретируется как **функция расстояния** между идеальной (номинальной, целевой, утопической) точкой $\vec{v}^* = \|v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*\|^T$ и точкой оценок критичности отказов ФЭ СЛО $\|f_1, f_2, \dots, f_m\|^T$, задаваемое с использованием конкретной метрики.

Примером конкретного задания $F^{(3)}$ может служить вариант, при котором:

$$f_{рез}^{(3)} = \sum_{i=1}^m \lambda_i (v_i^* - f_i)^2, \quad (3.3.6)$$

где v_i^* - i -ая компонента идеальной (утопической) точки.

Достоинство использования данных сверток состоит в том, что они имеют наглядную содержательную интерпретацию для ЛПР. Однако при использовании указанного варианта свертки требуется дополнительная информация для обоснования самой идеальной (целевой) точки \vec{v}^* и соответствующей метрики в пространстве критериальных функций. Опыт показывает, что использование разных метрик приводит в общем случае к разным решениям задач векторной оптимизации.

Особое место при решении задач многокритериального оценивания занимают методы, основанные на применении **функции минимума**. В этом случае результирующее отношение предпочтения может быть задано с помощью следующего соотношения

$$f_{рез}^{(4)} = \min_{i \in \Gamma} \{ \lambda_i f_i \}. \quad (3.3.7)$$

При этом нормализация f_i обычно осуществляется по формуле $\frac{f_i}{v_i^*}$.

Если же нормализация $f_i(x)$ осуществлялась по формуле $v_i^* - f_i$ или $\frac{v_i^* - f_i}{v_i^*}$,

или, наконец, по формуле $\frac{v_i^* - f_i}{v_i^* - v_{i*}}$, то вместо функции минимума вводится макси-

мум $f_{рез}^{(5)} = \max_{i \in \Gamma} \{ \lambda_i f_i \}$, который интерпретируется как критерий, обеспечивающий максимальное уклонение (максимальное относительное уклонение) от идеальных (номинальных) значений целевых функций. Данные критерии ориентированы на обеспечение равномерности оптимизации по всем частным критериальным функциям.

Более сложным, но по существу ориентированным на те же цели является результирующий критерий, известный под названием критерия максимального «сожаления»:

$$f_{рез}^{(6)} = F^{(6)}(\{f_i\}_{i \in \Gamma}) = \max_{i \in \Gamma} \{ \lambda_i (v_i^* - f_i) \}. \quad (3.3.8)$$

Одним из основных недостатков перечисленных выше вариантов сверток векторных показателей вида (3.3.7)-(3.3.8) является (как и в случае использования принципа справедливого компромисса) то, что в них практически игнорируется возможность взаимокомпенсации оценок по различным критериальным функциям [187,188]. Для построения указанных сверток требуется дополнительная информация, получаемая от ЛПР, экспертов.

В следующих параграфах предложены некоторые подходы к построению результирующих показателей оценки критичности отказов ФЭ СЛО для парирования приведенных недостатков.

3.3.3 Подходы к построению результирующих показателей многокритериального оценивания в условиях неопределенности

Ныне существующие и проектируемые СЛО являются, как правило, сложными многофункциональными объектами, созданными на базе новых информационных технологий. Поэтому процессы применения указанных объектов по целевому назначению, реализуемые в рамках соответствующих систем управления СЛО, сопровождаются появлением гигантских потоков разнородной информации и отличаются как по физической природе измеряемых и контролируемых пара-

метров, так и по составу источников информации о компонентах вектора критичности отказов ФЭ указанных систем.

Практика показывает, что выбор рассматриваемых показателей критичности отказов ФЭ СЛО является процессом, во многом имеющим субъективный, творческий характер, требующий в каждом отдельном случае индивидуального подхода и неформальных эвристических методов, т.е. методов, в основе которых лежат интуиция, опыт, аналогии, здравый смысл. При этом существенной особенностью процессов оценивания критичности отказов ФЭ СЛО является то, что данные процессы реализуются в условиях существенной неопределённости, связанной с воздействием внутренних и внешних возмущающих факторов. Таким образом, 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.

В зависимости от особенностей задачи оценивания критичности отказов ФЭ СЛО частные показатели, как правило, носят неравнозначный по важности характер. Распространенными методами выражения различий критериев по важности являются методы скаляризации, приведенные в параграфе 3.3.2. Наиболее универсальной сверткой показателей, учитывающей нелинейный характер влияния частных показателей f_i друг на друга и в целом на обобщенный показатель критичности отказа ФЭ СЛО является свертка, приведенная в формуле (3.3.9).

$$f_{\text{рез}}^{(7)} = F^{(7)}(\{f_i\}_{i \in \Gamma}) = \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} f_i f_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \lambda_{ijk} f_i f_j f_k + \dots + \lambda_{12\dots m} f_1 f_2 \dots f_m \quad (3.3.9)$$

Здесь коэффициенты $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, m)$ отражают влияние на результирующую оценку отдельно взятых частных показателей, коэффициенты $\lambda_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, m)$ - влияние совокупностей по двум частным показателям, $\lambda_{ijk} (i, j, k = 1, 2, \dots, m)$ - по трем частным показателям и т.д. С одной стороны, назначение коэффициентов важности в формуле (3.3.9), является не просто сложной (таблица 3.3.1), а супер-

сложной задачей. С другой стороны, вычисление результирующего показателя, с помощью которого можно определять критичность отказа ФЭ СЛО, усложняется неточными, нечеткими, интервальными, лингвистическими значениями частных показателей. Для разрешения указанных проблем предлагается использовать ниже приведенные нечетко-возможностный подход и подход с применением нечеткой логики и метода теории планирования эксперимента.

3.3.4 Нечетко-возможностный подход к построению результирующих показателей многокритериального оценивания

Предположим, что заданы $f_i (i = 1, \dots, m)$ частные показатели, которые оценивают критичность отказов множества ФЭ СЛО $W = \{w\}$. Частные показатели критичности отказов ФЭ СЛО $f_i(X_1, X_2, \dots, X_n, Z) (i = 1, \dots, m)$ зависят от различных структурных, конструктивных и других параметров (X_j) СЛО и от влияния внешней среды (Z). Эта взаимосвязь параметров и показателей может задаваться не только в аналитическом, но и в алгоритмическом виде путем построения различных моделей функционирования СЛО.

При этом сведения о параметрах и внешней среде носят неточный, неопределенный характер, особенно в условиях чрезвычайных ситуаций. Имеется значительная неопределенность в возможностях достижения характеристик объекта тех или иных своих значений. В связи с этим полагаем, что возможности параметров реализации заданы в виде нечетких множеств $X_j = \{(x_j, \mu_j(x_j))\}$, $Z = \{(z, \nu(z))\}$. Здесь $\mu_j(x_j)$, $\nu(z)$ характеризуют возможности того, что параметры X_j , характеристики внешней среды Z могут принимать соответственно значения x_j, z .

Учитывая вышесказанное, считаем, что, в самом общем случае, частные показатели критичности отказов ФЭ СЛО будут представлены в виде нечеткого со-

бытия $f_i : W \rightarrow \mathfrak{R}(Y_i)$, где для каждого ФЭ $w \in W$ Сло частная оценка критичности отказов $f_i(w) \subseteq Y_i$ является нечетким множеством $f_i(w) = \{(y_i, \mu_{f_i(w)}(y_i))\}$, $y_i \in Y_i$ - значения показателя f_i , $\mu_{f_i(w)}(y_i)$ - функция принадлежности, интерпретируемая как возможность того, что показатель f_i примет значение y_i .

Таким образом, задача заключается в построении обобщенного показателя критичности отказа ФЭ Сло $f_{\text{рез}}^{(8)}(w) = F^{(8)}\left(\{f_i(w)\}_{i=1, \dots, m}\right)$, представляющего собой некоторую операцию над нечеткими событиями, объединяющую частные показатели и учитывающую их влияние на оценку критичности отказа $w \in W$.

Для того, чтобы учесть нелинейный характер влияния показателей f_i друг на друга и в целом на обобщенный показатель критичности отказа ФЭ Сло, а также нечетко-возможностное представление частных показателей, предлагается при построении обобщенного показателя использовать нечетко-возможностную свертку, основанную на нечеткой мере и нечетком интеграле [31,43,126,172,195].

Пусть $g_i, i = 1, \dots, m$, ($0 < g_i < 1$) коэффициенты важности отдельно взятых частных показателей при построении обобщенного показателя критичности отказов. Данная информация может быть получена от экспертов с применением различных методов экспертного оценивания [43,100,213-215]. Учет влияния совокупности различных показателей $f_i, i \in \Gamma = \{1, 2, \dots, m\}$, на обобщенную оценку критичности отказа ФЭ $w \in W$ предлагается осуществлять путем построения конструктивной λ -нечеткой меры Сугено на конечном множестве частных показателей $f_i, i \in \Gamma = \{1, 2, \dots, m\}$, где g_i - плотность распределения этой нечеткой меры. Мера Сугено отражает важность совокупности показателей при оценивании критичности отказа ФЭ Сло и имеет следующий вид (3.3.10):

$$G_\lambda(\{f_i, i \in \Gamma^1\}) = \left[\prod_{i \in \Gamma^1} (1 + \lambda g_i) - 1 \right] / \lambda, \quad \Gamma^1 \subseteq \Gamma. \quad (3.3.10)$$

Следует указать, что значение λ находится из условия нормировки λ -нечеткой меры Сугено $\left[\prod_{i=1}^m (1 + \lambda g_i) - 1 \right] / \lambda = 1, \quad -1 < \lambda < \infty$.

Обобщенный показатель критичности отказов предлагается конструировать в виде нечеткой свертки, позволяющей гибко учитывать нелинейный характер влияния частных показателей. Для чего используем понятие нечеткого интеграла по λ -нечеткой мере Сугено (3.3.11):

$$f_{\text{рез}}^{(8)}(w) = F^{(8)}\left(\{f_i(w)\}_{i=1,\dots,m}\right) = \int h \circ G_\lambda = \sup_{\alpha \in [0,1]} \min\{\alpha, G_\lambda(H_\alpha(w))\}, \quad (3.3.11)$$

где $H_\alpha(w) = \{f_i | h(f_i, w) \geq \alpha\}$ - множество показателей, степень влияния которых на оценку критичности отказа ФЭ $w \in W$ превышает порог требований α к значениям показателей, а $h: F \times W \rightarrow [0,1]$ является оценочной функцией частных показателей $F = \{f_i, i \in \Gamma\}$ для ФЭ СЛО $w \in W$.

В качестве значений оценочной функции $h: F \times W \rightarrow [0,1]$ будем принимать значения частных показателей, приведенных к безразмерному виду с носителем нечеткого множества $f_i(w) = \{(y_i, \mu_{f_i(w)}(y_i))\}$ в интервале $[0,1]$ с помощью следующего преобразования:

$$\tilde{f}_i(w) = \left(\frac{y_i - v_{i^*}}{v_i^* - v_{i^*}}, \mu_{f_i(w)}(y_i) \right), \text{ где } v_{i^*} = \min_{w \in W} \min_{\mu_{f_i(w)}(y_i) > 0} \{y_i\}, v_i^* = \max_{w \in W} \max_{\mu_{f_i(w)}(y_i) > 0} \{y_i\}.$$

Рассмотрим частный случай предложенного подхода к многокритериальному оцениванию критичности отказов ФЭ СЛО. Пусть частные показатели критичности отказов из множества $F = \{f_i, i \in \Gamma\}$ принимают четкие значения, т.е. $f_i: W \rightarrow R^1$.

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

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

В работе [172] 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

$$f_{\text{рез}}^{(8)}(w) = F^{(8)}\left(\{f_i(w)\}_{i=1, \dots, m}\right) = \int h \circ G_\lambda = \sup_{\alpha \in [0,1]} \min\{\alpha, G_\lambda(H_\alpha(w))\}$$

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

Пример использования методики многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СЛО

Пусть критичность отказов ФЭ СЛО оценивается тремя частными показателями $F = \{f_i, i = 1, 2, 3\}$ (f_1 - интенсивность использования ФЭ СЛО при проведении технологических операций управления, f_2 - вклад ФЭ СЛО в структурную надежность СЛО, f_3 - не возможность локализации отказа ФЭ СЛО). Используя методы экспертного оценивания указанным показателям присвоены коэффициенты важности соответственно $g_1 = 0.2$, $g_2 = 0.6$, $g_3 = 0.4$. Предположим, что производилось оценивание критичности отказов трех ФЭ СЛО по рассматриваемым частным показателям, результаты которого приведены в таблице 3.3.2.

Таблица 3.3.2 - Значения частных показателей критичности отказов ФЭ

F	W_1	W_2	W_3
f_1	0.33	0.44	0.22
f_2	0.33	0.17	0.5
f_3	0.14	0.28	0.56

Согласно описанной методике осуществим расчет интегрального показателя критичности отказа каждого ФЭ СЛО. Вначале вычислим параметр λ^* нечеткой меры Сугено, решив уравнение

$$\frac{(1+0.2\lambda)(1+0.6\lambda)(1+0.4\lambda)-1}{\lambda} = 1 \Rightarrow 0.048\lambda^2 + 0.44\lambda + 0.2 = 0$$

Корни уравнения равны соответственно $\lambda_1^* \approx -0.48, \lambda_2^* \approx -8.69$. Второе решение не удовлетворяет условию $-1 < \lambda < \infty$, следовательно, $\lambda^* \approx -0.48$.

Используя формулу (3.3.11), определим интегральный показатель критичности отказа для первого ФЭ СЛО.

Если $0 < \alpha \leq 0.14$, то $H_\alpha(w_1) = \{f_i | h(f_i, w_1) \geq \alpha\} = \{f_1, f_2, f_3\}$ и, соответственно, $G_\lambda(H_\alpha(w_1)) = 1$.

$$\text{Следовательно, } \sup_{\alpha \in [0, 0.14]} \min\{\alpha, G_\lambda(H_\alpha(w_1))\} = 0.14.$$

Если $0.14 < \alpha \leq 0.33$, то $H_\alpha(w_1) = \{f_i | h(f_i, w_1) \geq \alpha\} = \{f_1, f_2\}$ и, соответственно, $G_\lambda(H_\alpha(w_1)) = \frac{(1+0.2\lambda^*)(1+0.6\lambda^*)-1}{\lambda^*} \approx 0.742$.

$$\text{Следовательно, } \sup_{\alpha \in [0.14, 0.33]} \min\{\alpha, G_\lambda(H_\alpha(w_1))\} = 0.33.$$

Если $0.33 < \alpha \leq 1$, то $H_\alpha(w_1) = \emptyset$ и, соответственно, $G_\lambda(H_\alpha(w_1)) = 0$.

$$\text{Следовательно, } \sup_{\alpha \in [0.14, 0.33]} \min\{\alpha, G_\lambda(H_\alpha(w_1))\} = 0.$$

Интегральный показатель критичности отказа первого ФЭ СЛО равен $f_{\text{рез}}^{(8)}(w_1) = \sup_{\alpha \in [0, 1]} \min\{\alpha, G_\lambda(H_\alpha(w_1))\} = 0.33$.

Аналогично произведем расчеты обобщенных показателей критичности отказа для двух оставшихся ФЭ СЛО. Результаты вычислений будут следующие:

$$f_{\text{рез}}^{(8)}(w_2) = \sup_{\alpha \in [0, 1]} \min\{\alpha, G_\lambda(H_\alpha(w_2))\} = 0.28,$$

$$f_{\text{рез}}^{(8)}(w_3) = \sup_{\alpha \in [0, 1]} \min\{\alpha, G_\lambda(H_\alpha(w_3))\} = 0.5.$$

Таким образом, наиболее критичным ФЭ является третий, далее первый и, наконец, второй элемент.

3.3.5 Подход с применением нечеткой логики и метода теории планирования эксперимента для многокритериального оценивания

Как показывает проведенный анализ, учет факторов неопределенности и неполноты информации является неотъемлемой принадлежностью сложных объектов. Причем традиционный путь учета факторов неопределенности на основе вероятностного и статистического моделирования в ряде ситуаций может оказаться неадекватным решаемым задачам и привести к неверным результатам.

Указанные ситуации на практике характеризуются:

- неполнотой или отсутствием знаний о поведении отдельных элементов и подсистем, а также взаимосвязей между ними;
- ограниченной возможностью экспериментального исследования процессов управления СЛО, а также необоснованно высокой стоимостью экспериментов, не позволяющей получить достаточной статистической информации о различных характеристиках системы;
- изменением целей и способов функционирования СЛО, тактики их целевого применения, требующих учета факторов неопределенности и возможности реализации характеристик, входящих в СЛО функциональных элементов;
- многоцелевым, многофункциональным характером задач управления и оценивания;
- качественными оценками критичности отказов ФЭ СЛО, вызванных воздействием внешних и внутренних факторов;
- во многих случаях человек (эксперт, группа экспертов) представляет собой единственный источник сведений о разрабатываемых блоках, подсистемах СЛО и объекта в целом.

При этом необходимо отметить, что указанные причины отражают объективную недостаточную информированность ЛПР, о возможных количественных значениях тех или иных факторов, а сам процесс управления СЛО базируется на

некоторых субъективных суждениях ЛПР, отражающих его собственный опыт и интуицию как эксперта.

Наиболее перспективным следует считать путь учета факторов неопределенности, в котором комплексно и гибко используются все адекватные тем или иным реальным условиям методы исследования. Анализ показывает, что в этом случае за счет многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ Сло повышается обоснованность принимаемых решений по управлению указанными системами.

Основные особенности и соответствующие проблемы, связанные с решением задач многокритериального оценивания, имеют скорее не вычислительный, а концептуальный характер. Для корректного решения указанной проблемы необходимо получение дополнительной информации от ЛПР, на основе которой формируется соответствующее результирующее отношение предпочтения (правило согласования).

Построение результирующего отношения предпочтения осуществляется на основе анализа характеристик решаемой задачи оценивания и системы предпочтений ЛПР. Проблема приведения оценок критичности отказов ФЭ Сло по различным критериям к сопоставимому виду решается либо путем нормализации критериев, либо путем использования специальных шкал или балльных шкал.

В условиях неопределенности, если экспертные оценки критичности отказов ФЭ Сло по частным критериальным функциям представлены лингвистическими переменными, то ЛПР должно выбрать шкалу лингвистических оценок по критериям, способ учета важности критериев и способ свертки информации. Для реализации указанного подхода разработаны различные методы [4,5,31,126], включающие метод максиминной свертки, метод отношений предпочтения, метод аддитивной свертки, метод лингвистической векторной оценки и метод нечеткого логического вывода.

Анализ методов принятия решений при многих критериях на нечетких моделях [124] показал, что наибольшей устойчивостью результатов относительно исходных данных обладает метод на основе нечеткой логики, и позволил сформу-

лизовать требования к широкому применению интеллектуальных методов на основе нечеткой логики, а также развитию комбинированных методов принятия решений с использованием нечетких представлений.

В данной параграфе предлагается комбинированный метод решения задачи многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СЛО в условиях существенной неопределенности с использованием метода нечеткого логического вывода и метода теории планирования эксперимента [2,125,144,227], позволяющих строить гибкие результирующие свертки показателей.

Допустим, что критичность отказов ФЭ СЛО оценивается набором показателей $F = \{f_i, i = 1, \dots, m\}$, каждый из которых представляет собой лингвистическую переменную. Например, лингвистическая переменная $f_i = \text{«Уровень тяжести последствий отказа ФЭ СЛО»}$ может принимать значения из множества простых и составных термов $T(f_i) = \{\text{«низкий»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средний»}, \text{«выше среднего»}, \text{«высокий»}\}$. Набор из нескольких показателей с соответствующими значениями термов характеризует представление ЛПР о результирующем показателе, выражающем обобщенный взгляд на критичность отказа ФЭ СЛО. Введем для результирующего показателя лингвистическую переменную, например, «Критичность отказа ФЭ СЛО», которая может принимать следующие значения $T(f_{\text{оц}}) = \{\text{«плохая»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средняя»}, \text{«выше среднего»}, \text{«хорошая»}\}$.

Знания ЛПР в общем виде можно представить следующими продукционными правилами:

P_j : «Если $f_1 = A_{1j}$ и $f_2 = A_{2j}$ и ... и $f_m = A_{mj}$, то $f_{\text{рез}} = A_{\text{рез}j}$ », где $A_{ij} \in T(f_i)$, $A_{\text{рез}j} \in T(f_{\text{рез}})$.

Термы A_{ij} , $A_{\text{рез}j}$ можно задать с помощью нечетких чисел (L-R) типа. Тогда значения показателя «Уровень тяжести последствий отказа ФЭ СО» можно представить по некоторой 100 бальной шкале (рисунок 3.3.1).

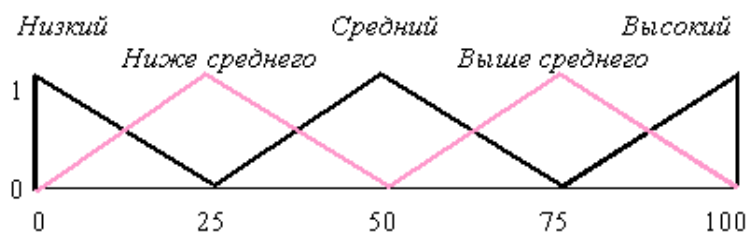


Рисунок 3.3.1 - Значения показателя «Уровень тяжести последствий отказа ФЭ СЛО»

Аналогично можно описать возможные значения других частных показателей.

Для построения результирующего показателя необходимо перевести значения показателей f_i в шкалу $[-1, +1]$. Крайние значения лингвистической переменной f_i порядковой шкалы маркируют -1 и $+1$, при этом точка «0» соответствует лингвистическому определению середины шкалы согласно физическому смыслу данного показателя.

Кодирование лингвистической переменной f_i можно осуществлять по формулам $\tilde{f}_i = (f_i - f_{cp}) / h$, где f_i – значение показателя на шкале лингвистической переменной; $f_{cp} = (f_{i_{max}} + f_{i_{min}}) / 2$ – средняя точка шкалы переменной; $h = (f_{i_{max}} - f_{i_{min}}) / 2$ – интервал варьирования; $f_{i_{max}}, f_{i_{min}}$ – крайние значения переменной.

Результат кодирования представлен на рисунке 3.3.2.

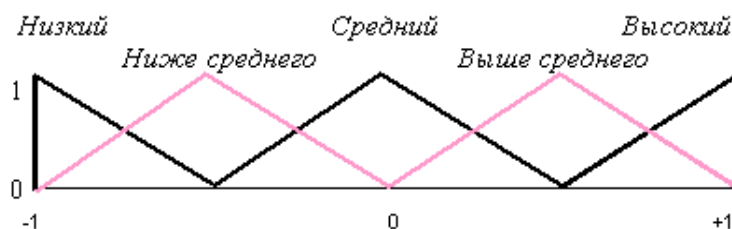


Рисунок 3.3.2 - Кодирование показателя «Уровень тяжести последствий отказа ФЭ СЛО»

Пусть $f_{рез}$ может принимать следующие значения в шкале $[0,1]$, представленные на рисунке 3.3.3. Проведем дефаззификацию значений лингвистической переменной $f_{рез}$, каждому терму поставим в соответствие моду его нечеткого числа («Плохая» – 0,2; «Ниже среднего» – 0,45; «Средняя» – 0,55; «Выше среднего» – 0,75; «Хорошая» – 1).

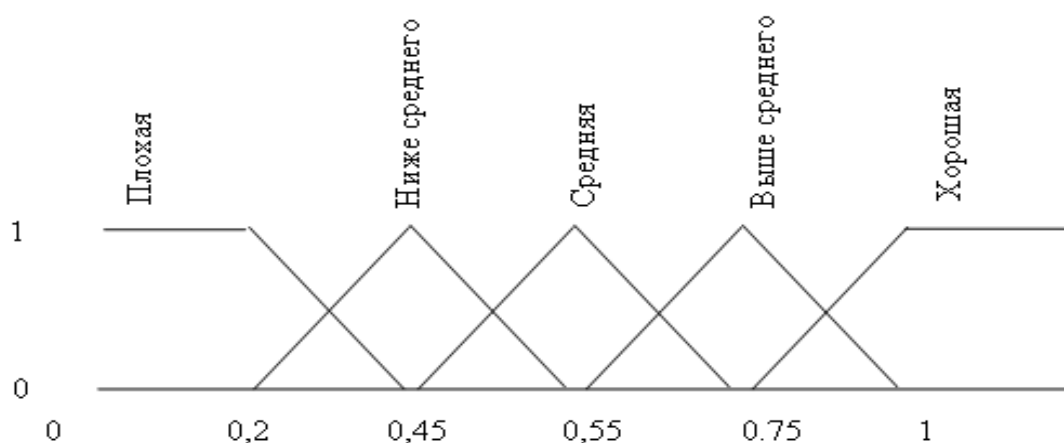


Рисунок 3.3.3 - Значения интегрального показателя

Расчет коэффициентов полинома производится по правилам, принятым в теории планирования экспериментов, для чего вычисляются усредненные скалярные произведения соответствующих столбцов ортогональной матрицы на вектор дефаззифицируемых значений результирующего показателя. Полученные результаты приведены ниже в таблице 3.3.5.

Таблица 3.3.5 - Результаты вычислений

$f_0 * f_{рез}$	$f_1 * f_{рез}$	$f_2 * f_{рез}$	$f_3 * f_{рез}$	$f_1 * f_2 * f_{рез}$	$f_1 * f_3 * f_{рез}$	$f_2 * f_3 * f_{рез}$	$f_1 * f_2 * f_3 * f_{рез}$	Расч.
0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,2	0,2	-0,2	0,200
0,45	0,45	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45	0,45	0,45	0,450
0,2	-0,2	0,2	-0,2	-0,2	0,2	-0,2	0,2	0,200
0,55	0,55	0,55	-0,55	0,55	-0,55	-0,55	-0,55	0,550
0,4	-0,4	-0,4	0,4	0,4	-0,4	-0,4	0,4	0,400
0,75	0,75	-0,75	0,75	-0,75	0,75	-0,75	-0,75	0,750
0,55	-0,55	0,55	0,55	-0,55	-0,55	0,55	-0,55	0,550
1	1	1	1	1	1	1	1	1,000
λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_{12}	λ_{13}	λ_{23}	λ_{123}	
0,5125	0,175	0,0625	0,1625	0,025	0,025	0,0375	0	

Таким образом, свертка показателей в нашем случае имеет следующий вид

$$f_{pez} = 0,5125 + 0,175f_1 + 0,0625f_2 + 0,1625f_3 + 0,025f_1f_2 + 0,025f_1f_3 + 0,0375f_2f_3 .$$

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 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{12\dots m}$.

Иллюстративный пример применения предлагаемого подхода

Для исследования предложенного подхода рассмотрим небольшой пример, приведенный в работе [11], и сравним результаты ранжирования ФЭ СЛО по степени критичности предлагаемым методом с методом выделения паретовских слоев, изложенным в работе [11].

В качестве вектора критичности выберем двухкомпонентный вектор $\mathbf{f}=(f_1, f_2)$. Требуется проранжировать 10 элементов $X=\{x_i, i=1, \dots, 10\}$, имеющих следующие оценки критичности $\mathbf{f}(x_1)=(0.1, 0.1)$, $\mathbf{f}(x_2)=(0.6, 0.1)$, $\mathbf{f}(x_3)=(0.8, 0.1)$, $\mathbf{f}(x_4)=(1.0, 0.1)$, $\mathbf{f}(x_5)=(0.1, 0.4)$, $\mathbf{f}(x_6)=(0.4, 0.4)$, $\mathbf{f}(x_7)=(0.6, 0.4)$, $\mathbf{f}(x_8)=(0.1, 0.6)$, $\mathbf{f}(x_9)=(0.8, 0.6)$, $\mathbf{f}(x_{10})=(0.1, 0.8)$. Результаты выделения паретовских слоев с использованием классического отношения доминирования по Парето на множестве $X=\{x_i, i=1, \dots, 10\}$ представлены на рисунке 3.3.4.

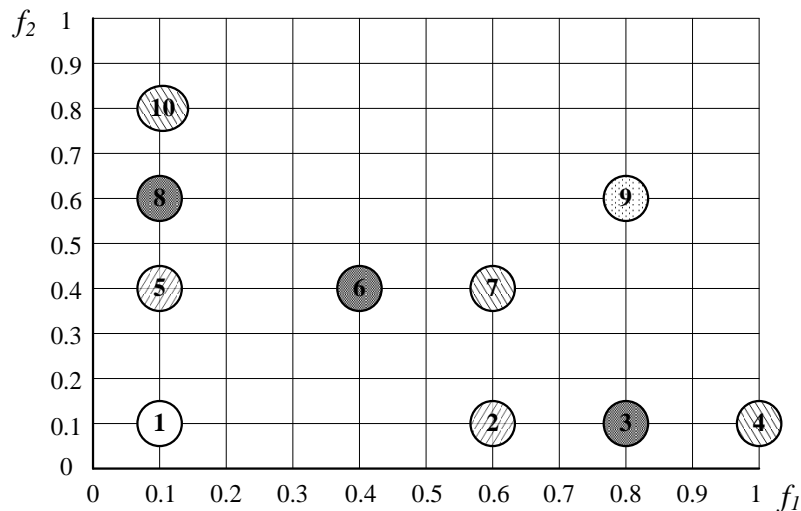


Рисунок 3.3.4 - Разбиение элементов СЛО на паретовские слои

Здесь паретовские слои состоят из следующих элементов: $X_1^{nd} = \{x_1\}$, $X_2^{nd} = \{x_2, x_5\}$, $X_3^{nd} = \{x_3, x_6, x_8\}$, $X_4^{nd} = \{x_4, x_7, x_{10}\}$, $X_5^{nd} = \{x_9\}$. Для ранжирования элементов по степени критичности [11] в каждом слое использовалась линейная свертка показателей вида $f_{пез}(x_i) = \lambda_1 f_1(x_i) + \lambda_2 f_2(x_i)$. Пусть коэффициенты важности показателей критичности одинаковы $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$. Тогда результат ранжирования элементов множества $X = \{x_i, i = 1, \dots, 10\}$ следующий $x_1 \prec x_5 \prec x_2 \prec x_8 \prec x_6 \prec x_3 \prec x_{10} \prec x_7 \prec x_4 \prec x_9$, что представлено на рисунке 3.3.5.

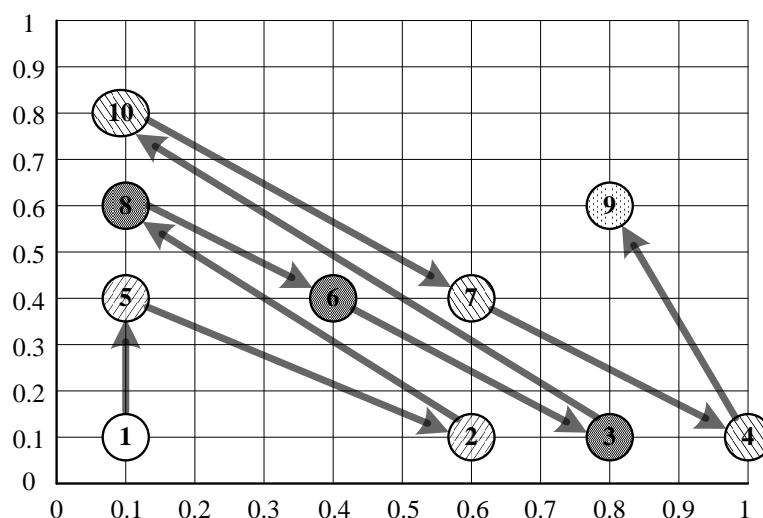


Рисунок 3.3.5 - Результаты ранжирования элементов Сло по методике [11]

Несложно заметить, что в случае применения данного метода элементы x_6 , x_7 в соответствующих паретовских слоях $X_3^{nd} = \{x_3, x_6, x_8\}$, $X_4^{nd} = \{x_4, x_7, x_{10}\}$ при различных комбинациях коэффициентов важности λ_1 , λ_2 в результате их ранжирования всегда будут доминироваться элементами данных слоев. Это означает, что при решении задач ранжирования и определения критичных элементов на паретовских слоях элементы x_6 , x_7 ни при каких условиях не будут признаны наиболее или наименее критичными.

Проведем ранжирование элементов Сло по степени их критичности предлагаемым комбинированным методом. Покажем, что из паретовских слоев можно выделять элементы x_6 , x_7 , также как и любые другие. Пусть ортогональный план экспертного опроса представлен в таблице 3.3.6.

Таблица 3.3.6 - Вычисление значений коэффициентов полинома

f_0	f_1	f_2	$f_{\delta\alpha\zeta}$	$f_1 f_2$
1	-1	-1	0,1	1
1	1	-1	0,9	-1
1	-1	1	1	-1
1	1	1	1	1
$f_0 * f_{рез}$	$f_1 * f_{рез}$	$f_2 * f_{рез}$	$f_1 * f_2 * f_{рез}$	Значения полинома
0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,100
0,9	0,9	-0,9	-0,9	0,900
1	-1	1	-1	1,000
1	1	1	1	1,000
$\lambda_0=0,75$	$\lambda_1=0,2$	$\lambda_2=0,25$	$\lambda_{12}=-0,2$	

Обработав данные экспертного опроса по изложенной выше методике, получим следующее уравнение, описывающее мнение эксперта: $f_{рез}=0,75+0,2f_1+0,25f_2-0,2f_1f_2$. Результаты вычисления интегрального показателя критичности отказов элементов приведены на рисунке 3.3.6 и рисунке 3.3.7.

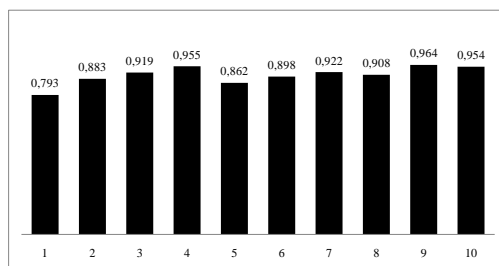


Рисунок 3.3.6 - Значения интегрального показателя критичности отказов для элементов

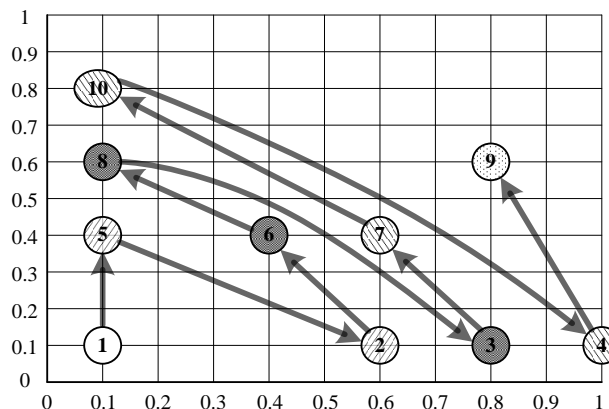


Рисунок 3.3.7 - Результаты ранжирования элементов СлО по предлагаемой методике

Полученные результаты ранжирования элементов СлО по степени их критичности схожи с выше представленной ранжировкой (рисунок 3.3.5). При этом элементы x_6 , x_7 в соответствующих паретовских слоях $X_3^{nd} = \{x_3, x_6, x_8\}$, $X_4^{nd} = \{x_4, x_7, x_{10}\}$ по мнению эксперта оказались наименее критичными.

Выводы

В заключение третьего раздела можно сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ современного состояния исследований критичности отказов элементов СлО. Проблема выявления критичных элементов особенно актуальна при анализе надежности и живучести систем в условиях ограниченных ресурсов. Показано, что критичность отказов элементов СлО представляет собой векторное свойство, для изучения которого требуется использовать различные частные показатели критичности, отражающие как структурно-топологические, так и структурно-функциональные свойства системы. При этом частные показатели критичности отказов элементов СлО носят как количественный, так и качественный характер. Таким образом, задача выявления и ранжирования ФЭ СлО по степени критичности отказов представляет собой задачу многокритериального оценивания с лингвистическими показателями критичности отказов ФЭ СлО.

2. Введен структурно-функциональный показатель интенсивности использования ФЭ СлО при проведении технологических операций управления объектами, который предлагается использовать как частный показатель критичности отказов ФЭ СлО. Для анализа интенсивности и равномерности использования ФЭ СлО при выполнении различных функциональных задач предлагается использовать подход, в основе которого лежит понятие модельного графа (специального гиперграфа, введенного профессором В.А. Горбатовым) и операция дифференцирования теоретико-графовых моделей.

3. 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.

4. Предложены два новых метода решения многокритериальной задачи оценивания критичности отказов ФЭ СЛО. Первый метод ориентирован, в отличие от известных, на использование нечетко-возможностного подхода к построению результирующих показателей. Метод заключается в выработке обобщенного показателя критичности отказов ФЭ СЛО, представляющего собой некоторую операцию над нечеткими событиями. Для того чтобы учесть 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, предлагается при построении обобщенного показателя использовать нечетко-возможностную свертку, основанную на понятиях нечеткой меры и нечеткого интеграла.

5. В основе второго метода многокритериального оценивания критичности отказов ФЭ СЛО лежит синтез методов теории планирования эксперимента и нечеткого логико-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 обладает достаточной универсальностью, 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.

4 Методы, модели и алгоритмы построения сценариев (траекторий) структурной реконфигурации сложных объектов

Продолжая изложение агрегативно-декомпозиционного подхода к решению проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО раскроем содержание *третьего направления*, связанного с построением эталонных пессимистических и оптимистических сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СЛО. Учитывая результаты выше проведенного анализа в разделе 1 и специфические особенности решаемой в диссертации проблемы данное направление исследований включает в себя следующие *этапы*: построение серий пессимистических и оптимистических сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СЛО, выделение с использованием структурно-топологических показателей классов (кластеров) эквивалентных пессимистических и оптимистических сценариев (траекторий) изменения структурных состояний, выявление среди элементов построенных кластеров типовых (эталонных) сценариев структурной реконфигурации СЛО. Одним из полученных результатов является снижение мощности исследуемого множества сценариев структурной реконфигурации СЛО, что повлечет уменьшение размерности задачи многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, решению которой посвящено *четвертое направление* диссертационных исследований.

4.1 Обобщенная модель структурной реконфигурации СЛО

Согласно концептуальной модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО (раздел 1, параграф 1.4) рассмотрим процесс построения сценариев (траекторий) структурной реконфигурацией СЛО, вызванных отказами их ФЭ. Реализация данного процесса предполагает выполнение следующих этапов: введение структурно-топологических показателей $F_h(S_v)$, $h \in \hat{H}^{str} \subseteq \hat{H}$, введенных в разделе 2, и определение области работоспособности СЛО с позиции структурного построения, формирование и выбор наилуч-

ших (или наихудших) вариантов изменения структурных состояний СЛО в области работоспособности, формирование классов эквивалентных траекторий изменения структурных состояний СЛО и выделение эталонных сценариев структурной реконфигурации СЛО.

Рассмотрим задачу построения сценариев структурной реконфигурации СЛО как задачу планирования.

Пусть структура St СЛО может изменяться, причем эти изменения, т. е. вариации δSt структуры St , принадлежат заданному множеству Ξ допустимых вариаций $\delta St \in \Xi$. В общем случае множество Ξ определяется некоторым набором свойств, заданных системой равенств и неравенств вида $\Xi: W_r(St + \delta St) \geq 0, r = 1, 2, \dots, R$. Качество структурных изменений СЛО в общем случае оценивается некоторым множеством структурно-топологических показателей $F_h(St), h \in \hat{H}^{str} \subseteq \hat{H}$. Для решения соответствующей задачи многокритериальной оптимизации вида $F_h(St) \rightarrow \min, h \in \hat{H}^{str}$, следует ввести согласующее правило Φ , используя которое можно перейти к задаче однокритериального оценивания качества структурных изменений СЛО, $\Phi(\{F_h(St), h \in \hat{H}^{str}\}) \rightarrow \min$. 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 некоторое финальное структурное состояние St_f .

Таким образом, задачу планирования структурной реконфигурацией СЛО можно представить как оптимизационную задачу следующего вида:

$$\sum_{i=1}^N \Phi(\{F_h(St_{i-1} + \delta St_i), h \in \hat{H}^{str}\}) \rightarrow \min_{\substack{\delta St_i \in \Xi, \\ i=1, 2, \dots, N \\ St_N = St_f}} \quad (4.1)$$

Сложность решения (4.1) для реальных задач заключается, прежде всего, в том, что как структурно-топологические показатели $F_h, h \in \hat{H}^{str}$, так и функция согласования Φ и область допустимых вариаций Ξ 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 [39,201-203,234] практически исключает применение стандартных методов математического программирования, опирающихся на известную структуру и вид показателей F_h , $h \in \hat{H}^{sr}$ и допустимую область Ξ .

Для описания монотонных структур могут использоваться деревья отказов и событий, графы связности, многополюсные сети, схемы функциональной целостности (СФЦ) из ОЛВМ и т.п. Для немонотонных структур – СФЦ, а также могут применяться когнитивные модели (раздел 2, параграф 2.1.1).

Процесс реконфигурации структуры СЛО непосредственно связан с множеством Ξ возможных вариаций структуры. Данное множество может состоять из следующих структурных вариаций $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$, представляющих собой операции над вершинами и ребрами графовой модели. Такими операциями, например, могут быть [39,201]: ξ_1 — объединение двух выбранных вершин графа в одну; ξ_2 — введение новой вершины со связями до других вершин; ξ_3 — устранение выбранной вершины вместе с ее связями; ξ_4 — введение новой связи двух выбранных вершин; ξ_5 — устранение выбранного ребра и т. д.

Как видно, спектр структурных факторов, с помощью которых можно изменять структуру СЛО, достаточно велик, что обеспечивает структурной реконфигурации большое разнообразие.

4.2 Постановка задачи построения сценариев структурной реконфигурации СЛО на основе концепции ее генома

В разделе 2 диссертации введено понятие генома структуры, представляющего собой вектор $\bar{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$, компонентами которого являются коэффициенты полинома $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$ функции отказов структуры, составленной из однородных ФЭ. Геном структуры содержит и позволяет определить следующую информацию в процессе структурного исследования сложных объектов:

- информацию о топологических свойствах монотонной структуры системы;
- позволяет определить к какому классу монотонных или немонотонных структур относится структура СЛО;
- с его помощью можно вычислять некоторые частные показатели критичности отказов ФЭ монотонных и немонотонных структур СЛО.

Как правило, анализ структурно-сложных объектов начинается с построения схемы функциональной целостности объекта и расчета векторных оценок свойства критичности отказов ФЭ объекта с использованием количественных и качественных показателей (раздел 3), которые позволяют выявить множество критичных ФЭ СЛО, которое обозначим через $\hat{Q} = \{Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{iN}\}$.

Для формального описания процесса структурной реконфигурации СЛО в качестве факторов, с помощью которых можно изменять структуру СЛО, будем рассматривать операцию удаления (восстановления) критичных элементов $\hat{Q} = \{Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{iN}\}$ из схемы функциональной целостности. В общем случае в качестве критичных элементов могут рассматриваться все ФЭ СЛО.

В процессе удаления (восстановления) критичных элементов структура СЛО может находиться в одном из своих промежуточных состояний. На рисунке 4.1 приведены возможные промежуточные структурные состояния реконфигурируемой системы при условии, что число критичных элементов равно $N = 5$.

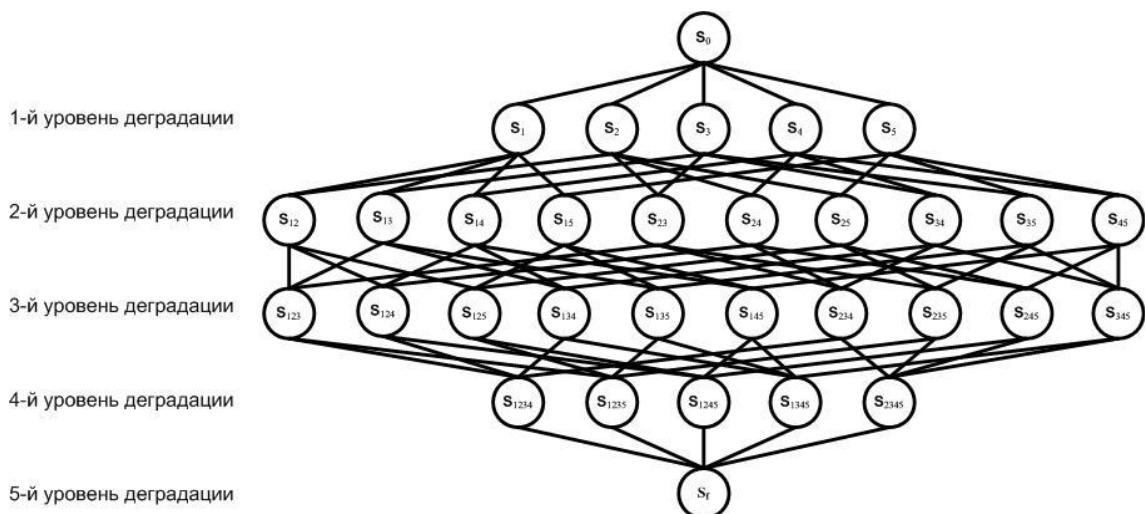


Рисунок 4.1 - Уровни деградации структуры СО

Причем 1-му уровню деградации соответствуют структурные состояния, связанные с отказом одного критичного элемента, 2-му уровню – структурные состояния, вызванные отказом произвольных двух критичных элементов и т.д.

Начальное $S_0(St_0)$, финальное $S_f(St_f)$ и каждое промежуточное $S_\alpha(St_\alpha)$ структурные состояния характеризуются своими геномами $\vec{\chi}_\alpha$. Ранее проведенные исследования (раздел 2) показали, что интегральные (вероятностные и возможностные) показатели структурного отказа для рассматриваемых состояний можно вычислять по следующим формулам:

$$F_{\text{однор}}(\vec{\chi}_\alpha) = \vec{\chi}_\alpha \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1}\right)^T, \quad F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}_\alpha) = \vec{\chi}_\alpha \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T,$$

$$F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}_\alpha) = \sup_{\mu \in [0,1]} \min \{ \vec{\chi}_\alpha \cdot (1, \mu, \mu^2, \dots, \mu^n)^T, g(\mu) \}. \quad (4.2)$$

Как показано в разделе 2 получаемые оценки (4.2) являются средними ($F_{\text{однор}}(\vec{\chi}_\alpha)$), оптимистическими и пессимистическими ($F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}_\alpha)$, $F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}_\alpha)$) (смотри рисунок 2.2.9 раздел 2).

Наряду с вычислением показателей структурного отказа (или структурной надежности) СЛО, предлагаемый подход можно использовать для определения значимости, положительного и отрицательного вкладов отдельных элементов системы в ее структурную надежность. Так для вычисления значимости и положительного вклада i -го элемента в структурный отказ СЛО следует воспользоваться следующими полиномами (параграф 2.2.3):

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

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

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

Каждому из рассматриваемых полиномов $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ можно сопоставить соответствующий геном $\vec{\chi}_i^\xi$, $\vec{\chi}_i^+$, используя которые можно вычислять значимость и вклад в структурный отказ (надежность) (пессимистиче-

ский, оптимистический и средний) при отказе i -го элемента СЛО с использованием выше приведенных показателей (4.2).

Следует отметить, что нулевое значение значимости и вклада i -го элемента говорит о том, что данный элемент не влияет на показатель структурного отказа системы, положительное значение значимости (вклада) i -го элемента означает максимально возможное (реальное) увеличение структурного отказа (уменьшение структурной надежности) системы, отрицательное значение значимости (вклада) i -го элемента определяет максимально возможное (реальное) уменьшение структурного отказа (увеличение структурной надежности) системы при выходе из строя i -го элемента. Все элементы монотонных структур первого типа могут иметь только положительные или нулевые значения рассматриваемых характеристик. Наличие отрицательных значений значимости (вклада) элементов возможно как у монотонных структур второго типа, так и у немонотонных структур.

Кроме того, важно отметить, что полиномы $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ вне зависимости от того характеризует ли полином отказа $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ монотонную или немонотонную структуру могут иметь одно из нижеперечисленных свойств (параграф 2.2.3):

➤ монотонно возрастают, сохраняют «0» и «1» (т. е. $\xi_i(0, \dots, 0) = 0$, $\xi_i(1, \dots, 1) = 1$; $B_i^+(0, \dots, 0) = 0$; $B_i^+(1, \dots, 1) = 1$);

➤ монотонно убывают, не сохраняют «0» и «1» (т. е. $\xi_i(0, \dots, 0) = 1$, $\xi_i(1, \dots, 1) = 0$; $B_i^+(0, \dots, 0) = 1$, $B_i^+(1, \dots, 1) = 0$);

➤ немонотонны, сохраняют либо «0», либо «1» (т. е. $\xi_i(0, \dots, 0) = 1$, $\xi_i(1, \dots, 1) = 1$; $\xi_i(0, \dots, 0) = 0$, $\xi_i(1, \dots, 1) = 0$; $B_i^+(0, \dots, 0) = 1$, $B_i^+(1, \dots, 1) = 1$; $B_i^+(0, \dots, 0) = 0$, $B_i^+(1, \dots, 1) = 0$).

Используя концепцию генома структуры, понятия значимости и вклада элементов в структурный отказ (структурную надежность), введенные средние, пессимистические и оптимистические показатели (4.2) структурного отказа, а также операции преобразования структуры, проведем формализацию задачи структурной реконфигурации СЛО в соответствии с обобщенной моделью (4.1).

С этой целью введем понятие *непосредственно связанного структурного состояния* СЛО. Будем считать, что структурное состояние St_α , характеризующееся геномом $\vec{\chi}_\alpha$, *непосредственно связано* (т.е. переход из одного структурного состояния в другое путем удаления (восстановления) одного ФЭ) из некоторого структурного состояния St , 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 St в состояние St_α (из состояния St_α в состояние St).

Данную вариацию 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) структурной реконфигурации системы из St_0 в St_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) ФЭ СЛО в цепочке перехода является перестановкой элементов множества критичных элементов \hat{Q} .

Структурные изменения, происходящие в промежуточных состоянии $\vec{\chi}_\alpha$ на траектории структурной реконфигурации СЛО, будем оценивать показателем структурного отказа $F_{отказ}(\vec{\chi}_\alpha) \in \{F_{однор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{неоднор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{однорвозм}(\vec{\chi}_\alpha)\}$. Кроме того, в каждом промежуточном структурном состоянии $\vec{\chi}_\alpha$ СЛО должен обладать 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 Ξ , приведенной в обобщенной модели (4.1).

Тогда задачу построения траектории реконфигурации структуры в процессе деградации или восстановления СЛО можно представить в виде следующей оптимизационной задачи (4.3).

$$\sum_{j=0}^N F_{отказ}(\vec{\chi}_{\alpha_j}) \rightarrow \min_{\substack{\vec{\chi}_{\alpha_j} \in X(\vec{\chi}_{\alpha_{j-1}}) \\ \vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0, \vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f, \\ \Psi_l(\vec{\chi}_{\alpha_j}) \leq 0, l=1,2,\dots,L \\ \{Q_{j_1}, Q_{j_2}, \dots, Q_{j_N}\} = \hat{Q}}} \quad (4.3)$$

4.3 Комбинированный метод и алгоритм решения задачи построения траектории структурной реконфигурации СЛО

Для решения оптимизационной задачи (4.3) можно воспользоваться следующими соображениями. Пусть некоторое промежуточное структурное состояние St СЛО характеризуется полиномом функции отказа $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, которому можно сопоставить геном $\vec{\chi}$. Тогда полином отказа (и соответственно его геном) любого структурного состояния St_α , непосредственно достижимого из St ($\vec{\chi} \xrightarrow{Q_j} \vec{\chi}_\alpha$) при удалении Q_j ФЭ, можно вычислить по следующей формуле

$$T_\alpha(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_j=1} = T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) + B_j^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n), \quad \vec{\chi}_\alpha = \vec{\chi} + \vec{\chi}_j^+.$$

Вектор $\vec{\chi}$ позволяет рассчитать оценку $F_{отказ}(\vec{\chi})$ структурного отказа СЛО в состоянии St при надежной работе $Q_j = 0$ ФЭ, а значение $F_{отказ}(\vec{\chi}_j^+)$ характеризует вклад в структурный отказ при удалении этого ФЭ. Причем для монотонных структур первого типа значение $0 \leq F_{отказ}(\vec{\chi}_j^+) \leq 1$, т.е. при отказе $Q_j = 1$ ФЭ показатель структурного отказа увеличивается. Для монотонных структур второго типа и немонотонных структур первого и второго типа данное значение лежит в интервале от -1 до +1 ($-1 \leq F_{отказ}(\vec{\chi}_j^+) \leq 1$), т.е. показатель структурного отказа системы может как увеличиваться, так и уменьшаться.

Оптимизационная задача (4.3) относится к классу комбинаторных потоковых задач на сетях со следующими особенностями:

- если в качестве целевой функции используется показатель возможности структурного отказа ($F_{отказ}(\vec{\chi}_{\alpha_j}) \equiv F_{однорвозм}(\vec{\chi}_{\alpha_j})$), то вычисление аналитической зависимости целевой функции от оптимизационных переменных представляет собой сложную задачу, в которой значения целевой функции вычисляются алгоритмически как последовательность сложных нелинейных математических преобразований;

- в самом общем случае область допустимых траекторий структурной реконфигурации системы задается в виде набора различных правил, носящих как формальный, так и неформальный характер.

Следовательно, для решения рассматриваемой задачи с указанными особенностями требуется использование поисковых оптимизационных методов. А в более сложном случае адаптивной поисковой оптимизации, когда алгоритм поискового процесса оптимизации зависит от более глубокой предыстории поиска.

Важнейшим направлением теории поисковой оптимизации является теория случайного поиска, впервые предложенная в 1959 году Л.А. Растригиным [39,201 - 203]. В последующие годы случайный поиск самым широким образом используется в различных областях науки и техники – от оптимального проектирования конкретных технических систем до проблем создания общей теории поиска.

Начиная с 70-х гг. получило довольно широкое распространение одно из направлений теории поисковой оптимизации, связанное с методологией синтеза новых алгоритмов на базе бионических представлений: эволюционный подход, «эволюционное моделирование», эволюционная глобальная оптимизация, «эволюционная стратегия», «генетическая адаптация», «генетические алгоритмы» и тому подобные.

Сущность метода случайного поиска состоит из повторяющихся испытаний, каждое из которых определяет переход от одной траектории реконфигурации СЛО

к другой, лучшей, что и образует процедуру последовательного улучшения решения. В этой последовательности каждое последующее решение в определенном смысле лучше, предпочтительнее предыдущего.

Рассмотрим применение данного подхода к решению задачи (4.3). Остановимся вначале на простом случае, когда требуемое финальное состояние St_f относится к некоторым частично работоспособным состояниям системы и ограничения $\Psi_l(\vec{\chi}_\alpha) \leq 0$, $l = 1, 2, \dots, L$ для промежуточных структурных состояний отсутствуют. Будем считать, что из любого промежуточного структурного состояния некоторого уровня деградации можно попасть в структурное состояние следующего уровня деградации (рисунок 4.1) с одинаковой вероятностью, т.е. задаемся равномерным законом выборки очередных промежуточных структурных состояний. Метод поиска оптимальной траектории заключается в следующем. На каждом k испытании строится случайная последовательность $\mu_\zeta^{(k)} = [\vec{\chi}_{\alpha_0}, \vec{\chi}_{\alpha_1}^{(k)}, \vec{\chi}_{\alpha_2}^{(k)}, \dots, \vec{\chi}_{\alpha_{N-1}}^{(k)}, \vec{\chi}_{\alpha_N}]$ (где $\vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0$, $\vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f$), соответствующая траектории структурной реконфигурации СЛО. Для построенной траектории вычисляется суммарный структурный отказ $F_{отказ}(\mu_\zeta^{(k)}) = \sum_{j=1}^{N-1} F_{отказ}(\vec{\chi}_{\alpha_j}^{(k)})$.

Затем проводим следующее испытание и полученные результаты сравниваются. Оставляется траектория структурной реконфигурации СЛО того испытания, которое доставляет целевой функции меньшее значение. Число испытаний M считается заданным заранее. После проведения M испытаний получаем некоторую траекторию $\mu_\zeta^{(M)}$ и ее оценку $F_{отказ}(\mu_\zeta^{(M)})$, что с некоторой вероятностью, зависящей от M , является оптимальным решением задачи (4.3).

Метод случайного поиска гарантирует оптимальность решения с некоторой вероятностью. Определим зависимость числа M проводимых испытаний от мощности множества \hat{Q} удаляемых ФЭ и гарантированной вероятности $P_{гар}$ получения оптимальной траектории структурной реконфигурации СЛО.

В области траекторий структурной реконфигурации СЛО $E = \{\mu_i\}$ целевая функция $F_{отказ}(\mu_i)$ принимает $N_1 = 2^N$ значений, где $N = \text{card}(\hat{Q})$ мощность множества удаляемых критичных ФЭ структуры. Причем существует оптимальная траектория $\mu^* \in E$ такая, что $F_{отказ}(\mu^*) = \min_{\mu_i \in E} F_{отказ}(\mu_i)$.

Будем предполагать известной вероятность $P(\mu_i)$ того, что траектория μ_i есть оптимальное решение $P(\mu_i) = P\{\mu_i = \mu^*\}$, при этом $\sum_{i=1}^{N_1} P(\mu_i) = 1$.

Если при проведении испытания можно выбрать только одну траекторию $\mu_i \in E$ с вероятностью $\Theta(\mu_i)$, то после M независимых испытаний вероятность того, что траектория μ_i будет выбрана один раз, равна $P_i(M) = 1 - [1 - \Theta(\mu_i)]^M$. Тогда гарантированная вероятность того, что после M испытаний получим оптимальную траекторию, равна $P_{zap} = \sum_{i=1}^{N_1} P(\mu_i)(1 - [1 - \Theta(\mu_i)]^M)$. Тогда, если $P(\mu_i) = \frac{1}{N_1}$, то

взаимосвязь рассматриваемых величин имеет следующий вид $M = \frac{\ln(1 - P_{zap})}{\ln(1 - \Theta(\mu_i))}$.

При условии того, что построение траекторий структурной реконфигурации СЛО осуществляется по равномерному закону распределения, вероятность $\Theta(\mu_i) = \frac{1}{2^N}$.

Следовательно, искомая зависимость представляется следующей формулой

$$M = \frac{\ln(1 - P_{zap})}{\ln(2^N - 1) - N \ln 2} \quad (4.4).$$

Зависимости числа M проводимых испытаний от гарантированной вероятности P_{zap} получения оптимального решения при различных мощностях множества \hat{Q} удаляемых ФЭ представлены на рисунке 4.2. Из графиков следует, что для получения оптимального решения с большой гарантированной вероятностью требуется проведение испытаний, число которых превышает полный перебор всех траекторий, отмеченный на графиках пунктирной линией. Следует отметить, что метод ненаправленного поиска (т.е. перебора траекторий структурной реконфигу-

рации, при котором подозреваемые на глобальный экстремум решения выбираются в области случайным образом по равномерному закону) малоэффективен для задач большой размерности.

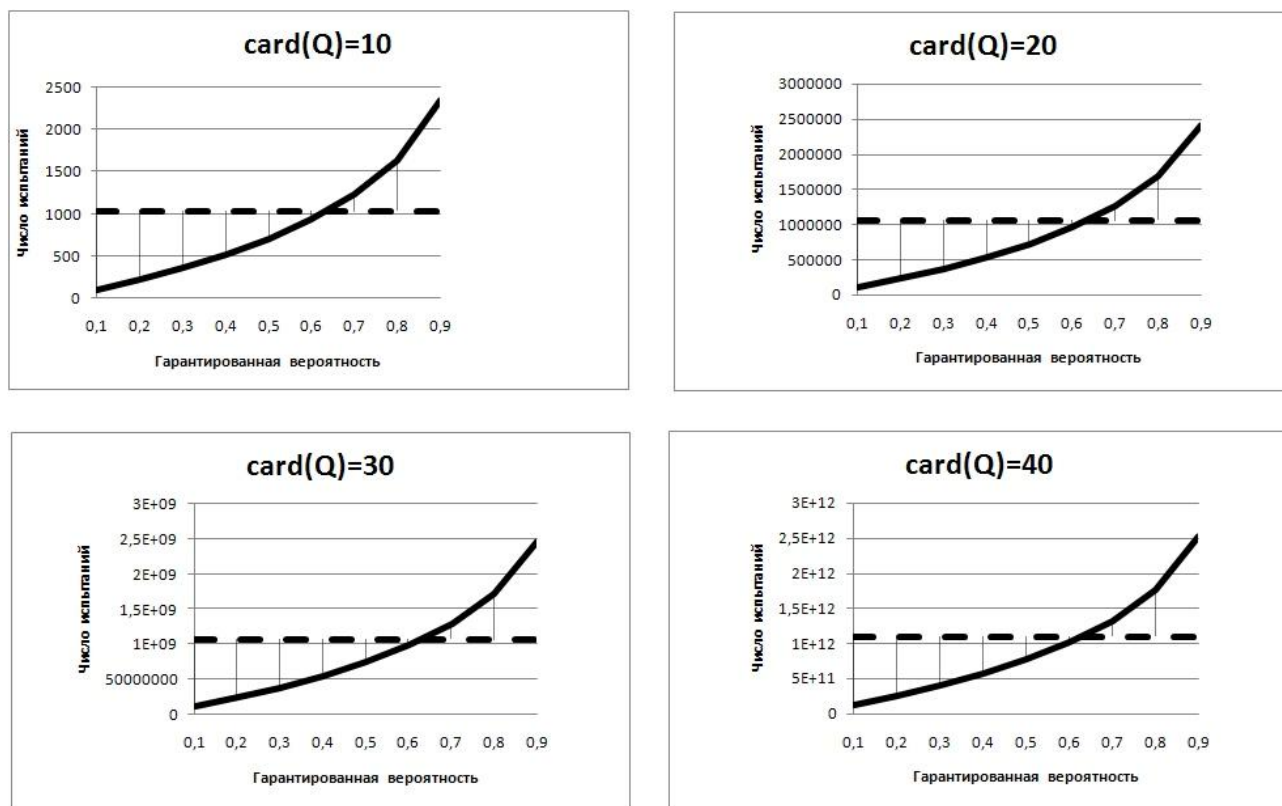


Рисунок 4.2 - Зависимость испытаний от гарантированной вероятности и мощности множества \hat{Q}

Поэтому при оптимизации часто используется сочетание метода случайного поиска с градиентными методами, а также различные методы направленного поиска. Для решения рассматриваемой задачи структурной реконфигурации СЛО применим *комбинированный метод*, включающий в себя метод случайного направленного поиска и отсечение неперспективных траекторий структурной реконфигурации СЛО по методу «ветвей и границ».

Случайный направленный поиск при решении задачи планирования структурной реконфигурации СЛО можно реализовать следующим образом. При построении случайной последовательности $\mu_s^{(k)} = [\vec{\chi}_{\alpha_0}, \vec{\chi}_{\alpha_1}^{(k)}, \vec{\chi}_{\alpha_2}^{(k)}, \dots, \vec{\chi}_{\alpha_{N-1}}^{(k)}, \vec{\chi}_{\alpha_N}]$ промежуточных состояний траектории структурной реконфигурации мы находимся в некотором промежуточном структурном состоянии, характеризующимся геномом

$\vec{\chi}_{\alpha_j}^{(k)}$, из которого можно перейти в одно из состояний следующего уровня деградации структуры (рисунок 4.1) путем отказа одного из работоспособных ФЭ множества $\{Q_{i_1}, Q_{i_2}, \dots, Q_{i_p}\} \subseteq \hat{Q}$. Причем значения $a_r = F_{отказ}(\vec{\chi}_{i_r}^+)$, $r = 1, \dots, p$, характеризуют вклады в структурный отказ при выходе из строя этих ФЭ. В общем случае $a_r \in [-1, 1]$. Для осуществления направленного поиска интервал $[0, 1]$ разбивается на подынтервалы так, что координаты концов подынтервалов образуют последовательность

$$0, \omega_1 = b_1, \omega_2 = \omega_1 + b_2, \dots, \omega_p = \omega_{p-1} + b_p = 1, \text{ где } b_r = \frac{1 - a_r}{\Lambda}, \Lambda = \sum_{r=1}^p (1 - a_r).$$

Здесь, чем меньше вклад a_r в значение показателя структурного отказа при удалении ФЭ $Q_{i_r} \in \hat{Q}$, тем большая длина подынтервала b_r отводится этому элементу, т.е. большим подынтервалом «поощряется» элемент Q_{i_r} .

Для случайного выбора удаляемого ФЭ из структуры генерируется случайное число ζ , распределенное по равномерному закону в интервале от 0 до 1, которое попадает в некоторый подынтервал $\zeta \in (\omega_{r-1}, \omega_r]$ и тем самым определяет выбор удаляемого ФЭ из структуры СЛО. Таким образом, в соответствии с построенной вероятностной гипотезой организуется поиск глобального экстремума, причем в окрестности глобального экстремума плотность случайно выбираемых траекторий реконфигурируемой СЛО будет наибольшей.

Для повышения эффективности случайного направленного поиска предлагается для каждого испытания сравнивать промежуточные значения суммарного показателя структурного отказа полученного на данной траектории реконфигурации СЛО со значением рекорда и прекращать начатое испытание, как только промежуточное значение данного показателя превысит рекордное.

Если заданное число испытаний проведено, то расчёт считается законченным. Расчёт можно считать законченным и в том случае, если последующие испытания не дают улучшения результата.

Использование предложенного подхода позволяет гарантировать получение траектории структурной реконфигурации СЛО в достаточно малой окрестности оптимальной траектории. При этом процесс поиска решения может быть ограничен как временем, отведенным на принятие решения, производительностью используемых вычислительных средств, так и анализом характера процесса сходимости вырабатываемых решений к оптимуму.

Предложенный подход [151,166,167] можно реализовать 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 $F_{отказ}^{рекорд} = +\infty$.

Шаг 1. Начало очередного испытания. Список удаляемых критичных ФЭ $\hat{Q} = \{Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{iN}\}$; промежуточный суммарный структурный отказ $F_{отказ} = 0$.

Шаг 2. Случайный выбор удаляемого ФЭ. Из списка \hat{Q} случайно выбирается описанным выше образом один из ФЭ, пусть это Q_i . Определяется промежуточное структурное состояние текущей траектории $\vec{\chi}_{\alpha_j}^{(k)} (\vec{\chi}_{\alpha_{j-1}}^{(k)} \xrightarrow{Q_i} \vec{\chi}_{\alpha_j}^{(k)})$.

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

Если $F_{отказ} > F_{отказ}^{рекорд}$ ($F_{отказ}^{рекорд}$ - текущий рекорд), то производится переход на шаг 5.

Шаг 4. Анализ списка удаляемых ФЭ.

ФЭ Q_i исключается из списка \hat{Q} .

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

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

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

Шаг 5. Анализ результатов испытаний.

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

Если $k > M$, то процедура заканчивается.

В противном случае переход на шаг 1.

Конечность алгоритма, построенного по данной схеме, следует из конечности множества $\hat{Q} = \{Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{iN}\}$, конечности числа испытаний M и в последовательном удалении ФЭ из множества $\hat{Q} = \{Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{iN}\}$.

Все возможные алгоритмы поиска [39,203] можно подразделить на два класса:

— детерминированные или регулярные алгоритмы поиска, обладающие свойством однозначности, т.е. при одинаковых исходных данных результат работы алгоритма должен быть одинаковым;

— недетерминированные (случайные, стохастические, вероятностные и т. д.), результат работы которых имеет статистический характер.

Согласно данной классификации предлагаемый в работе алгоритм относится ко второй группе, т.е. является недетерминированным.

Действительно, так как результатом работы данного стохастического алгоритма при одних и тех же исходных данных может быть множество траекторий структурной реконфигурации СЛО, то в результате работы алгоритма на этом множестве устанавливается некоторое распределение вероятностей, указывающее вероятностную меру каждой конкретной траектории реконфигурации. Причем при изменении вероятностной гипотезы алгоритма будет изменяться и распределение вероятностей траекторий реконфигурации.

Однако рассматриваемая оптимизационная задача построения траектории структурной реконфигурации СЛО (4.3) имеет условный характер, т.е. связана с обязательным выполнением ограничений $\Omega = \{\Psi_l(\vec{\chi}_\alpha) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L\}$, учитывающих структурно-топологические возможности системы. Разные методы решения таких условных задач различаются в значительной степени способами учета

ограничений. Методы, связанные со сведением условной задачи к безусловной (скажем, методами типа штрафных функций), сглаживают особенности ограничений и приводят к появлению других, не менее существенных трудностей типа овражности и многоэкстремальности штрафной функции.

Рассмотрим методы, учитывающие и выявляющие специфику и особенность ограничений. Как правило, ограничения типа неравенств образуют обычно область, выход за пределы которой является сигналом о необходимости учета ограничений.

При случайном поиске это можно осуществить несколькими способами [39,201-203,234]. Наиболее эффективные среди них: использование оператора возврата, использование самообучения в виде адаптации распределения случайного направления поиска, адаптация величины случайного шага поиска. Наиболее популярным, не связанным со структурой ограничений, является способ введения оператора возврата.

Этот способ отличается тем, что в процессе поиска различаются лишь две ситуации — удачный и неудачный шаг. Удачным шагом считается случай, когда ограничения Ω не нарушены и одновременно уменьшился показатель качества. Неудачным шагом считается такой, при котором нарушены ограничения Ω или увеличился показатель качества (применительно к решаемой задаче — текущий суммарный структурный отказ превышает рекордное значение $F_{отказ} > F_{отказ}^{рекорд}$). Реакцией на неудачный шаг в этом случае является введение оператора возврата: прекращение испытания и переход к организации следующего испытания. Ситуация с увеличением показателя качества учтена в алгоритме на **Шаге 3**. Тогда модификация алгоритма для учета нарушения ограничений Ω заключается в следующем. Вместо логической операции «ЕСЛИ $F_{отказ} > F_{отказ}^{рекорд}$ ($F_{отказ}^{рекорд}$ - текущий рекорд), ТО производится переход на шаг 5», требуется ввести операцию «ЕСЛИ $\exists l_0 \in \{1, 2, \dots, L\} : \Psi_{l_0}(\vec{\chi}_{\alpha_j}^{(k)}) > 0$ ИЛИ $F_{отказ} > F_{отказ}^{рекорд}$ ($F_{отказ}^{рекорд}$ - текущий рекорд), ТО производится переход на шаг 5».

В заключении можно сделать следующие промежуточные выводы.

Во-первых, следует отметить, что в качестве целевой функции рассматриваемой оптимизационной задачи (4.3) используется показатель структурного отказа. Это вызвано тем, что данный показатель может оценивать свойство структурного отказа любых структур систем как монотонных, так и немонотонных (см. раздел 2). Ряд же показателей структурно-топологических свойств СЛО, используемых для задания области допустимых траекторий реконфигурации СЛО $\Omega = \{\Psi_l(\vec{\chi}_\alpha) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L\}$ и отражающих свойства структурной живучести (см. раздел 2), гибкости, сложности структурного построения, кластерности (связности) и т.п. (см. параграф 4.4), определены только для монотонных структур первого типа.

Во-вторых, предлагаемый комбинированный подход нахождения оптимальных (квазиоптимальных) траекторий может быть использован не только для поиска оптимистических сценариев реконфигурации (целевая функция в задаче (4.3.) минимизируется), но для отыскания пессимистических сценариев (максимизация целевой функции структурной надежности).

В-третьих, в качестве целевой функции оптимизационной задачи (4.3) можно использовать $F_{отказ}(\vec{\chi}_\alpha) \in \{F_{однор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{неоднор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{однорвозм}(\vec{\chi}_\alpha)\}$ как вероятностную оценку структурного отказа однородных и неоднородных СЛО, так и возможностную оценку структурной надежности СЛО.

И, *наконец*, при определенной модификации процесса проведения статистических испытаний в предлагаемом комбинированном методе и использовании в качестве целевых функций различных оценок структурного отказа $F_{отказ}(\vec{\chi}_\alpha) \in \{F_{однор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{неоднор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{однорвозм}(\vec{\chi}_\alpha)\}$ можно осуществить построение серий оптимистических и пессимистических сценариев структурной реконфигурации СЛО.

4.4 Структурно-топологические показатели монотонных структур СЛО

При решении задачи построения сценариев структурной реконфигурации помимо показателей структурной надежности и структурной живучести, речь о которых шла в разделе 2, требуется учитывать и ряд других показателей структурно-топологических возможностей СЛО, связанных с такими свойствами структуры как связность, сложность, достижимость, компактность, кластерность, гибкость и т.п. [61,206,272]. В настоящее время наряду с традиционными теориями графов, систем и сетей массового обслуживания активно развивается теория сложных сетей [284], в рамках которой предлагаются подходы к решению вычислительно сложных задач, характерных для современных СЛО. Теория сложных сетей как область дискретной математики изучает характеристики сетей, учитывая не только их топологию, но и статистические характеристики, распределение весов отдельных узлов и ребер, эффекты перколяции и т.д. Основной причиной актуальности теории сложных сетей являются результаты современных исследований реальных компьютерных, биологических и социальных сетей. Такие сети имеют характеристики, не свойственные сетям с равновероятной связностью узлов, а строятся на основе связных структур, степенных распределений и узлов-концентраторов [284].

Кроме показателей структурной надежности и живучести, которым посвящен раздел 2 данной диссертационной работы, к наиболее существенным, важным характеристикам структурных возможностей СЛО можно отнести следующие показатели.

Показатель структурной сложности.

Оценивание сложности сети определяется как отношение суммарного числа связей структурного состояния S_v СЛО ($L(S_v)$) к максимально возможному числу связей в n -вершинном графе

$$F_{\text{сложн}}(S_v) = \frac{L(S_v)}{n(n-1)} \quad (4.5).$$

Показатель структурной гибкости.

Для оценивания структурной гибкости СлО будем использовать показатель ее децентрализации. Так как более децентрализованная структура в целом относительно легко может изменить свою структуру в зависимости от складывающейся ситуации, т.е. обладает высокими адаптационными способностями (структурной гибкостью). Для вычисления многих структурных характеристик в теории сложных сетей часто используется степень связности ее вершин - сумма числа входящих и выходящих дуг для каждой вершины $v(j)$ ($j=1,2,\dots,n$). Для вычисления абсолютного показателя структурной гибкости [206] находят наибольшую из степеней связности $v^* = \max_{j=1,\dots,n} \{v(j)\}$, определяют разности между v^* и $v(j)$ ($j=1,2,\dots,n$) и суммируют эти разности. Нетрудно подсчитать, что максимально возможное значение этой суммы будет $2(n-1)(n-2)$. Тогда относительный показатель структурной гибкости определяется следующим соотношением

$$F_{\text{гибк}} = \max \left\{ 0, 1 - \frac{1}{2(n-1)(n-2)} \sum_{j=1}^n [v^* - v(j)] \right\} \quad (4.6).$$

Показатель структурной кластерности.

Показатель кластерности [3] характеризует уровень связности ФЭ СлО, тенденцию к образованию групп взаимосвязанных ФЭ, так называемых клик. Кроме того, для конкретного ФЭ показатель кластерности показывает, сколько ближайших соседей данного ФЭ являются также ближайшими соседями друг для друга. Показатель кластерности для отдельного ФЭ СлО определяется следующим образом. Пусть ФЭ связан с k ближайшими соседями. Если предположить, что все ближайшие соседи соединены непосредственно друг с другом, то количество ребер между ними составляло бы $\frac{k(k-1)}{2}$, т.е. это число, которое соответствует максимально возможному количеству ребер, которыми могли бы соединяться ближайшие соседи выбранного ФЭ. Отношение реального количества ребер, которые соединяют ближайших соседей данного ФЭ, к максимально возможному называется показателем кластерности ФЭ. Соответственно, показатель кластерно-

сти всей СЛО определяется как нормированная по количеству ФЭ сумма соответствующих показателей отдельных ФЭ.

Существует еще один способ вычисления показателя кластерности [61], в основе которого лежит следующее выражение: $F_{\text{класт}} = \frac{3K_{\Delta}}{K_3}$, где K_{Δ} - количество 3-циклов в СЛО, а K_3 - количество связных 3-компонент. 3-цикл определяется при этом как множество трех ФЭ с ребрами между каждой парой ФЭ. Связная 3-компонента - множество, состоящее из трех ФЭ, в котором каждый ФЭ достижим из другого ФЭ, непосредственно или опосредованно. Используя матрицу смежности структуры СЛО $M_c = \|a_{ij}^c\|$, можно вычислять показатель структурной кластерности [61] по следующей формуле

$$F_{\text{класт}} = \frac{3 \sum_{k>i>j} a_{ij}^c a_{ik}^c a_{jk}^c}{\sum_{k>i>j} (a_{ij}^c a_{ik}^c + a_{ji}^c a_{jk}^c + a_{ki}^c a_{kj}^c)} \quad (4.7).$$

Можно предложить для оценивания структурных возможностей СЛО и ряд других показателей.

4.5 Многокритериальная кластеризация сценариев структурной реконфигурации СЛО

Перейдем к изложению второго и третьего этапов *третьего направления* агрегативно-декомпозиционного подхода к решению проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО. На предыдущем этапе данного направления диссертационных исследований были построены серии пессимистических и оптимистических сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СЛО.

Одной из важнейших прикладных задач, возникающих при исследовании структурной реконфигурации СЛО, является задача предварительной кластеризации возможных сценариев структурной реконфигурации СЛО и выделение типовых (эталонных) элементов кластеров эквивалентных траекторий структурной реконфигурации СЛО, что снизит размерность задачи многокритериального плани-

рования структурно-функциональной реконфигурации, решению которой посвящено содержание раздела 5 диссертационных исследований.

Формально постановка задачи многокритериальной кластеризации множества сценариев структурной реконфигурации СЛО сводится к следующему:

- известно множество сценариев структурной реконфигурации СЛО $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$;
- каждый сценарий реконфигурации характеризуется конечной совокупностью структурно-топологических показателей (признаков) $\{F_h, h \in \hat{H}^{str}\}$, с помощью которых оцениваются различные структурные аспекты функционирования СЛО.

В качестве таких структурно-топологических показателей можно использовать показатели структурной надежности и живучести (подробное изложение приведено в разделе 2), показатели структурной сложности (формула (4.5)), гибкости (формула (4.6)), кластерности – связности (формула (4.7)) и ряд других структурных показателей [61,206,272,284].

Кроме того, для кластеризации сценариев структурной реконфигурации $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ введем различные меры сходства и включения, порождающие отношения на исследуемом множестве.

Под *мерой сходства* будем понимать неотрицательную вещественную функцию $C(Sc_l, Sc_k)$, обладающую следующими свойствами:

$$0 \leq C(Sc_l, Sc_k) \leq 1; C(Sc_l, Sc_k) = 1, \text{ если } l = k; C(Sc_l, Sc_k) = C(Sc_k, Sc_l). \quad (4.8)$$

Свойствами (4.8) обладает, в частности, континуум эквивалентных мер [3,4,5], представляемых формулой (4.9)

$$C(Sc_l, Sc_k) = \frac{2\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{(1 + \lambda)[\mu(Sc_l) + \mu(Sc_k)] - 2\lambda\mu(Sc_l \cap Sc_k)}, \quad (4.9)$$

где $-1 \leq \lambda < \infty$; $\mu(Sc_l)$ – мощность множества признаков, удовлетворяющих сценарию Sc_l , т.е.

$$\mu(Sc_l) = \sum_{h \in \hat{H}^{str}} F_{lh}, \mu(Sc_l \cap Sc_k) = \sum_{h \in \hat{H}^{str}} \min\{F_{lh}, F_{kh}\}, \mu(Sc_l \cup Sc_k) = \sum_{h \in \hat{H}^{str}} \max\{F_{lh}, F_{kh}\}.$$

При этом если сравнение структур осуществляется по качественным признакам, то $F_{lh} \in \{0,1\}$, а в случае количественных признаков - F_{lh} принимают значения либо в установленной ранговой шкале, либо в интервале $[0,1]$.

В таблице 4.1 приведены различные меры сходства структур, предназначенные для обработки качественных и количественных признаков [3,4,5].

В отличие от мер сходства мера включения отражает различную степень включения одного сценария структурной реконфигурации СЛО в другой по сравниваемым признакам и определяет, какой сценарий более оригинален, а какой - более типичен среди множества $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$. Меры включения сценария Sc_l в сценарий Sc_k и наоборот определяются следующим образом:

$$V(Sc_l, Sc_k) = \frac{\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{\mu(Sc_k)}, \quad V(Sc_k, Sc_l) = \frac{\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{\mu(Sc_l)}. \quad (4.10)$$

Таблица 4.1 - Меры сходства

№ п/п	Название меры сходства	Формула
1	Чекановского-Серенса ($\lambda=0$)	$C(Sc_l, Sc_k) = \frac{2\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{\mu(Sc_l) + \mu(Sc_k)}$
2	Жаккара ($\lambda=1$)	$C(Sc_l, Sc_k) = \frac{\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{\mu(Sc_l \cup Sc_k)}$
3	Сокала-Снита ($\lambda=3$)	$C(Sc_l, Sc_k) = \frac{\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{2\mu(Sc_l) + 2\mu(Sc_k) - 3\mu(Sc_l \cap Sc_k)}$
4	Андреева ($\lambda= -0.5$)	$C(Sc_l, Sc_k) = \frac{4\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{\mu(Sc_l) + \mu(Sc_k) + 2\mu(Sc_l \cap Sc_k)}$
5	Кульчинского	$C(Sc_l, Sc_k) = \frac{1}{2} \mu(Sc_l \cap Sc_k) \left[\frac{1}{\mu(Sc_l)} + \frac{1}{\mu(Sc_k)} \right]$
6	Половинкина	$C(Sc_l, Sc_k) = 1 - \frac{\mu(Sc_l \cup Sc_k) - \mu(Sc_l \cap Sc_k)}{\mu(Sc_l \cup Sc_k)}$

Если $V(Sc_l, Sc_k) > V(Sc_k, Sc_l)$, то Sc_l сценарий структурной реконфигурации СЛО более оригинален, а Sc_k - более типовой сценарий реконфигурации.

С использованием мер сходства можно построить отношение иерархии, которое позволит выделить кластеры эквивалентных сценариев структурной реконфигурации СЛО из исследуемого множества $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$. После чего для каждого кластера эквивалентных сценариев структурной реконфигурации СЛО на основе меры включения можно выделить наиболее типовую траекторию.

Отношение иерархии или иерархическое разбиение структур определяется следующим образом [173].

Здесь под разбиением множества $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ на r кластеров понимается

	множество	подмножеств
--	-----------	-------------

$$R = \{H_q \mid H_q \subseteq S^{Сцен} : \bigcup_{q=1}^r H_q = S^{Сцен}; H_q \cap H_l = \emptyset \forall q \neq l\}.$$

Тогда иерархическое разбиение (отношение иерархии) множества $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ есть множество разбиений $HD = \{R_\alpha, \alpha = 0, 1, 2, \dots\}$, удовлетворяющее следующему условию вложенности разбиений: $\forall R_{\alpha_1}, R_{\alpha_2}$, если $\alpha_1 < \alpha_2$, то $\forall H_q \in R_{\alpha_1} \exists H_p \in R_{\alpha_2} : H_q \subseteq H_p$ и $\forall H_l \in R_{\alpha_2} \setminus H_p H_q \cap H_l = \emptyset$. Так, например, в иерархическое разбиение входят разбиения, характеризующие предельные случаи, $R_0 = \{H_q \mid H_q = \{Sc_q\}, q = 1, 2, \dots, n\}$ и $R_n = \{H_1 \mid H_1 = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}\}$. При этом если задано разбиение, то сценарии реконфигурации, входящие в один и тот же кластер, являются неразличимыми (эквивалентными).

При практической реализации иерархических классификаций строятся дендрограммы, являющиеся графическим способом изображения результата проведения операции кластеризации, что делает наглядной структуру иерархического отношения.

Для построения иерархического разбиения множества сценариев $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ могут быть использованы методы *сгущения* кластеров [4,5], пересчет значений сходства которых можно осуществлять по следующим формулам:

$$C(H_j, H_l) = \alpha_j C(H_j, H_q) + \alpha_l C(H_j, H_l) + \beta C(H_q, H_l) + \nu [C(H_j, H_q) - C(H_j, H_l)], \quad (4.11)$$

где $H_l = \{H_q, H_t\}$.

Параметры $\alpha_q, \alpha_t, \beta, \nu$ задают вид метода пересчета меры сходства кластеров:

метод минимума - $\alpha_q = \alpha_t = 0.5, \beta = 0, \nu = -0.5$, если $C(H_j, H_q) \leq C(H_j, H_t)$;

метод максимума - $\alpha_q = \alpha_t = 0.5, \beta = 0, \nu = 0.5$, если $C(H_j, H_q) \leq C(H_j, H_t)$;

метод медианы - $\alpha_q = \alpha_t = 0.5, \beta = 0, \nu = 0$;

метод среднего кластера - $\alpha_q = \frac{n_q}{n_l}, \alpha_t = \frac{n_t}{n_l}, \beta = \nu = 0$;

центроидный метод - $\alpha_q = \frac{n_q}{n_l}, \alpha_t = \frac{n_t}{n_l}, \beta = -\alpha_q \alpha_t, \nu = 0$;

метод Уорда - $\alpha_q = \frac{n_j + n_q}{n_j + n_l}, \alpha_t = \frac{n_j + n_t}{n_j + n_l}, \beta = -\frac{n_j}{n_j + n_l}, \nu = 0$.

Здесь $n_q = \text{card}(H_q)$, $n_t = \text{card}(H_t)$, $n_l = n_q + n_t$.

Конкретный метод подбирается проектировщиком индивидуально для исследуемой предметной области с учетом ее специфики. Единых правил выбора не существует. Главным критерием для выбора метода классификации может являться хорошая интерпретируемость получаемых результатов, не противоречащих физическому смыслу изучаемой предметной области.

Для построения иерархического разбиения множества сценариев структурной реконфигурации СЛО $S^{\text{Сцен}} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ могут быть использованы выше приведенные методы сгущения кластеров, общий алгоритм которых может быть представлен в следующем виде:

Шаг 1. За исходное разбиение $R_0 = \{H_q \mid H_q = \{Sc_q\}, q = 1, 2, \dots, n\}$ принять тривиальное разбиение множества сценариев $S^{\text{Сцен}} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ на n одноэлементных кластеров $R_0 = \{H_q \mid H_q = \{Sc_q\}, q = 1, 2, \dots, n\}$. Положить начальный уровень разбиения $\alpha = 0$.

Шаг 2. Для заданного уровня разбиений α найти наибольшее значение сходства между кластерами $C(H_q, H_t) = \max_{H_i, H_j \in R_\alpha} C(H_i, H_j)$. Значение сходства определяется с использованием меры сходства сценариев реконфигурации.

Шаг 3. Объединить соответствующие кластеры с наибольшим сходством в один кластер $H_l = H_q \cup H_t$, положить α равно $\alpha+1$ и образовать новое разбиение $R_\alpha = \{H_1, \dots, H_{q-1}, H_{q+1}, \dots, H_{t-1}, H_{t+1}, \dots, H_l\}$.

Шаг 4. Проверить выполнение условия: $\text{card}(R_\alpha)=1$, т.е. все исследуемые сценарии структурной реконфигурации объединены в один кластер. Если оно выполняется, то *завершить* выполнение алгоритма. Если не выполняется, то перейти на шаг 5.

Шаг 5. Пересчитать значения меры сходства для кластеров нового разбиения по одной из приведенных выше формул (4.11) и перейти на шаг 2.

Далее, используя предложенный алгоритм, осуществляется построение дендрограммы иерархического разбиения сценариев структурной реконфигурации СЛО $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$. Дендрограмма позволяет формировать различные разбиения исходного множества $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ с требуемой степенью эквивалентности (γ) входящих в кластеры траекторий структурной реконфигурации, т.е., варьируя параметр γ , можно получать кластеры различной степени эквивалентности.

Для выявления наиболее типовых сценариев структурной реконфигурации кластера используем меру включения. На основе рассчитанных значений мер включения для траекторий одного кластера строится матрица размерностью $p \times p$, где p - мощность рассматриваемого кластера. Для данной матрицы находим собственный вектор, соответствующий максимальному собственному числу этой матрицы. Максимальное значение среди компонент найденного вектора соответствует наиболее типовому сценарию структурной реконфигурации этого кластера, а минимальное значение – наиболее оригинальному сценарию [4,5].

Проведенные предварительные исследования [163,165,170] показали, что построенные иерархические разбиения множества $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ сценариев структурной реконфигурации СЛО (дендрограммы) по различным мерам сходства (Чекановского-Серенса, Жаккара, Сокала-Снита и Кульчинского) обладают свойством подобия. На наш взгляд рекомендуется применять для сравнения сценариев структурной реконфигурации СЛО меры сходства Сокала-Снита

$$C(Sc_l, Sc_k) = \frac{\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{2\mu(Sc_l) + 2\mu(Sc_k) - 3\mu(Sc_l \cap Sc_k)}$$

в связи с тем, что это мера позволяет использовать шкалу $[0,1]$ в полном объеме, т.е. более гибко выявлять закономерности строения исследуемых сценариев структурной реконфигурации СЛО.

4.5.1 Иллюстрация методики кластеризации сценариев структурной реконфигурации СЛО

Продемонстрируем приведенную методику кластеризации сценариев структурной реконфигурации СЛО для следующих исходных данных.

Множество сценариев структурной реконфигурации СЛО $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ состоит из 11 траекторий. Каждый сценарий реконфигурации характеризуется следующими тремя структурно-топологическими показателями (F_1 - структурная надежность, F_2 - структурная сложность, F_3 - структурная гибкость), значения которых представлены в таблице 4.2.

Используя данные значения показателей, рассчитаем меру сходства сценариев структурной реконфигурации СЛО. Для этого воспользуемся формулой (4.9) с параметром $\lambda = 3$ (мера Сокала-Снита).

$$C(Sc_l, Sc_k) = \frac{\mu(Sc_l \cap Sc_k)}{2\mu(Sc_l) + 2\mu(Sc_k) - 3\mu(Sc_l \cap Sc_k)}$$

Результаты вычислений приведены в таблице 4.3.

Используя полученную матрицу сходства траекторий структурной реконфигурации СЛО, осуществляем построение иерархического разбиения траекторий на кластеры. При этом воспользуемся формулой пересчета значений сходства (4.11) с параметрами по методу максимума $\alpha_q = \alpha_t = 0.5, \beta = 0, \nu = 0.5,$

$C(H_j, H_l) = \max\{C(H_j, H_q), C(H_j, H_l)\}$. Дендрограмма иерархического разбиения представлена на рисунке 4.3.

Используя построенную дендрограмму, можно формировать различные разбиения исходного множества $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ с требуемой степенью эквивалентности (γ) входящих в кластеры сценариев. Так, например, для $0.72 < \gamma \leq 0.75$ получили разбиение сценариев на 5 кластеров $R_\gamma = \{H_1 = \{Sc_1, Sc_4, Sc_6, Sc_9\}, H_2 = \{Sc_7, Sc_8, Sc_{11}\}, H_3 = \{Sc_5, Sc_{10}\}, H_4 = \{Sc_3\}, H_5 = \{Sc_2\}\}$.

Таблица 4.2 - Значения структурно-топологических показателей

		Показатели		
		Надежность	Сложность	Гибкость
Траектории структурной реконфигурации СЛО	Sc_1	0,5	0,5	1
	Sc_2	0,33	0,333	0
	Sc_3	0,25	0,25	0,677
	Sc_4	0,66	0,333	1
	Sc_5	0,42	0,25	0,583
	Sc_6	0,58	0,5	1
	Sc_7	0,62	0,3	0,75
	Sc_8	0,52	0,233	0,8
	Sc_9	0,47	0,333	1
	Sc_{10}	0,53	0,19	0,6
	Sc_{11}	0,46	0,133	0,778

Таблица 4.3 - Матрица сходства сценариев структурной реконфигурации СЛО

$C(Sc_i, Sc_k)$	Sc_1	Sc_2	Sc_3	Sc_4	Sc_5	Sc_6	Sc_7	Sc_8	Sc_9	Sc_{10}	Sc_{11}
Sc_1	1	0,199	0,417	0,737	0,456	0,926	0,576	0,611	0,821	0,466	0,521
Sc_2	0,199	1	0,229	0,200	0,277	0,190	0,227	0,205	0,225	0,216	0,173
Sc_3	0,417	0,229	1	0,419	0,672	0,395	0,544	0,586	0,485	0,555	0,553
Sc_4	0,737	0,200	0,419	1	0,458	0,795	0,721	0,638	0,826	0,495	0,524
Sc_5	0,456	0,277	0,672	0,458	1	0,431	0,600	0,507	0,533	0,761	0,617
Sc_6	0,926	0,190	0,395	0,795	0,431	1	0,625	0,596	0,765	0,465	0,492
Sc_7	0,576	0,227	0,544	0,721	0,600	0,625	1	0,776	0,637	0,653	0,654
Sc_8	0,611	0,205	0,586	0,638	0,507	0,596	0,776	1	0,682	0,721	0,790
Sc_9	0,821	0,225	0,485	0,826	0,533	0,765	0,637	0,682	1	0,511	0,613
Sc_{10}	0,466	0,216	0,555	0,495	0,761	0,465	0,653	0,721	0,511	1	0,662
Sc_{11}	0,521	0,173	0,553	0,524	0,617	0,492	0,654	0,790	0,613	0,662	1

Для каждого из построенных кластеров определим наиболее типовой сценарий структурной реконфигурации СЛО среди входящих в него элементов. С этой целью для каждого из кластеров построим матрицу включения сценариев этого кластера, с использованием формулы (4.10).

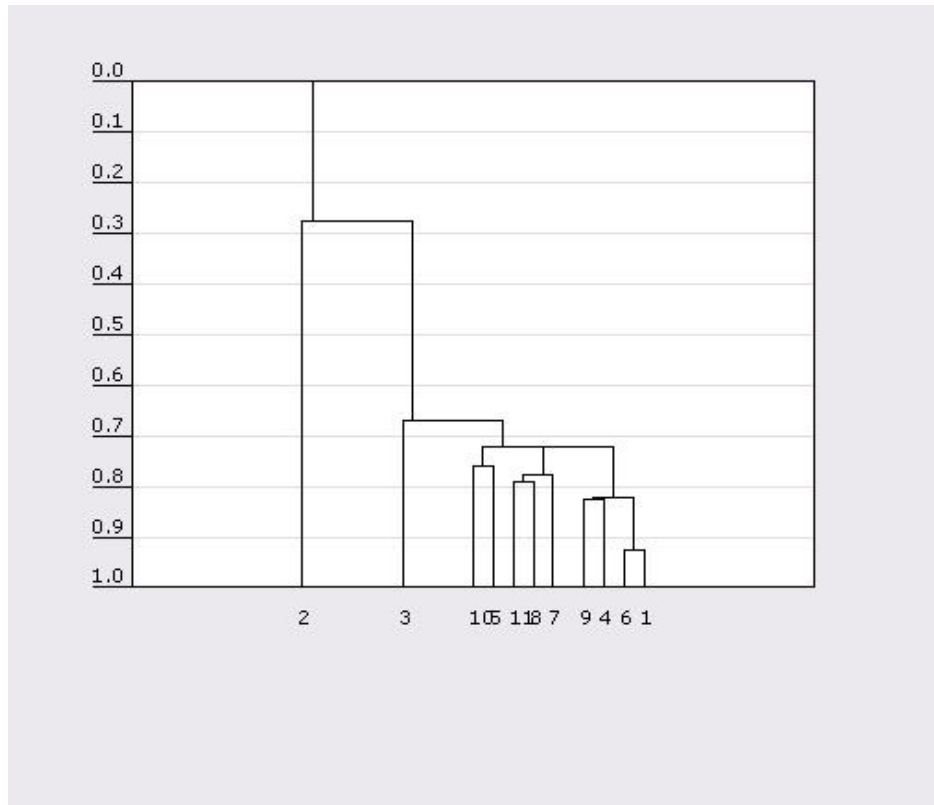


Рисунок 4.3 - Дендрограмма иерархического разбиения траекторий структурной реконфигурации СЛО

Матрицы включения, геометрические средние и собственные вектора, соответствующие максимальному собственному числу, кластеров разбиения $R_\gamma = \{H_1 = \{Sc_1, Sc_4, Sc_6, Sc_9\}, H_2 = \{Sc_7, Sc_8, Sc_{11}\}, H_3 = \{Sc_5, Sc_{10}\}, H_4 = \{Sc_3\}, H_5 = \{Sc_2\}\}$ приведены в таблицах 4.4, 4.5, 4.6.

Таблица 4.4 – Результаты вычислений для кластера $H_1 = \{Sc_1, Sc_4, Sc_6, Sc_9\}$

Матрица включения для кластера $H_1 = \{Sc_1, Sc_4, Sc_6, Sc_9\}$				Геометрическое среднее	Собственный вектор
1	0,752	0,775	0,798	0,826	0,218
1,000	1	1,000	1,000	1	0,264
1,000	0,970	1	1,000	0,992	0,262
0,985	0,929	0,957	1	0,967	0,256

Таблица 4.5 - Результаты вычислений для кластера $H_2 = \{Sc_7, Sc_8, Sc_{11}\}$

Матрица включения для кластера $H_2 = \{Sc_7, Sc_8, Sc_{11}\}$			Геометрическое среднее	Собственный вектор
1	0,922	1,000	0,973	0,343
0,953	1	1,000	0,984	0,346
0,844	0,817	1	0,884	0,311

Таблица 4.6. - Результаты вычислений для кластера $H_3 = \{Sc_5, Sc_{10}\}$

Матрица включения для кластера $H_3 = \{Sc_5, Sc_{10}\}$		Геометрическое среднее	Собственный вектор
1	0,601	0,775	0,437
1,000	1	1	0,563

Таким образом, для кластера H_1 из сценариев структурной реконфигурации СЛО $\{Sc_1, Sc_4, Sc_6, Sc_9\}$ наиболее типовым является Sc_4 . Для кластера H_2 из сценариев структурной реконфигурации СЛО $\{Sc_7, Sc_8, Sc_{11}\}$ наиболее типовым - Sc_8 . Для кластера H_3 из сценариев структурной реконфигурации СЛО $\{Sc_5, Sc_{10}\}$ наиболее типовым - Sc_{10} .

В результате применения предложенной методики среди множества сценариев структурной реконфигурации СЛО $S^{Сцен} = \{Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_n\}$ выделено множество эталонных сценариев $S^{Эталон} = \{Sc_2, Sc_3, Sc_4, Sc_8, Sc_{10}\} \subset S^{Сцен}$.

4.6 Иллюстрация методики построения траекторий структурной реконфигурации компьютерных сетей информационных услуг

В последние годы все шире распространяется концепция «облачных вычислений» (cloud computing) [86,248], в соответствии с которой сетевые и вычислительные ресурсы, а также ресурсы системы хранения должны предоставляться каждому пользователю по запросу. По идее, подход «cloud computing» должен облегчить доступ к ресурсам и давать пользователям возможность обоснованно определять требуемый объем информационно-технологических (ИТ) услуг.

В начале 1990-х годов получила распространение идея «грид-вычислений» (grid computing), которая представляет собой выделение вычислительных ресурсов и ресурсов хранения из общего пула автономных систем, как правило, для фундаментальных научных работ и ресурсоемких научных приложений. «Cloud computing» — дальнейшая эволюция той же идеи объединения базовых ресурсов для предоставления доступа к web-сервисам, приложениям и ресурсам системы хранения. В последнее время в общей концепции «cloud computing» стали выделять несколько категорий: ITaaS - информационные технологии как услуга (IT as a service); SaaS - программное обеспечение как услуга (Software as a Service); PaaS - платформа как услуга (Platform as a service); IaaS - инфраструктура как услуга (Infrastructure as a service).

Постоянно возрастающие объемы данных в информационных системах, расширение круга пользователей, обеспечение удаленного доступа пользователей к информационным ресурсам делают проблему защиты информации особенно актуальной. Особенно в условиях интенсивного развития облачных вычислений важнейшей задачей является обеспечение кибербезопасности. Учитывая серьезность угроз, исходящих из разных источников (отдельные люди, криминальные группы, «Зомби-сети» и даже государства), снизить такой риск можно только объединенными усилиями провайдеров сервисов в облаке, сетевых провайдеров, корпоративных отделов ИТ и пользователей.

Поэтому приведем иллюстративный пример решения задачи анализа показателей информационной безопасности фрагмента корпоративной информационной сети в условиях противодействия злоумышленников. Для решения данной задачи применим предлагаемый выше подход. Логическая структура функционирования информационной сети в условиях угроз представлена на рисунке 4.4. Для графического представления данной структуры воспользуемся схемой функциональной целостности (СФЦ) [193].

Вершинами в рассматриваемой структуре обозначены следующие события:

➤ **вершина 1** – событие, характеризующее безотказную работу «Зомби-сети», одним из направлений действий которой является атака на компьютерную

- **вершины 11, 12** – события искажения потока информации от серверов к потребителям информационных услуг;
- **вершины 13, 14** – события получения потребителем информационных услуг неискаженной информации с основного (запасного) серверов.

Полином функции отказа начального состояния St_0 , построенный с использованием пакета прикладных программ «Арбитр» [193] и программного комплекса, разработанного автором, имеет следующий вид

$$T_0(Q) = 1 - 7Q^2 + 29Q^3 - 53Q^4 + 66Q^5 - 65Q^6 + 35Q^7 + Q^8 + 12Q^9 - 54Q^{10} + 61Q^{11} - 33Q^{12} + 9Q^{13} - Q^{14}.$$

Соответственно, геном $\vec{\chi}_0 = (1, 0, -7, 29, -53, 66, -65, 35, 1, 12, -54, 61, -33, 9, -1)$ характеризует начальное структурное состояние St_0 информационной системы. Исследуемая компьютерная сеть информационных услуг относится к классу немонотонных структур. Структурный отказ (структурная надежность) сети, находящейся в начальном состоянии, рассчитанный с использованием интегрального показателя $F_{неоднор}(\vec{\chi}_0)$, будет равен 0.88 (0.12).

За финальное структурное состояние St_f информационной системы примем структурное состояние, в котором потребитель информационных услуг получает требуемую информацию либо от основного сервера, либо от запасного. Одно из таких финальных структурных состояний представлено на рисунке 4.5.

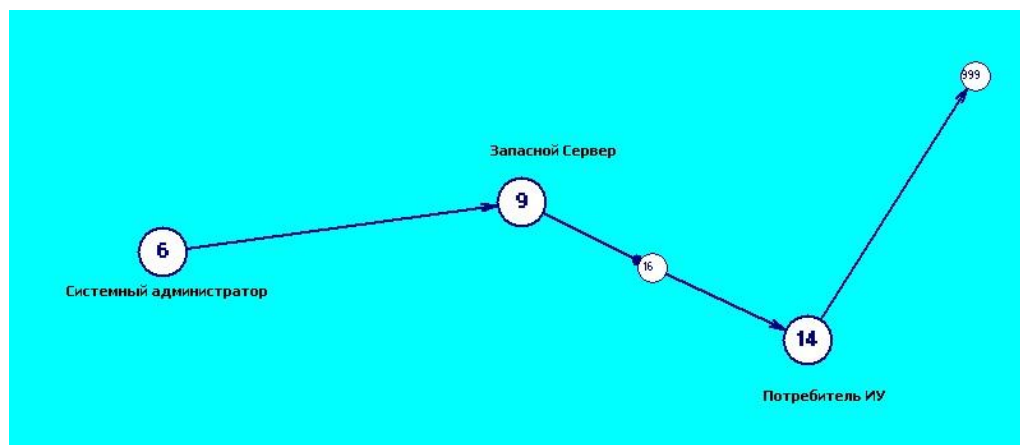


Рисунок 4.5 - Финальное структурное состояние сети

Полином функции отказа финального структурного состояния и соответствующий ему геном имеет следующий вид $T_f(Q) = 3Q - 3Q^2 + Q^3$, $\vec{\chi}_f = (0, 3, -3, 1)$. Зна-

чение показателя структурной надежности сети в данном структурном состоянии равно 0.125.

Из начального структурного состояния St_0 в финальное St_f можно перейти используя различные траектории деградации логической структуры сети. Множеством элементов логической структуры, отказ которых определяет указанные траектории, является $\hat{Q} = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_7, Q_8, Q_{10}, Q_{11}, Q_{12}, Q_{13}\}$. Метод и алгоритм, изложенный в параграфе 4.3, позволяет построить не только оптимальную траекторию реконфигурации, но и различные траектории с заданными свойствами. Мощность множествами \hat{Q} равно 11. Максимальное число структурных состояний, в которых может находиться сеть в процессе ее деградации, составит $2^{11} = 2048$. В параграфе 4.4 были предложены алгоритмы многокритериальной иерархической кластеризации сценариев структурной реконфигурации СЛО. Фрагмент сценариев структурной реконфигурации сети в результате работы предложенных алгоритмов приведен на рисунке 4.6, где $St_{i_1, i_2, \dots, i_k}$ - структурное состояние сети, в котором i_1, i_2, \dots, i_k номера отсутствующих элементов логической структуры. Цветом на рисунке 4.6 выделены эталонные траектории структурной реконфигурации сети (красным цветом – оптимистический вариант реконфигурации, синим цветом – пессимистический вариант).

Некоторые комментарии к рассмотренному примеру, не противоречащие здравому смыслу:

➤ операция нейтрализации атак «Зомби-сетей», которая характеризуется нахождением сети информационных услуг в структурном состоянии St_1 (отказ работы «Зомби-сети» - удаление вершины 1), операция по ограничению доступа злоумышленников (сеть находится в структурном состоянии St_{10}), а также делегирование дополнительных полномочий системному администратору местной сети (структурное состояние St_5) дает почти одинаковый вклад в структурную надежность сети информационных услуг;

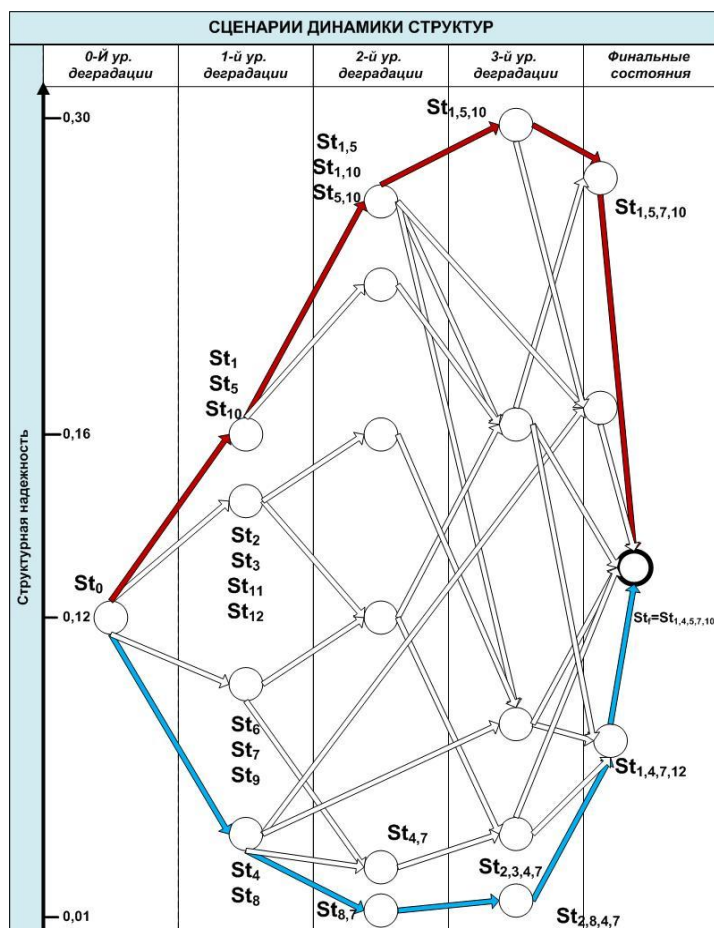


Рисунок 4.6 - Сценарии структурной реконфигурации фрагмента корпоративной информационной сети в условиях противодействия злоумышленников

➤ сбой и отказы в работе основного сервера и системы управления серверами (сеть находится в структурном состоянии $St_{8,7}$) приводит к наибольшему ущербу структурной надежности рассматриваемой сети.

Выводы

Подводя итоги раздела, отметим следующее:

1. В соответствии с концептуальной моделью реконфигурации СЛО, представленной в разделе 1, построена обобщённая математическая модель планирования структурной реконфигурацией СЛО, которая представляет собой комбинаторную задачу с нелинейной целевой функцией и учитывает всевозможные вариации изменения структурных состояний СЛО. На основе разработанной в диссертации концепции генома структуры системы приведена и обоснована конкретная постановка обобщенной модели в виде оптимизационной задачи построения сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СЛО, обладающих как монотонной, так и немонотонной структурой.

2. Проведен анализ особенностей оптимизационной задачи построения сценариев структурной реконфигурации СЛО, результаты которого показали, что для решения рассматриваемой задачи следует использовать методы и алгоритмы теории поисковой оптимизации эволюционного типа. Для решения рассматриваемой задачи предложен метод и реализующий его алгоритм, новизна которых заключается в комбинированном использовании метода случайного направленного поиска и метода отсечений неперспективных вариантов структурной реконфигурации СЛО типа «ветвей и границ». Предлагаемый подход позволяет решать оптимизационные задачи построения сценариев структурной реконфигурации СЛО, имеющих как безусловный, так и условный характер, а также описываемых с использованием различных структурно-топологических показателей. Вместе с тем модификация предложенного метода разрешает осуществить построение серий оптимистических и пессимистических сценариев структурной реконфигурации СЛО.

3. Предложена обобщенная методика многокритериальной кластеризации множества сценариев структурной реконфигурации СЛО (в частности, оптимистических и пессимистических) с использованием различных мер сходства и процедур сгущения кластеров. С привлечением мер включения разработана про-

цедура определения типовых (эталонных) элементов построенных кластеров. Предлагаемый подход позволяет, во-первых, снизить размерности анализируемого пространства сценариев структурной реконфигурации СЛО, во-вторых, решать задачу идентификации синтезируемых траекторий структурной реконфигурации СЛО, отнесения их к тому или иному кластеру, и с помощью эталонных элементов кластеров предварительно определять свойства данных сценариев в реальном масштабе времени. Анализ результатов предварительных вычислительных экспериментов показал перспективность использования в качестве мер сходства меру Сокала-Снита, позволяющую более гибко учитывать значения структурных показателей, характеризующих исследуемые сценарии реконфигурации СЛО.

4. Работоспособность предложенных в данном разделе методик проиллюстрирована на примере решения задачи построения эталонных сценариев структурной реконфигурации сети информационных услуг, обладающей свойством немонотонности. 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 возможного уровня работоспособности сети и её элементов.

5 Методы, модели и алгоритмы многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов

В данной разделе проведем исследование *четвертого и пятого направлений* диссертационной работы, связанные соответственно с решением задачи многокритериального планирования 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. Исследования проводятся с учетом выдвинутого предположения о том, что структурные состояния СЛО являются постоянными на временных интервалах.

5.1 Анализ современного состояния исследований задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО

Исследованию задач и методов функциональной реконфигурации СЛО посвящены многочисленные публикации [23-30, 32-35, 77, 79, 82, 131, 169, 175, 176, 225, 229, 230-232, 237-244, 260, 261, 262]. При этом технология функциональной реконфигурации (гибкого перераспределения выполняемых системой целей, задач и функций между работоспособными, частично работоспособными компонентами) среди способов обеспечения надежности и живучести рассматриваемых СЛО занимает одно из первостепенных значений.

В процессе исследования применения указанной технологии для многофункциональных взаимосвязанных систем реального времени выделяют, как правило, два характерных класса заданий, выполняемых СЛО [25,27,34,230,231,237]. Один из них представляет множество задач, для которых не задана в явном виде временная и логическая упорядоченность их выполнения, т.е. регламентирован-

ные (периодические) задачи или случайные потоки задач. Задание второго класса является множеством задач частично упорядоченных по выполнению во времени, включая возможность параллельно-последовательного выполнения определенных задач.

Для заданий первого класса в основе методов построения механизма обеспечения надежности и живучести [28,34,237] лежит идея функционального резервирования. Суть данного подхода состоит в следующем.

Для начального состояния S_0 СЛО осуществляется построение плана распределения задач по ФЭ СЛО. Закрепленные этим планом за ФЭ задачи называют собственными. В случае перехода СЛО (вызванного отказом некоторой совокупности ФЭ) в состояние S_v собственные задачи (в некоторых случаях все задачи задания) отказавших ФЭ перераспределяются между работоспособными ФЭ, с сохранением за ними выполнения своих собственных задач. Согласно построенных планов перераспределения далее происходит предварительное размещение задач и их копий на ФЭ системы. Иногда в случае более сложного постановочного варианта для каждой функций (задачи) ставится в соответствие некоторое множество полных или сокращенных алгоритмов ее выполнения. При этом для заданий, включающих случайные потоки задач, применяют методы теории массового обслуживания.

Для заданий второго класса в основе методов лежат формальные модели параллельных вычислений типа временных стохастических сетей Петри или так называемая CSP-концепция (концепция взаимодействующих последовательных процессов), разработанная Ч.Хоаром и осуществляется построение отказоустойчивых расписаний выполнения задач для множества работоспособных состояний S_v СЛО [252].

Для реальных сложных систем, содержащих десятки и сотни ФЭ, получить полную информацию о всех состояниях системы практически очень сложно, поэтому для ее решения предлагается использовать подход имитационного моделирования либо выбирают только те состояния, вероятность перехода в которые не

менее заданной величины. Данный подход позволяет получить некоторый частный набор решений, на основе которого делают предположения о полном поведении системы.

С целью усиления и модернизации предлагаемого авторами [23-30,32-35,79,225,229,230-232,237-243] подхода на наш взгляд целесообразно осуществлять построение начальных планов распределения задач и планов перераспределения задач совместно по аналогии с моделями двухэтапного стохастического программирования [263].

Другими словами, строится обобщенная модель двухэтапного стохастического программирования, позволяющая находить такие начальные планы распределения задач СЛО, которые с учетом последующих перераспределений решаемых задач позволят рационально использовать ресурсы системы, необходимые для компенсации неблагоприятных воздействий.

Однако следует отметить, что предлагаемые подходы к решению задачи функциональной реконфигурации СЛО в условиях перестраиваемой структуры относятся к стандартной технологии реконфигурации («слепой» реконфигурации) СЛО.

Подробный анализ математических моделей для указанных подходов был проведен в разделе 1, параграф 1.3. Данные подходы не приемлемы для сложных технологических процессов, где необходимо учитывать текущие характеристики решаемых в СЛО задач и выполняемых функций; анализировать и оценивать текущее состояние СЛО в целом; осуществлять оперативный расчёт, оценивание и анализ целевых и информационно-технических возможностей СЛО для обоснованного перераспределения функций СЛО между её работоспособными элементами и подсистемами. При этом особую актуальность приобретает постановка и решение различных классов задач управления структурной динамикой СЛО, в том числе и задач планирования и управления процессами обработки, хранения и передачи разнотиповых потоков на перестраиваемой структуре.

Поэтому, используя типовые сценарии (траектории) структурной реконфигурации СЛО, полученные на предыдущих этапах диссертационных исследова-

ний, предлагается решать задачу многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО с использованием моделей планирования операций обработки, приема-передачи и хранения разнотиповых потоков на динамически изменяющейся структуре с временными участками постоянства структуры.

5.2 Содержательная и теоретико-множественная постановка задачи многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО

Цель функционирования СЛО реализуется в ходе выполнения операций, связанных с информационным, вещественным и энергетическим обменом между ФЭ. Таким образом, операция обмена является основным системообразующим фактором, объединяющим (интегрирующим) различные виды деятельности ФЭ СЛО. Содержание и специфика выполняемых операций обмена находят своё отражение в задании соответствующих параметров, характеризующих результаты выполнения операций (объём, качество, время выполнения операции и т.п.), расход ресурсов при выполнении операций, информационные и материальные потоки, возникающие в ходе выполнения операций. Согласно проведенным исследованиям в работах [137,223,250,259], для СЛО можно различать (см. рисунок 5.1): вещественные, энергетические, информационные потоки; однопродуктовые и многопродуктовые потоки; непрерывные и дискретные, однородные и неоднородные; не смешиваемые и смешиваемые (для непрерывных потоков); синхронные и асинхронные, с единичным и групповым обслуживанием и т.п. (в том числе и денежные (финансовые) потоки).

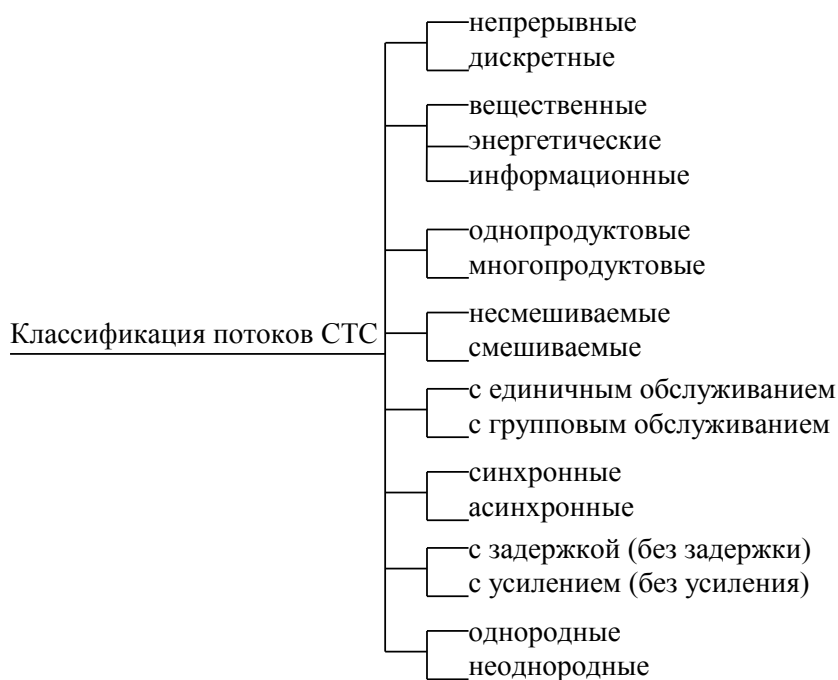


Рисунок 5.1 - Классификация потоков в сложной технической системе

В дальнейшем будем рассматривать в основном вещественные и/или информационные неоднородные потоки, так как они в исследуемых СЛО являются преобладающими и определяют в целом варианты технологии планирования ФЭ.

Множество $A = \{A_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ ФЭ, взаимодействующих посредством некоторой инфраструктуры [117, 120, 121] и представляющих собой искусственно созданные материальные объекты, осуществляющие информационное и/или вещественное взаимодействие с другими ФЭ, в ходе которого образуются соответствующие потоки между элементами и подсистемами СЛО. Каждый из образованных потоков характеризуется текущим и требуемым объемом (уровнем), интенсивностью передачи (приёма), скоростью изменения уровня потока, качественными параметрами потока.

Пусть на множестве A ФЭ СЛО выделяется множество источников A_0 , множество транзитных ФЭ (ретрансляторов) A_p и множество получателей (потребителей) A_n . Причём $A_0 \cup A_p \cup A_n = A$; $A_0 \cap A_n = \emptyset$; $A_0 \cap A_p \neq \emptyset$; $A_p \cap A_n \neq \emptyset$. Другими словами, множество источников и потребителей не имеют общих ФЭ, а транзитные ФЭ могут получать, обрабатывать, хранить и передавать информационные и/или материальные потоки.

В качестве примеров таких СЛО могут быть рассмотрены:

- сеть, образованная из информационных подсистем, обслуживающих конкретные бизнес-процессы, выполняемые в соответствующих территориально-распределенных подсистемах виртуальных предприятий [74-76];
- сеть космических аппаратов – ретрансляторов (КА-Р), обеспечивающая информационное взаимодействие КА-Р друг с другом и наземными абонентами [223];
- многоагентную (мультиагентную) систему [51,233], предполагая, что процессы взаимодействия агентов, определяются “личностными” свойствами каждого интеллектуального агента в отдельности (например, такими свойствами, как активность, общительность, реактивность, благожелательность, мобильность, альтруизм и т.п. [45,50,233,274]).

Так же будем предполагать, что каждый ФЭ СЛО (узел, подсистема СЛО) оборудован унифицированной многофункциональной аппаратурой, предназначенной для хранения, передачи и обработки потоков, известны технические характеристики указанной аппаратуры.

Удобно описывать процессы функционирования ФЭ, базируясь на диаграммах обобщенных состояний и диаграммах переходов из обобщенных состояний ФЭ СЛО. Так на рисунке 5.2 изображён фрагмент диаграммы переходов из обобщенных состояний A_μ ФЭ СЛО. На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: 1 – приём необработанного потока ФЭ A_μ от ФЭ $A_\nu \in A_0$; 2 – приём необработанного потока ФЭ A_μ от ФЭ $A_\nu \in A_p$; 3 – приём обработанного потока ФЭ A_μ от ФЭ $A_\nu \in A_p$; 4 – хранение поступившего на ФЭ A_μ потока; 5 – обработка потока, поступившего на ФЭ A_μ ; 6 – передача необработанного потока с ФЭ A_μ на ФЭ $A_\nu \in A_p$; 7 – передача обработанного потока с ФЭ A_μ на ФЭ $A_\nu \in A_p$; 8 – передача обработанного потока с ФЭ A_μ на ФЭ $A_\nu \in A_n$.

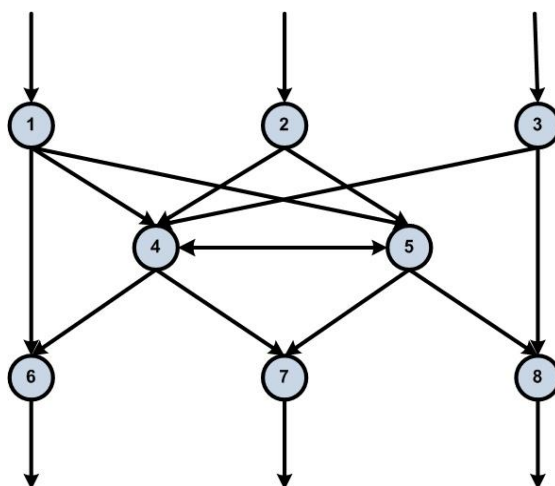


Рисунок 5.2 - Фрагмент диаграммы переходов из обобщённых состояний ФЭ СЛО

Приведенную диаграмму на рисунке 5.2 можно представить в более интегрированном виде (рисунок 5.3).

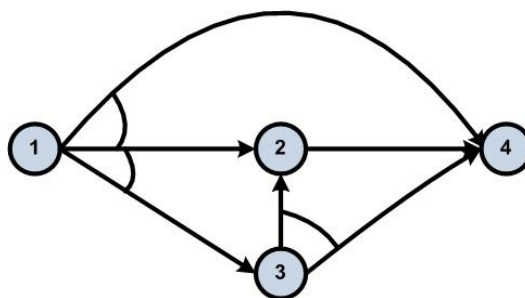


Рисунок 5.3 - Интегрированная диаграмма переходов из обобщённых состояний ФЭ СЛО

На рисунке 5.3 приняты следующие условные обозначения: 1 – операция приема ФЭ A_μ потока; 2 – операция предварительной обработки на ФЭ A_μ потока; 3 – операция хранения потока на ФЭ A_μ ; 4 – операция передачи потока с ФЭ A_μ .

Следует отметить, что в результате применения предложенных и разработанных на предыдущих этапах диссертационных исследований методик структурной реконфигурации СЛО построено множество эталонных сценариев структурной реконфигурации СЛО

$S^{\text{Эталон}} = \{S_{C_1}^{\text{Эталон}}, \dots, S_{C_\chi}^{\text{Эталон}}, \dots\} \subset S^{\text{Сцен}} = \{S_{C_1}, S_{C_2}, \dots, S_{C_n}\}$, включающее в

свой состав оптимистическую и пессимистическую эталонную траекторию.

Каждая эталонная траектория $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}} \in Sc^{\text{Эталон}}$ характеризуется набором структурных состояний СЛО $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}} = \{St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^{\chi}\}$, смену которых СЛО осуществляет на промежутке времени $T = (t_0, t_f]$ в результате ее реконфигурации. В соответствии с содержательным и теоретико-множественным описанием решаемой в работе проблемы для формализации указанного динамического изменения структурного состояния введем в рассмотрение динамический взвешенный мультиграф (ДВМ) следующего вида:

$$G_{\chi}(t) = \langle X_{\chi}(t), E_{\chi}(t), W_{\chi}(t) \rangle, \quad (5.1)$$

где χ - 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 ; $W_{\chi}(t) = \{w_{xij\rho}(t), i, j \in N_{\chi}, \rho \in P\}$ – 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 $e_{xji}(t)$, 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 $\rho \in P = \{1, 2, \dots, p\}$, имеющей различную степень важности и срочности.

В качестве элементов множества $W_{\chi}(t) = \{w_{xij\rho}(t), i, j \in N_{\chi}, \rho \in P, w_{xij\rho}(t) \in \{V_{xi\rho}(t), \psi_{xi\rho}(t), \omega_{xij\rho}(t), \phi_{xi\rho}(t)\}\}$, описывающих особенности хранения, передачи и обработки потоков различного типа, могут быть использованы следующие функции:

- $V_{\chi i \rho}(t)$ - объём запоминающего устройства (ЗУ) потока ρ типа в $A_{\chi i}$ ФЭ СЛО;
- $\psi_{\chi i \rho}(t)$ - интенсивность поступления внешнего потока ρ типа в $A_{\chi i}$ ФЭ СЛО;
- $\omega_{\chi ij \rho}(t)$ - интенсивность передачи потока ρ типа между ФЭ $A_{\chi i}$, $A_{\chi j}$ системы;
- $\phi_{\chi i \rho}(t)$ - интенсивность переработки потока ρ типа в $A_{\chi i}$ ФЭ системы.

Для конструктивного решения задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО необходимо: во-первых, разработать формальное описание различных аспектов процесса структурно-функциональной реконфигурации СЛО, и, во-вторых, разработать соответствующие методы, алгоритмы и методики решения исследуемых в данной работе задач планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

Проведем обобщенную постановку задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, для чего воспользуемся теоретико-множественным подходом, предложенным в работах [40,80,81,108,109,116,137,223].

Так теоретико-множественная модель структурно-функциональной реконфигурации СЛО в обобщенном виде может быть представлена в виде математической структуры выбора с мультипредпочтением [43,81]:

$$\left(Q(s, \omega), \Delta, \{r_i^\alpha(\omega)\}_{i \in \Gamma}, \{r_j^\beta(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}, \{F^k(\omega)\}_{k \in \Gamma_2}, \Omega = \{\omega\} \right) \quad (5.2)$$

где $Q(s, \omega)$ - некоторая исходная структура типа s , которая определяет тип модели (статическая, динамическая, математическая, логико-алгебраическая, детерминированная, с неопределенностью и т.п.);

Δ - множество альтернатив (планов, решений), на котором непосредственно производится выбор;

$\{r_j^\beta(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}$ – множество отношений, ограничивающих выбор, вводимых непосредственно при постановке задач выбора и отражающих основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с процессом функционирования рассматриваемой СЛО;

$\{r_i^\alpha(\omega)\}_{i \in \Gamma}$ – отношения предпочтения, задаваемые на $\Delta \times \Omega$ и характеризующие различные предпочтения при выборе рационального решения (для задач структурно-функциональной реконфигурации СЛО такие отношения задаются с использованием структурно-функциональных показателей);

$\{F^k(\omega)\}_{k \in \Gamma_2}$ – множества согласующих правил, позволяющих задавать результирующее отношение предпочтения задачи структурно-функциональной реконфигурации СЛО;

$\Omega = \{\omega\}$ – множество неопределенности.

Структура (5.2) представляет широкие возможности для того, чтобы в ее рамках рассматривать разнообразные математические постановки задач структурно-функциональной реконфигурации СЛО. Введение структуры $Q(s, \omega)$ позволяет ставить задачи выбора, связанные с теми или иными структурными (модельными) ограничениями, задаваемыми посредством сетей (статические модели), моделей типа динамических систем и т.д. Ограничивающие отношения $\{r_j^\beta(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}$ часто представляют в виде равенств и неравенств (случай смешанных ограничений), что позволяет связать постановку отдельных задач структурно-функциональной реконфигурации СЛО с соответствующими детерминированными задачами математического программирования и оптимального управления.

Характерной особенностью структуры (5.2), отличающей ее от соответствующей структуры выбора в условиях полной определенности, является наличие множества неопределенности $\Omega = \{\omega\}$, от элементов которого зависят все или часть компонент структуры (5.2). Следует различать четыре основных варианта введения неопределенности в описании исходной структуры $Q(s, \omega)$, что приво-

дит к рассмотрению постановок задач выбора соответственно на *вероятностных, статистических, нечётких структурах, а также структурах с неизвестностью*. Последний вариант является основным при постановке задач игрового выбора (в том числе и «игр с природой»).

При постановке задач выбора на вероятностных и нечетких структурах вводится $(\Omega, \mathfrak{F}, G)$ - вероятностное или нечеткое пространство, определяемое заданием множества элементарных событий $\Omega = \{\omega\}$, \mathfrak{F} - σ -алгебры и соответственно вероятностной или нечеткой меры G .

Кроме того особенностью структуры (5.2) является использование в явном или неявном виде согласующего правила $F(\omega)$ или множества согласующих правил $\{F^k(\omega)\}_{k \in \Gamma_2}$, направленных на преодоление критериальной неопределенности и разрешения противоречия между исходными отношениями предпочтения. Вводимое согласующее правило вида $F^k(\omega)$ определяет результирующее отношение предпочтения $r_{pez}(\omega) = F^k(\{r_i^\alpha(\omega), i \in \Gamma\})$.

С учётом вышесказанного, задача структурно-функциональной реконфигурации СЛО сводится к задаче определения множества наилучших с точки зрения заданных отношений предпочтения альтернатив. В сложных ситуациях выбора с множественным предпочтением первым шагом решения является выделение множества недоминируемых альтернатив, т.е. множества Парето (области недоминируемых альтернативных планов), определяемого следующим образом [43,81]:

$$\Delta_\beta^*(\omega) = \{u \in \Delta_\beta(\omega) \mid (\nexists z \in \Delta_\beta(\omega))(z r_{pez} u)\} \quad (5.3)$$

Выбор конкретной альтернативы u^* (оптимальной программы структурно-функциональной реконфигурации СЛО) должен осуществляться из указанного множества $\Delta_\beta^*(\omega)$. Здесь множество $\Delta_\beta(\omega) \subseteq \Delta$ допустимых альтернатив, удовлетворяющих отношениям $\{r_j^\beta(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}$, ограничивающих выбор.

При этом в целях упрощения дальнейшего рассмотрения конкретных задач структурно-функциональной реконфигурации СЛО будем пользоваться часто вводимым предположением о том, что задание отношений предпочтения $\{r_i^\alpha(\omega)\}_{i \in \Gamma}$ и ограничивающих отношений $\{r_j^\beta(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}$ может быть осуществлено с помощью некоторого числа отображений φ_i , ($i=1,2,\dots$), где каждое φ_i есть отображение вида $\varphi_i: \Delta \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^1$, принимающее соответственно при $u \in \Delta$ и $\omega \in \Omega$ значение $\varphi_i(u, \omega)$.

Итак, с использованием представленной выше теоретико-множественной модели функционирования СЛО удалось формализовать концептуальную модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО и классифицировать её как структуру выбора со многими отношениями предпочтения в условиях неопределенности.

5.3 Динамическая модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО

Из содержательной постановки задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО следует, что динамику изменения количества потока ρ типа, проходящего через A_{χ_i} ФЭ СЛО можно описать следующим соотношением

$$\dot{x}_{\chi_i \rho}^+(t) = \dot{x}_{\chi_i \rho}^-(t) + \dot{y}_{\chi_i \rho}(t) + \dot{z}_{\chi_i \rho}(t), \quad i \in N_\chi = \{1, 2, \dots, n_\chi\}. \quad (5.4)$$

В данном выражении (5.4) через $\dot{x}_{\chi_i \rho}^+(t)$ обозначена интенсивность поступления потока ρ типа в A_{χ_i} ФЭ СЛО, $\dot{x}_{\chi_i \rho}^-(t)$ - интенсивность сокращения потока ρ типа в A_{χ_i} ФЭ, $\dot{y}_{\chi_i \rho}(t)$ - интенсивность накопления (передачи) потока ρ типа в запоминающем устройстве A_{χ_i} ФЭ СЛО, $\dot{z}_{\chi_i \rho}(t)$ - интенсивность потери потока ρ типа в A_{χ_i} ФЭ.

В соответствии с обозначениями, введенными в содержательной постановки задачи, интенсивность поступления потока ρ типа в $A_{\chi i}$ ФЭ СЛО можно описать следующим соотношением (5.5):

$$\dot{x}_{\chi i\rho}^+(t) = \psi_{\chi i\rho}(t) + \sum_{j=1}^{n_{\chi}} e_{\chi ji}(t) \cdot \omega_{\chi ji\rho}(t) \cdot u_{\chi ji\rho}(t), \quad i \in N_{\chi}, \quad (5.5)$$

где $u_{\chi ji\rho}(t) \in \{0,1\}$ – управление передачей потока ρ типа на эталонной траектории $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО. При этом если $u_{\chi ji\rho}(t) = 1$, то поток ρ типа передается из $A_{\chi j}$ ФЭ в $A_{\chi i}$, а если $u_{\chi ji\rho}(t) = 0$, тогда поток не передается.

Интенсивность же сокращения потока ρ типа в $A_{\chi i}$ ФЭ СЛО можно описать соотношением (5.6)

$$\dot{x}_{\chi i\rho}^-(t) = \phi_{\chi i\rho}(t) \cdot \mathcal{G}_{\chi i\rho}(t) + \sum_{j=1}^{n_{\chi}} e_{\chi ij}(t) \cdot \omega_{\chi ij\rho}(t) \cdot u_{\chi ij\rho}(t), \quad i \in N_{\chi}, \quad (5.6)$$

где $\mathcal{G}_{\chi i\rho}(t) \in \{0,1\}$ – управление обработкой потока ρ типа на эталонной траектории $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО. Здесь если $\mathcal{G}_{\chi i\rho}(t) = 1$, то поток ρ типа обрабатывается в $A_{\chi i}$ ФЭ, а если $\mathcal{G}_{\chi i\rho}(t) = 0$, то поток не обрабатывается.

Соотношения (5.4)-(5.6) описывают динамику передачи, обработки, сохранения и потери потока на эталонной траектории $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО. Следует отметить, что $\psi_{\chi i\rho}(t)$, $\omega_{\chi ij\rho}(t)$, $\phi_{\chi i\rho}(t)$ являются заданными функциями, $e_{\chi ij}(t)$ описывает структурную реконфигурацию СЛО по соответствующему сценарию $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$ на интервале управления $T = (t_0, t_f]$.

Функции $y_{\chi i\rho}(t)$, $z_{\chi i\rho}(t)$, $u_{\chi ij\rho}(t)$, $\mathcal{G}_{\chi i\rho}(t)$ являются неизвестными, причем управления $u_{\chi ij\rho}(t)$, $\mathcal{G}_{\chi i\rho}(t)$ однозначно определяют потери $z_{\chi i\rho}(t)$ и динамику накопления и передачи потока $y_{\chi i\rho}(t)$ из запоминающего устройства $A_{\chi i}$ ФЭ СЛО.

Следовательно, пару функций $y_{\chi i \rho}(t)$, $z_{\chi i \rho}(t)$ можно рассматривать как состояние динамической системы.

В этих условиях модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО будет включать в себя следующие основные элементы.

Модель процесса структурно-функциональной реконфигурации СО

задается соотношениями (5.4)-(5.6).

Ограничения на возможные программные управления и состояния можно описать следующим образом

$$0 \leq y_{\chi i \rho}(t) \leq V_{\chi i} \quad \forall i \in N_{\chi}, \rho \in P, t \in (t_0, t_f] \quad (5.7)$$

$$u_{\chi ij \rho}(t) \in \{0,1\}, \mathcal{G}_{\chi i \rho}(t) \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N_{\chi}, \rho \in P, t \in (t_0, t_f], \quad (5.8)$$

$$z_{\chi i \rho}(t) \geq 0, \dot{z}_{\chi i \rho}(t) \geq 0 \quad \forall i \in N_{\chi}, \rho \in P, t \in (t_0, t_f]. \quad (5.9)$$

Краевые условия имеют вид:

$$y_{\chi i \rho}(t_0) = z_{\chi i \rho}(t_0) = 0 \quad \forall i \in N_{\chi}, \quad y_{\chi i \rho}(t_f) \geq 0, z_{\chi i \rho}(t_f) \geq 0 \quad \forall i \in N_{\chi}, \rho \in P. \quad (5.10)$$

Допустимые управления $u_{\chi ij \rho}(t)$, $\mathcal{G}_{\chi i \rho}(t)$, которые удовлетворяют уравнениям (5.4)-(5.6), описывающим изменение состояния, ограничениям вдоль траектории (5.7)-(5.9) и краевым условиям (5.10), могут оцениваться в соответствии с различными показателями, характеризующими качество функционирования СЛО.

Таковыми показателя могут быть:

➤ суммарные потери потоков

$$J_{\chi 1} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} z_{\chi i \rho}(t) dt; \quad (5.11)$$

➤ суммарный объем обработанных потоков

$$J_{\chi 2} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \phi_{\chi i \rho}(t) \cdot \mathcal{G}_{\chi i \rho}(t) dt; \quad (5.12)$$

➤ суммарный объем сохраненных потоков

$$J_{\chi 3} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} y_{\chi i \rho}(t) dt; \quad (5.13)$$

➤ издержки на передачу и обработку потоков

$$J_{\chi^4} = \int_{t_0}^{t_f} \left(\sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{\chi ij \rho}(t) \cdot u_{\chi ij \rho}(t) + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \pi_{\chi i \rho}(t) \cdot \mathcal{G}_{\chi i \rho}(t) \right) dt, \quad (5.14)$$

здесь $r_{\chi ij \rho}(t)$ – издержки при передаче потока ρ типа из $A_{\chi i}$ ФЭ в $A_{\chi j}$ ФЭ в момент времени t , $\pi_{\chi i \rho}(t)$ – издержки на обработку потока ρ типа на $A_{\chi i}$ ФЭ в момент времени t .

Кроме приведенных показателей качества функционирования СЛО могут быть предложен ряд других показателей.

Указанная задача планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО (5.4)-(5.14) относится к классу билинейных нестационарных дифференциальных динамических моделей и имеет ряд специфических черт, которые отличают их от классических задач теории оптимального управления сложными динамическими системами [10,19,20,36,64,115,192,228,249,269,283]. Первая особенность данной задачи заключается в том, что в правых частях дифференциальных уравнений (5.4)-(5.6), описывающих процесс структурно-функциональной реконфигурации СЛО, присутствуют разрывные функции $e_{\chi ij}(t)$, определяющие структурную динамику СЛО. Поэтому рассматриваемую задачу можно отнести к задачам управления с промежуточными условиями [115].

Следовательно, непосредственное применение методов и алгоритмов, разработанных для решения подобных задач оптимального управления с непрерывными и непрерывно дифференцируемыми функциями, встречает трудности теоретического и прикладного характера. Другая особенность задач состоит в том, что они относятся к классу задач многокритериального выбора. Следующая особенность задачи состоит в том, что сведения об основных факторах и условиях, влияющих на успешное решение указанных задач, имеют различную степень достоверности и определённости. Кроме того, существенно затрудняет процесс планирования, как правило, отсутствие аналитической зависимости между указанными факторами и условиями, определяющими (описывающими) технологию планирования. Это в первую очередь касается факторов и условий, затрудняющих

выполнение целевых задач объектами (например, возмущающие факторы со стороны внешней среды).

Однако каждая эталонная траектория $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}} \in Sc^{\text{Эталон}}$ характеризуется набором структурных состояний СЛО $\{St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^{\chi}\}$, смену которых СЛО осуществляет на промежутке времени $T = (t_0, t_f]$ в результате ее реконфигурации. В результате проведенного анализа и предложенных подходов в разделе 1 данного диссертационного исследования полагаем, что заданный интервал времени $T = (t_0, t_f]$ структурной реконфигурации СЛО разбит на некоторое число L_{χ} подынтервалов $T = \{(t_0, t_1], (t_1, t_2], \dots, (t_{k-1}, t_k], \dots, (t_{L_{\chi}-1}, t_{L_{\chi}} = t_f)\}$ постоянства структуры СЛО. В каждом подынтервале $T_k = (t_{k-1}, t_k]$ СЛО находится в неизменном состоянии $St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^{\chi}$.

Данное предположение позволяет свести многокритериальную задачу оптимального управления с разрывными правыми частями к многокритериальной статической модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

5.4 Статическая модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО

5.4.1 Статическая интерпретация динамической модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО

Для сведения динамической модели (5.4)-(5.14) к ее статической интерпретации проведем интегрирование выражений (5.4)-(5.6), описывающих динамику изменения состояния системы, на интервалах постоянства структуры $T_k = (t_{k-1}, t_k]$, $k = 1, \dots, L_{\chi}$, так как на интервалах постоянства структуры функции $e_{\chi ij}(t)$ постоянны. При этом функции управления $u_{\chi ij \rho}(t)$, $\mathcal{G}_{\chi i \rho}(t)$ трансформируются в соответствующие переменные

$u_{\chi ij \rho k} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} u_{\chi ij \rho}(t) dt$, $\mathcal{G}_{\chi i \rho k} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \mathcal{G}_{\chi i \rho}(t) dt$, ха-

рактически характеризующие время передачи потока ρ типа из A_{χ_i} ФЭ в A_{χ_j} ФЭ и время обработки потока ρ типа в A_{χ_i} ФЭ на интервале $T_k = (t_{k-1}, t_k]$, $k = 1, \dots, L_{\chi}$.

Тогда выражения (5.4)-(5.6), характеризующие потоки разнородного потока, проходящие через A_{χ_i} ФЭ, можно переписать в следующем виде

$$I_{\chi_i \rho k} + y_{\chi_i \rho(k-1)} + \sum_{j \in N_{\chi_i}^-} \omega_{\chi_{ji} \rho k} \cdot u_{\chi_{ji} \rho k} = \phi_{\chi_i \rho k} \cdot g_{\chi_i \rho k} + \sum_{j \in N_{\chi_i}^+} \omega_{\chi_{ij} \rho k} \cdot u_{\chi_{ij} \rho k} + y_{\chi_i \rho k} + z_{\chi_i \rho k}, \quad (5.15)$$

здесь $I_{\chi_i \rho k} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \psi_{\chi_i \rho}(t) dt$ - количество потока ρ типа, поступившее в A_{χ_i} ФЭ

извне на интервале T_k ; $y_{\chi_i \rho(k-1)}$ - количество потока ρ типа, сохраненное в запоминающемся устройстве A_{χ_i} ФЭ на интервале T_{k-1} ; $\omega_{\chi_{ij} \rho k}$ - интенсивность передачи потока ρ типа из A_{χ_i} ФЭ в A_{χ_j} ФЭ на интервале T_k ; $\phi_{\chi_i \rho k}$ - интенсивность обработки потока ρ типа в A_{χ_i} ФЭ на интервале T_k ; $y_{\chi_i \rho k}$ - количество потока ρ типа, сохраненное в запоминающемся устройстве A_{χ_i} ФЭ на интервале T_k ; $z_{\chi_i \rho k}$ - количество потока ρ типа, потерянное в A_{χ_i} ФЭ на интервале T_k ; $N_{\chi_i}^- = \{j \in N_{\chi} \mid e_{\chi_{ji}}(k) = 1\}$ - множество номеров ФЭ СЛО на эталонной траектории $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$, из которых в A_{χ_i} ФЭ на интервале 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_{χ_i} ФЭ на интервале времени T_k возможна передача потока.

Физический смысл выражения (5.15) состоит в следующем: весь поток ρ типа, поступивший в A_{χ_i} ФЭ либо извне, либо из других ФЭ на интервале постоянства структуры T_k , либо находящийся в запоминающемся устройстве на предыдущем интервале постоянства структуры T_{k-1} , должен либо быть обработан, либо быть передан в другие ФЭ, либо быть потерян.

Введем следующие переменные: $x_{\chi_{ij} \rho k} = \omega_{\chi_{ij} \rho k} \cdot u_{\chi_{ij} \rho k}$ - количество переданного потока ρ типа из A_{χ_i} ФЭ в A_{χ_j} ФЭ на интервале T_k ; $g_{\chi_i \rho k} = \phi_{\chi_i \rho k} \cdot g_{\chi_i \rho k}$ - количе-

ство обработанного потока ρ типа в A_{χ_i} ФЭ на интервале T_k . Тогда выражение (5.15) можно записать следующим образом:

$$\left(\sum_{j \in N_{\chi_i}^+} x_{\chi_{ij\rho k}} - \sum_{j \in N_{\chi_i}^-} x_{\chi_{ji\rho k}} \right) + (y_{\chi_{i\rho k}} - y_{\chi_{i\rho(k-1)}}) + g_{\chi_{i\rho k}} + z_{\chi_{i\rho k}} = I_{\chi_{i\rho k}}. \quad (5.16)$$

В выражении (5.16) величины $x_{\chi_{ij\rho k}}$, $y_{\chi_{i\rho k}}$, $y_{\chi_{i\rho(k-1)}}$, $g_{\chi_{i\rho k}}$, $z_{\chi_{i\rho k}}$ являются неизвестными переменными, которые в соответствии с (5.7)-(5.10) должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$0 \leq x_{\chi_{ij\rho k}} \leq \omega_{\chi_{ij\rho k}} \cdot (t_k - t_{k-1}); \quad 0 \leq y_{\chi_{i\rho k}} \leq V_{\chi_i}; \quad 0 \leq g_{\chi_{i\rho k}} \leq \phi_{\chi_{i\rho k}} \cdot (t_k - t_{k-1}); \quad z_{\chi_{i\rho k}} \geq 0. \quad (5.17)$$

При формировании плана структурно-функциональной реконфигурации СЛО поиск наилучшего решения осуществляется при оптимизации следующих обобщенных показателей функциональных возможностей системы:

➤ суммарный объем потерянных потоков

$$J_{\chi^1} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} z_{\chi_{i\rho k}}; \quad (5.18)$$

➤ суммарный объем обработанных потоков

$$J_{\chi^2} = \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi_{i\rho k}}; \quad (5.19)$$

➤ суммарный объем сохраненных потоков

$$J_{\chi^3} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} y_{\chi_{i\rho k}}; \quad (5.20)$$

➤ количество ресурсов, израсходованных на передачу и обработку потоков на каждом A_{χ_i} ФЭ

$$J_{\chi^4 i} = \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi_{ij\rho k}} + \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi_{i\rho k}}, \quad i \in N_{\chi} \quad (5.21)$$

здесь γ_{ρ} - важность потока ρ типа, λ_{ρ} - срочность потока ρ типа, $r_{ij\rho}$ - расходы ресурсов при передаче единицы потока ρ типа из A_{χ_i} ФЭ в A_{χ_j} ФЭ, $\pi_{i\rho}$ - расходы ресурсов на обработку единицы потока ρ типа в A_{χ_i} ФЭ.

Кроме того можно использовать и другие частные показатели качества функционирования СЛО.

План структурно-функциональной реконфигурации δ_χ можно обобщенно представить состоящим из четырех подвекторов $x_\chi, y_\chi, g_\chi, z_\chi$ следующим образом $\delta_\chi = \|x_\chi, g_\chi, y_\chi, z_\chi\| = \| \|x_{\chi ij\rho k}\|, \|g_{\chi i\rho k}\|, \|y_{\chi i\rho k}\|, \|z_{\chi i\rho k}\| \|$, где $\|x_{\chi ij\rho k}\|$ - характеризует передачу потоков между ФЭ СЛО, $\|g_{\chi i\rho k}\|$ - характеризует переработку потоков в ФЭ, $\|y_{\chi i\rho k}\|$ - характеризует накопление потоков в ФЭ СЛО, $\|z_{\chi i\rho k}\|$ - характеризует потери потоков.

Тогда выражения (5.16), (5.17) задают множество допустимых планов структурно-функциональной реконфигурации $\Delta_{\chi\beta} = \{\delta_\chi\}$ на эталонной траектории $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО. На множестве $\Delta_{\chi\beta} = \{\delta_\chi\}$ осуществляется выбор рациональных планов структурно-функциональной реконфигурации $\Delta_{\chi\beta}^* \subseteq \Delta_{\chi\beta}$ с учетом отношений предпочтений $\{r_i^\alpha\}_{i \in \Gamma}$, заданных критериальными функциями (5.18)-(5.21)

$$(J_{\chi 1}(\delta_\chi) \rightarrow \min, J_{\chi 2}(\delta_\chi) \rightarrow \max, J_{\chi 3}(\delta_\chi) \rightarrow \max, J_{\chi 4i}(\delta_\chi) \rightarrow \min).$$

5.4.2 Формирование результирующего отношения предпочтения выбора плана структурно-функциональной реконфигурации СЛО

Из анализа (5.16)–(5.21) следует [117,120,121], что в рамках предложенной формализации задача структурно-функциональной реконфигурации СЛО с интервалами постоянства динамически изменяемой структуры сведена к многокритериальной задаче линейного программирования большой размерности с двусторонними ограничениями. Пути преодоления проблемы критериальной неопределенности были рассмотрены в разделе 3 (параграф 3.3.2). При формировании результирующего отношения предпочтения рассматриваемой задачи будем учитывать следующие аспекты, наиболее существенные для систем передачи потоков с пе-

рестраиваемой структурой. Во-первых, эффективность функционирования СЛО связана с полнотой доведения наиболее важных потоков до ее потребителей и, во-вторых, с повышением срока активного существования ФЭ СЛО и СЛО в целом.

Так первый аспект отражают показатели (5.18)-(5.20): $J_{\chi 1} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} z_{\chi i \rho k}$ - сум-

марный объем потерянных потоков; $J_{\chi 2} = \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i \rho k}$ - суммарный объем об-

работанных потоков; $J_{\chi 3} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} y_{\chi i \rho k}$ - суммарный объем сохраненных пото-

ков.

Указанные показатели можно связать следующим соотношением $J_{\chi 1} = I - J_{\chi 2} - J_{\chi 3}$, где I - суммарное количество потоков поступивших извне для передачи на интервале $T = \{(t_0, t_1], (t_1, t_2], \dots, (t_{k-1}, t_k], \dots, (t_{L_{\chi}-1}, t_{L_{\chi}} = t_f)\}$. Следует отме-

тить, что минимизация показателя $J_{\chi 1}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min_{\delta_{\chi} \in \Delta_{\chi\beta}}$ способствует повышению зна-

чений $J_{\chi 2}(\delta_{\chi}) + J_{\chi 3}(\delta_{\chi})$ сохраненных и обработанных потоков. С другой стороны,

максимизация показателя $J_{\chi 2}(\delta_{\chi}) \rightarrow \max_{\delta_{\chi} \in \Delta_{\chi\beta}}$ переработанных потоков способствует

нахождению планов структурно-функциональной реконфигурации, в которых количество потоков, накапливаемых в запоминающих устройствах ФЭ СЛО, сокращается. Согласно проведенного анализа показатели $\{J_{\chi 1}, J_{\chi 2}\}$ можно отранжиро-

вать следующим образом $J_{\chi 1} \succ J_{\chi 2}$.

Срок активного существования ФЭ СЛО (второй аспект) определяется запасами энергоресурса ФЭ, который расходуется на передачу и обработку потоков. В этой связи следует так планировать структурно-функциональную реконфигурацию СЛО, чтобы минимизировать расход ресурса

$J_{\chi 4i}(\delta_{\chi}) = \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi ij\rho k} + \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k} \rightarrow \min_{\delta_{\chi} \in \Delta_{\chi\beta}}, i \in N_{\chi}$. Однако непосредствен-

ное использование показателей $J_{\chi 4i}(\delta_{\chi}), i \in N_{\chi}$ может привести к неравномерно-

му использованию ресурсов ФЭ СЛО. В этой связи целесообразно учитывать предысторию функционирования ФЭ СЛО (предыдущий расход ресурса ФЭ - $R_{\chi 0i}$, $i \in N_{\chi}$) и минимизировать общую для всех ФЭ СЛО верхнюю грань

$$(\nu_{\chi} \rightarrow \min) \text{ расхода ресурсов } R_{\chi 0i} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi ij\rho k} + \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k} \leq \nu_{\chi}, i \in N_{\chi}.$$

В этом случае при поиске

$$J_{\chi 4}(\delta_{\chi}) = \nu_{\chi} \rightarrow \min, \delta_{\chi} \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta} = \Delta_{\chi\beta} \cap \{R_{\chi 0i} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi ij\rho k} + \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k} \leq \nu_{\chi}, i \in N_{\chi}\}$$

достигается минимизация расходования ресурсов, прежде всего тех ФЭ, которые на предыдущих шагах интенсивно участвовали в обмене, что позволяет сохранить работоспособность СЛО в целом.

Таким образом, задача (5.16)-(5.21) векторной оптимизации с $n_{\chi} + 3$ критериями сведена к задаче с тремя критериями $J_{\chi 1}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min_{\delta_{\chi} \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}}$, $J_{\chi 2}(\delta_{\chi}) \rightarrow \max_{\delta_{\chi} \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}}$,

$$J_{\chi 4}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min_{\delta_{\chi} \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}}.$$

Преодоление критериальной неопределенности указанной задачи связано, в первую очередь, с нахождением компромисса между группой показателей $\{J_{\chi 1}(\delta_{\chi}), J_{\chi 2}(\delta_{\chi})\}$, отражающих целевые аспекты функционирования СЛО, и показателем $J_{\chi 4}(\delta_{\chi})$, отражающим технические аспекты. Причем предположение о том, что показатель $J_{\chi 4}$ важнее группы показателей $\{J_{\chi 1}, J_{\chi 2}\}$ ($J_{\chi 4} \succ \{J_{\chi 1}, J_{\chi 2}\}$) может привести к тривиальным решениям $\delta_{\chi}^* = \|\|0\|, \|0\|, \|y_{\chi i\rho k}^*\|, \|z_{\chi i\rho k}^*\|\|$, обеспечивающим минимальные энергозатраты, когда ничего не передается и не обрабатывается, а все поступающие потоки хранятся в запоминающих устройствах ФЭ СЛО или теряется. Следовательно, область компромисса лица, принимающего решение (ЛПР), существенно сужается и рациональными можно считать решающие правила, при которых обеспечивается отношение $J_{\chi 1} \succ J_{\chi 2} \succ J_{\chi 4}$. По этой причине для построения результирующего отношения предпочтения можно использовать лексикографические методы [43,97,98,187-189]. Лексикографическая задача много-

критериального выбора сводится к решению следующей последовательности задач оптимизации:

$$\tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1 = \text{Arg min}_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}} J_{\chi^1}(\delta_\chi) \Rightarrow \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2 = \text{Arg max}_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1} J_{\chi^2}(\delta_\chi) \Rightarrow \delta_\chi^* = \text{arg min}_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2} J_{\chi^4}(\delta_\chi)$$

Одна из особенностей лексикографического метода состоит в том, что уже множество $\tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1$, получаемое при оптимизации критериальной функции J_{χ^1} , на исходном множестве $\tilde{\Delta}_{\chi\beta}$ может содержать единственную альтернативу $\delta_\chi^* = \text{arg min}_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}} J_{\chi^1}(\delta_\chi)$. В данной ситуации теряется возможность оптимизации по другим критериальным функциям. Для расширения возможностей применения лексикографических методов по остальным критериальным функциям введем интервальный лексикографический порядок – *метод последовательных уступок* [43,97,98,187-189]. В этом случае метод и соответствующий алгоритм последовательного сужения множества альтернатив $\delta_\chi^* \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2 \subseteq \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1 \subseteq \tilde{\Delta}_{\chi\beta}$ состоят в следующем:

$$\tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1 = \{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta} \mid J_{\chi^1}(\delta_\chi) \leq J_{\chi^1}^{\min} + \varepsilon_1\} \Rightarrow \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2 = \{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1 \mid J_{\chi^2}(\delta_\chi) \geq J_{\chi^2}^{\max} - \varepsilon_2\} \Rightarrow \delta_\chi^* = \text{arg min}_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2} J_{\chi^4}(\delta_\chi), \text{ где } J_{\chi^1}^{\min} = \min_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}} J_{\chi^1}(\delta_\chi), J_{\chi^2}^{\max} = \max_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1} J_{\chi^2}(\delta_\chi).$$

Приведенным соотношениям может быть дана следующая интерпретация: вначале проводится оптимизация по первой целевой функции J_{χ^1} (суммарный объем потерянных потоков), определяется минимальное значение этой функции $J_{\chi^1}^{\min} = \min_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}} J_{\chi^1}(\delta_\chi)$ и вводится максимальное допустимое снижение данного показателя (уступка) ε_1 . Далее производится оптимизация по J_{χ^2} (суммарный объем обработанных потоков), определяется максимальное значение этой функции $J_{\chi^2}^{\max} = \max_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1} J_{\chi^2}(\delta_\chi)$ и вводится максимальное допустимое снижение данного показателя (уступка) ε_2 . Наконец, осуществляется оптимизация по показателю J_{χ^4} (расход ресурса). Чем меньше уступки по предшествующим показателям, тем меньше возможности улучшения последующих показателей. В то же время, оче-

видно, что нет смысла назначать такие уступки, которые снижали бы значения показателей ниже минимальных (максимальных) значений, принимаемых этими функциями во множестве Парето (недоминируемых альтернатив). Варьируя уступками, получаем различные решения из области Парето (области компромиссов).

Однако множество допустимых решений $\tilde{\Delta}_{\chi\beta}$ является выпуклым многогранным множеством, а критериальные функции решаемой задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО являются линейными. Указанные обстоятельства позволяют для нахождения планов структурно-функциональной реконфигурации из области Парето использовать стандартную методику скаляризацию векторного показателя в виде аддитивной свертки Лагранжа [43,97,98,187-189,257] и введении в модель следующего критерия $J_{\delta\alpha_c}(\delta_\chi) = \alpha_3\alpha_2 J_{\chi_2}(\delta_\chi) - \alpha_3\alpha_1 J_{\chi_1}(\delta_\chi) - \alpha_4 J_{\chi_4}(\delta_\chi) \rightarrow \max$, где $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$ - коэффициенты важности показателей J_{χ_1}, J_{χ_2} , $\alpha_3 + \alpha_4 = 1$, $\alpha_3, \alpha_4 \geq 0$ - коэффициенты важности между группой показателей $\{J_{\chi_1}, J_{\chi_2}\}$ и показателем J_{χ_4} , устанавливаемые ЛПР в конкретной обстановке функционирования СЛО.

Таким образом, задача планирования структурно-функциональной реконфигурации на эталонной траектории $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО в статической постановке окончательно имеет вид:

$$\alpha_3\alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i \rho k} - \alpha_3\alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} z_{\chi i \rho k} - \alpha_4 v_{\chi} \rightarrow \max \quad (5.22)$$

$$\left(\sum_{j \in N_{\chi}^+} x_{\chi ij \rho k} - \sum_{j \in N_{\chi}^-} x_{\chi ji \rho k} \right) + (y_{\chi i \rho k} - y_{\chi i \rho (k-1)}) + g_{\chi i \rho k} + z_{\chi i \rho k} = I_{\chi i \rho k}, i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi}, \quad (5.23)$$

$$v_{\chi} - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij \rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi ij \rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i \rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i \rho k} - v_{\chi i} = R_{\chi 0 i}, i \in N_{\chi}, \quad (5.24)$$

$$y_{\chi i \rho k} + \eta_{\chi ik} = V_{\chi i}, i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi} \quad (5.25)$$

$$0 \leq x_{\chi ij \rho k} \leq \omega_{\chi ij \rho k} \cdot (t_k - t_{k-1}), 0 \leq g_{\chi i \rho k} \leq \phi_{\chi i \rho k} \cdot (t_k - t_{k-1}), i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi}, \quad (5.26)$$

$$y_{\chi i \rho k} \geq 0, z_{\chi i \rho k} \geq 0, v_{\chi i} \geq 0, \eta_{\chi ik} \geq 0, v_{\chi} \geq 0, i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi}. \quad (5.27)$$

и может решаться методами последовательного улучшения планов с двусторонними ограничениями на искомые переменные.

5.4.3 Анализ возможных путей решения задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО

Рассмотрим ряд специфических особенностей, свойственных задаче структурно-функциональной реконфигурации на эталонной траектории $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО в статической постановке (5.22)-(5.27), и анализируем возможные пути решения указанной задачи.

Задачу (5.22)-(5.27) в обобщенном виде можно представить следующим образом:

$$c_{\chi} \cdot \delta_{\chi} \rightarrow \max, \quad (5.28)$$

$$A_{\chi} \cdot \delta_{\chi} = b_{\chi}, \quad (5.29)$$

$$0 \leq \delta_{\chi} \leq \delta_{\chi}^0, \quad (5.30)$$

где c_{χ} - вектор целевой функции, A_{χ}, b_{χ} - матрица и вектор системы ограничений, δ_{χ}^0 - вектор ограничений на переменные δ_{χ} .

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

$$\delta_{\chi} = \left\| \left. x_{\chi i j \rho 1} x_{\chi i j \rho 2} \dots x_{\chi i j \rho L_{\chi}} \right| \left. g_{\chi i \rho 1} g_{\chi i \rho 2} \dots g_{\chi i \rho L_{\chi}} \right| \left. y_{\chi i \rho 1} y_{\chi i \rho 2} \dots y_{\chi i \rho L_{\chi}} \right| \left. z_{\chi i \rho 1} z_{\chi i \rho 2} \dots z_{\chi i \rho L_{\chi}} \right| \left. v_{\chi} \right| \left. v_{\chi i} \right| \left. \eta_{\chi i 1} \eta_{\chi i 2} \dots \eta_{\chi i L_{\chi}} \right\|^T,$$

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

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

$$c_{\chi} = \left\| \left. 00 \dots 0 \right| \left. \alpha_3 \alpha_2 \lambda_1 \alpha_3 \alpha_2 \lambda_1 \dots \alpha_3 \alpha_2 \lambda_p \right| \left. 00 \dots 0 \right| \left. -\alpha_3 \alpha_1 \gamma_1 - \alpha_3 \alpha_1 \gamma_1 \dots - \alpha_3 \alpha_1 \gamma_p \right| \left. -\alpha_4 \right| \left. 00 \dots 0 \right\|^T.$$

Вектор b_{χ} системы ограничений состоит из компонент, характеризующих поступление потоков в ФЭ СЛО на всех интервалах, описывающих количество

издержек ФЭ на передачу и обработку потоков на предыдущих этапах управления, и компонент, описывающих объемы запоминающих устройств ФЭ СЛО:

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

Проведённый анализ системы линейных ограничений показал, что матрица ограничений A_{χ} имеет сложную блочную структуру, представленную на рисунке 5.4.

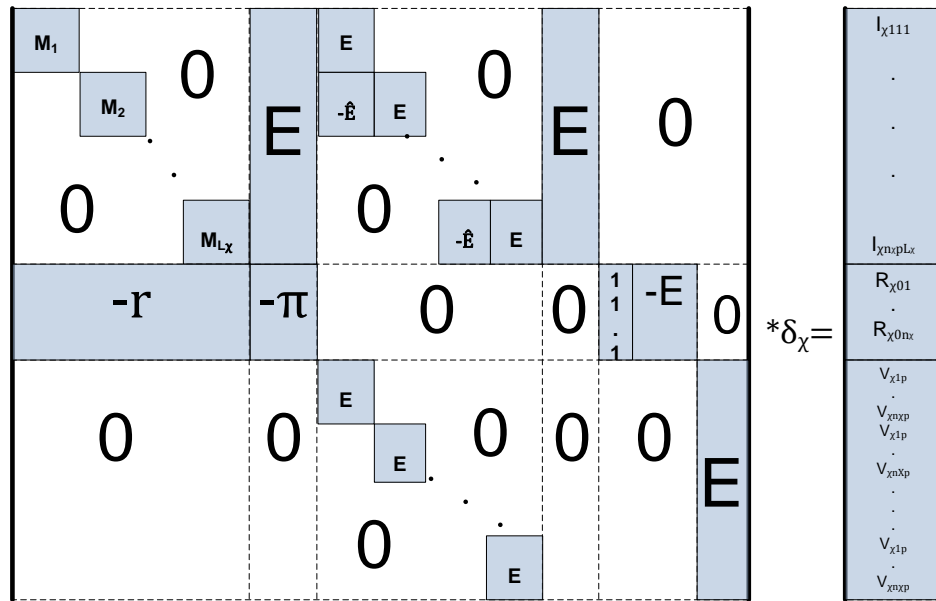


Рисунок 5.4 - Структура ограничений задачи (5.22)-(5.27)

Исходные данные для формирования матрицы ограничений A_{χ} служат: матрицы инцидентий $M_k, k = 1, \dots, L_{\chi}$ структурных состояний СЛО на интервалах постоянства структуры эталонной траектории $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$; данные о расходовании ресурсов i -м ФЭ СЛО на интервалах постоянства структуры при передаче и обработке информации ρ -го типа $(r_{ij\rho}, \pi_{i\rho})$.

Матрица условий имеет максимальную размерность $(n_{\chi} \times L_{\chi} \times (p + 1) + n_{\chi}) \times (m_0 + 3 \times n_{\chi} \times L_{\chi} \times (p + 1) + n_{\chi} + 1)$, где n_{χ} - число ФЭ СЛО; L_{χ} - число интервалов постоянства структуры; m_0 - суммарное число дуг структур на всех интервалах постоянства. Отличительной особенностью решаемой задачи является ее большая размерность. В частности, матрица ограничений при $n_{\chi} \cong 10$,

$L_x \cong 5$, $p \cong 3$ достигает размерности $10^4 - 10^5$. При такой размерности классические методы математического программирования оказываются малоэффективными. Это обусловило необходимость разработки специальных методов как точных, так и приближенных, предназначенных для задач большой размерности. Большинство из этих методов использует идею декомпозиции, которая заключается в расчленении исходной задачи большой размерности, нахождении независимых решений для каждой из них и последующей увязке этих частных решений в общее решение исходной задачи. Впервые идея декомпозиции применительно к задачам линейного программирования была сформулирована Г.Данцигом и Вулфом, а позднее была развита в работах Д.Б.Юдина, Б.Г. Гольштейна, М. Месаровича, Л. Лэсона, В.И. Цуркова и др. [58,101,256,263,264].

Метод Данцига-Вулфа оказался наиболее эффективным для решения задач, матрица ограничений которых имеет блочно-диагональный вид.

К такому виду рассматриваемая задача управляемой реконфигурации (5.22)-(5.27) сводится в случае отсутствия в ФЭ СЛО запоминающих устройств. Действительно, в этом случае матрица ограничений имеет вид, приведенный на рисунке 5.5.

Однако, как показали дальнейшие исследования, метод применим также и для задач линейного программирования с матрицей общего вида. Соответствующий метод предложен Д.Б.Юдиным и Е.Г. Гольштейном [263,264] и называется методом «блочного программирования».

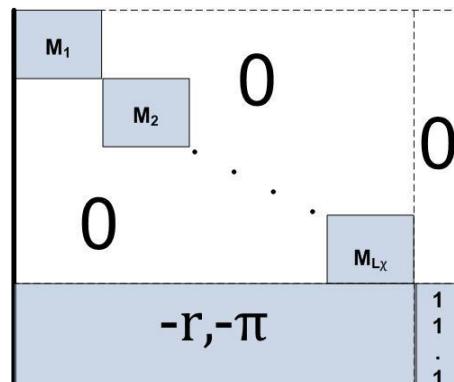


Рисунок 5.5 - Блочно-диагональный вид матрицы ограничений

Отличительной особенностью метода декомпозиции является использование координирующей задачи, которая имеет по сравнению с исходной небольшое число строк и большое число столбцов. Существенным является то, что для решения координирующей задачи не требуется задания всех столбцов в явном виде. Они генерируются в процессе использования симплекс-метода. Такой подход получил название метода генерации столбцов.

Таковыми связующими ограничениями для решаемой задачи можно рассматривать ограничения (5.24). Учитывая структуру задачи, представленную на рисунке 5.4, можно довольно просто выбрать исходный опорный план задачи (5.22)-(5.27)

$$\begin{aligned} \delta_{\chi^0} &= \left\| x_{\chi ij\rho 1}^0 \ x_{\chi ij\rho 2}^0 \ \dots \ x_{\chi ij\rho L_\chi}^0 \ \middle| \ g_{\chi i\rho 1}^0 \ g_{\chi i\rho 2}^0 \ \dots \ g_{\chi i\rho L_\chi}^0 \ \middle| \ y_{\chi i\rho 1}^0 \ y_{\chi i\rho 2}^0 \ \dots \ y_{\chi i\rho L_\chi}^0 \ \middle| \ z_{\chi i\rho 1}^0 \ z_{\chi i\rho 2}^0 \ \dots \ z_{\chi i\rho L_\chi}^0 \ \middle| \ v_\chi^0 \ \middle| \ v_{\chi i}^0 \ \middle| \ \eta_{\chi i1}^0 \ \eta_{\chi i2}^0 \ \dots \ \eta_{\chi iL_\chi}^0 \ \right\|^T = \\ &= \left\| 00 \dots 0 \ \middle| \ 00 \dots 0 \ \middle| \ 00 \dots 0 \ \middle| \ I_{\chi i\rho 1} \ I_{\chi i\rho 2} \ \dots \ I_{\chi i\rho L_\chi} \ \middle| \ v_\chi^0 \ \middle| \ v_{\chi i}^0 \ \middle| \ V_{\chi 1} \ V_{\chi 2} \ \dots \ V_{\chi n_\chi} \ \right\|^T. \end{aligned}$$

В качестве величин $v_\chi^0, v_{\chi i}^0, i = \overline{1, n_\chi}$ задаются $v_\chi^0 = \max_{i=\overline{1, n_\chi}} R_{\chi 0i}$ и $v_{\chi i}^0 = v_\chi^0 - R_{\chi 0i}, i = \overline{1, n_\chi}$, а исходный базис включает номера переменных, соответствующих потерям потока, и номера дополнительных переменных ограничений, отражающих издержки, и ограничений, учитывающих объем запоминающих устройств ФЭ СЛО. Такому начальному плану можно сопоставить ситуацию, когда в системе ничего не передается и ничего не перерабатывается (отсутствуют издержки энергоресурсов), а весь поступающий поток теряется. Начальное опорное решение постепенно улучшается в соответствии с разработанным алгоритмом по методу последовательного улучшения плана с двусторонними ограничениями на переменные [263,264] и находится оптимальное решение δ_{χ^*} . Полученное оптимальное распределение потоков δ_{χ^*} преобразуется к удобному для анализа ЛПР виду, производится его распределение по переменным, несущим различную смысловую нагрузку, вычисляются вторичные характеристики, облегчающие оценку плана.

5.4.4 Параметрический синтез СЛО

Задача структурно-функциональной реконфигурации на эталонной траектории $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО в статической постановке имеет вид (5.22)-(5.27) или в обобщенном виде (5.28)-(5.30). В результате решения указанной задачи определяется оптимальное решение δ_{χ^*} (оптимальное распределение потоков) для различных эталонных траекторий $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$ и, в частности, для оптимистического δ_{+*} и пессимистического δ_{-*} сценариев.

С практической точки зрения весьма актуальной является задача построения модели параметрического синтеза СЛО, с помощью которой удастся 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.

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

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

При этом помимо издержек на передачу $r_{ij\rho}$ потока ρ типа из A_i ФЭ в A_j ФЭ, обработку $\pi_{i\rho}$ потока ρ 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 , $\varpi_{ij\rho}$, $\varphi_{i\rho}$ синтезируемого структурного состояния системы. Обозначим постоянные издержки энергоресурса на поддержание единицы объема хранилища, передачи и обработки потока соответственно Λ_i , $R_{ij\rho}$, $\Pi_{i\rho}$.

Следует отметить, что для придания робастности планов реконфигурации СЛО в условиях динамически изменяющихся условий 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 (5.22) для оптимистического и пессимистического сценариев развития структурной динамики

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

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

Кроме того переменные

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

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

ражающие потоки на оптимистической и пессимистической траекториях структурной динамики СЛО, должны удовлетворять ограничениям (5.23)-(5.27) 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 $V_{+i\rho} = V_{-i\rho} = Y_{i\rho}, \forall i;$
- интенсивность передачи потоков и интенсивность переработки потоков на интервале планирования структурно-функциональной реконфигурации одинакова для оптимистической и пессимистической траекторий $\omega_{+ij\rho k} = \omega_{-ij\rho k} = \varpi_{ij\rho}, \phi_{+i\rho k} = \phi_{-i\rho k} = \varphi_{i\rho} \forall i, j, \rho, k;$

► технические возможности хранения, передачи и обработки потока ограничены заданными величинами $Y_{i\rho} \leq Y_{i\rho}^{zad}$, $\varpi_{ij\rho} \leq \varpi_{ij\rho}^{zad}$, $\varphi_{i\rho} \leq \varphi_{i\rho}^{zad} \quad \forall i, j, \rho$.

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

$$\alpha_5 \zeta - \alpha_6 \left(\sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \Lambda_{i\rho} Y_{i\rho} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \Pi_{i\rho} \varphi_{i\rho} (t_f - t_0) + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij\rho} \varpi_{ij\rho} (t_f - t_0) \right) \rightarrow \max \quad (5.31)$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} z_{+i\rho k} - \alpha_4 v_+ \geq \zeta, \quad (5.32)$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-i\rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} z_{-i\rho k} - \alpha_4 v_- \geq \zeta, \quad (5.33)$$

$$\left(\sum_{j \in N_+^+} x_{+ij\rho k} - \sum_{j \in N_+^-} x_{+ji\rho k} \right) + (y_{+i\rho k} - y_{+i\rho(k-1)}) + g_{+i\rho k} + z_{+i\rho k} = I_{+i\rho k}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (5.34)$$

$$\left(\sum_{j \in N_-^+} x_{-ij\rho k} - \sum_{j \in N_-^-} x_{-ji\rho k} \right) + (y_{-i\rho k} - y_{-i\rho(k-1)}) + g_{-i\rho k} + z_{-i\rho k} = I_{-i\rho k}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (5.35)$$

$$v_+ - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^n r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_+} x_{+ij\rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+i\rho k} - v_{+i} = R_{0i}, i \in N, \quad (5.36)$$

$$v_- - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^n r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_-} x_{-ij\rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-i\rho k} - v_{-i} = R_{0i}, i \in N, \quad (5.37)$$

$$y_{+i\rho k} + \eta_{+i\rho k} = Y_{i\rho}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (5.38)$$

$$y_{-i\rho k} + \eta_{-i\rho k} = Y_{i\rho}, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (5.39)$$

$$0 \leq x_{+ij\rho k} \leq \varpi_{ij\rho} \cdot (t_k^+ - t_{k-1}^+), 0 \leq g_{+i\rho k} \leq \varphi_{i\rho} \cdot (t_k^+ - t_{k-1}^+), i, j \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (5.40)$$

$$0 \leq x_{-ij\rho k} \leq \varpi_{ij\rho} \cdot (t_k^- - t_{k-1}^-), 0 \leq g_{-i\rho k} \leq \varphi_{i\rho} \cdot (t_k^- - t_{k-1}^-), i, j \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (5.41)$$

$$y_{+i\rho k} \geq 0, z_{+i\rho k} \geq 0, v_{+i} \geq 0, \eta_{+i\rho k} \geq 0, v_+ \geq 0, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (5.42)$$

$$y_{-i\rho k} \geq 0, z_{-i\rho k} \geq 0, v_{-i} \geq 0, \eta_{-i\rho k} \geq 0, v_- \geq 0, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (5.43)$$

$$0 \leq Y_{i\rho} \leq Y_{i\rho}^{zad}, 0 \leq \varpi_{ij\rho} \leq \varpi_{ij\rho}^{zad}, 0 \leq \varphi_{i\rho} \leq \varphi_{i\rho}^{zad}, i, j \in N, \rho \in P. \quad (5.44)$$

В целевой функции (5.31) коэффициенты важности $\alpha_5, \alpha_6 \geq 0$ ($\alpha_5 + \alpha_6 = 1$) между показателем, отражающим эффективность планов структурно-функциональной реконфигурации, и показателем постоянных расходов на под-

держание функционирования СлО на интервале планирования $T = (t_0, t_f]$, устанавливаются ЛПР с учетом конкретной обстановки применения системы.

В целом задача параметрического синтеза СлО (5.31)-(5.44) представляет собой задачу линейного программирования большой размерности с двусторонними ограничениями, методы и алгоритмы решения которой были рассмотрены в подразделе 5.4.3.

Выводы

Подводя итоги раздела, следует отметить:

1. Проведенный анализ современного состояния исследований задач управления структурной динамикой СЛО в динамически изменяющихся условиях показал, что особую актуальность приобретает постановка и решение различных классов задач планирования структурной динамики СЛО, в том числе и задач планирования и управления процессами хранения, обработки и передачи материальных и/или информационных потоков на перестраиваемой структуре. Предложено решать задачу планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО с использованием моделей планирования операций обработки, приема-передачи и хранения разнотиповых потоков на динамически изменяющейся структуре с участками структурного постоянства.

2. В соответствии с общей содержательной и теоретико-множественной постановкой проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурацией СЛО, представленной в разделе 1, проведена содержательная постановка и с использованием теоретико-множественного подхода формальное описание задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО с целью качественного выполнения операций информационного и/или материального обмена между ФЭ СЛО. Построенная обобщённая модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО относится к классу моделей выбора с многими отношениями предпочтения в условиях неопределенности.

3. В соответствии с содержательной постановкой задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО и используя динамическую интерпретацию процессов выполнения операций информационного и/или материального обмена построена 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 структур-

ную динамику СЛО, и отличается от ранее известных учетом разнотипных информационных и/или материальных потоков, а также многокритериальным описанием альтернативных сценариев структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

4. Предположение о том, что интервал времени структурной реконфигурации СЛО состоит из участков постоянства структуры объекта, позволило разработать способ сведения многокритериальной задачи оптимального управления с разрывными правыми частями к многокритериальной статической модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, представляющей собой многокритериальную задачу линейного программирования большой размерности с двусторонними ограничениями.

5. Проведенный анализ специфических особенностей, свойственных задаче планирования структурно-функциональной реконфигурации на эталонной траектории изменения структурных состояний СЛО в статической постановке, позволил для нахождения планов структурно-функциональной реконфигурации из области Парето использовать стандартную методику скаляризации векторного показателя в виде аддитивной свертки Лагранжа и применить известный алгоритм последовательного улучшения плана с двусторонними ограничениями на переменные.

6. 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.

6 Прикладные результаты комплексного моделирования и многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов

В ходе выполнения диссертационных исследований были предложены методологические и методические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО [41,42,145,152,154]. Подводя итоги проведенным исследованиям проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, были решены задачи трех основных классов:

Задачи класса А – задачи анализа структурной динамики СЛО.

Задачи класса Б – задачи разработки, анализа и многокритериального синтеза планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющихся условиях.

Задачи класса В – вспомогательные задачи.

На рисунке 6.1 представлена структурная схема взаимосвязей компонент методического обеспечения задач указанных классов в процессе решения поставленной в диссертационной работе проблемы.

Проведенные исследования показали, что в рамках предлагаемого агрегативно-декомпозиционного подхода к решению проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, удалось описать и одновременно решить задачи выше приведенных классов [155,160,179,194,196-199,218,276-278,285-288]. Для чего был использован полимодельный комплекс и соответствующие методы решения указанных выше задач, входящие в состав методологических и методических основ решаемой в диссертации проблемы, содержание которых приведено на рисунке 6.2.

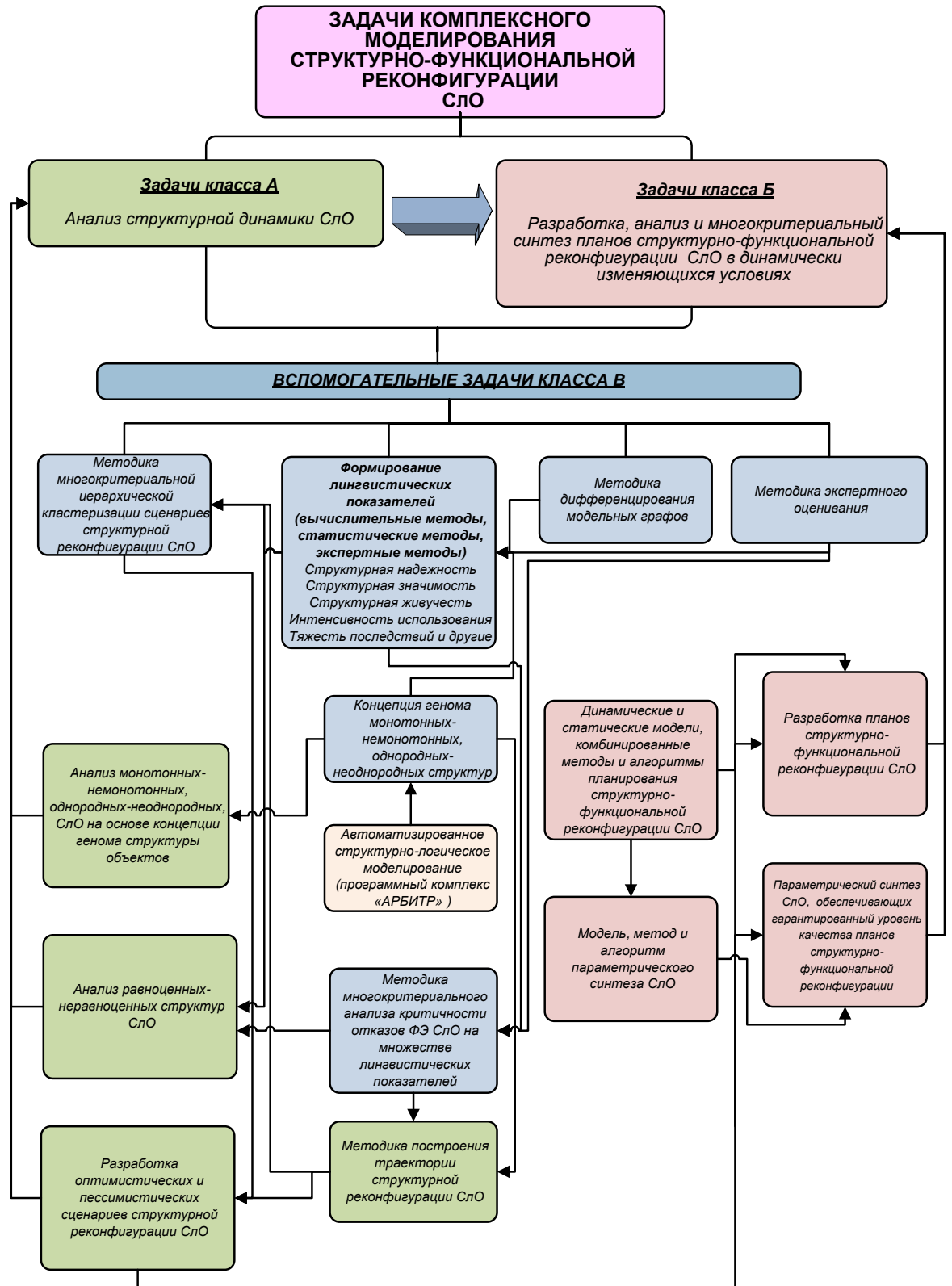


Рисунок 6.1 - Структурная схема взаимосвязей компонент методического обеспечения задач классов А, Б, В

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ СЛО

26

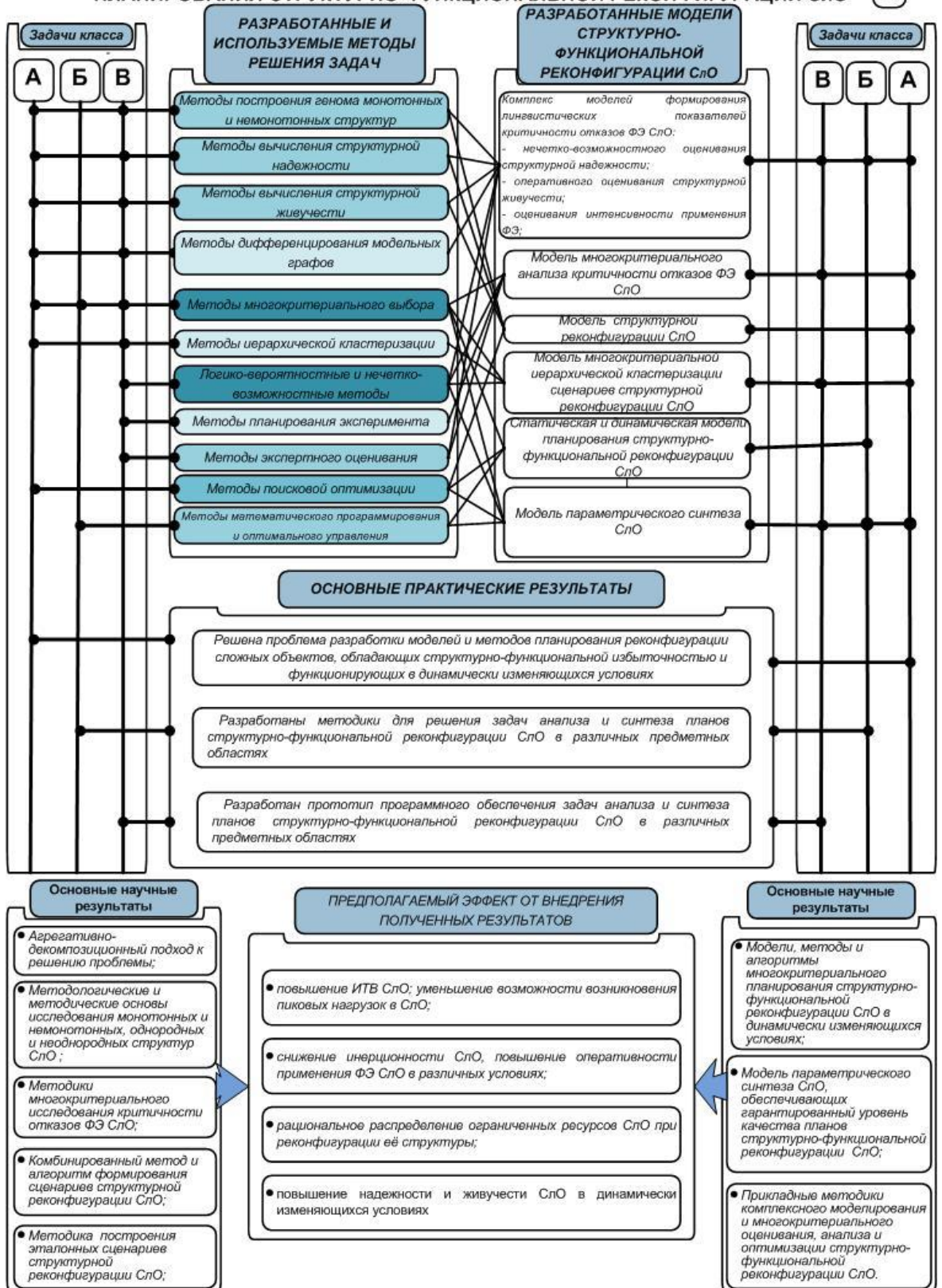


Рисунок 6.2 - Методологические и методические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО

С использованием данных методологических и методических основ удалось решить целый ряд важных практических задач, связанных с моделированием, многокритериальным оцениванием, анализом и выбором структурно-функциональной реконфигурации СлО.

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).

6.1 Методика планирования структурно-функциональной реконфигурации адаптивных цепей поставок

6.1.1 Транспортно-дистрибуционная сеть цепи поставок

Стремительное развитие рынка, ужесточение конкуренции, требование улучшения качества сервиса ставят перед компаниями новые задачи. Чтобы сохранить конкурентоспособность и усилить свои преимущества, современному предприятию необходимо оптимизировать все процессы создания стоимости – от поставки сырья до сервисного обслуживания конечного потребителя (рисунок 6.1.1) [74-76,275].

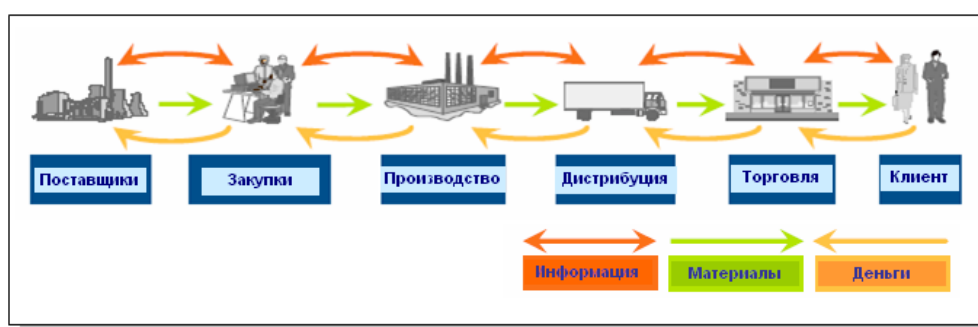


Рисунок 6.1.1 - Принципиальная функционально-информационная схема цепи создания стоимости

Для решения этих задач руководство компаний и обращается к SCM-решениям (Supply Chain Management – управление цепочками поставок).

Под цепью поставок [74-76,275] понимается:

- (с позиции процессного подхода) совокупность потоков и соответствующих им кооперационных и координационных процессов между различными участниками цепи создания стоимости для удовлетворения требований потребителей в товарах и услугах;
- (с позиции объектного подхода) совокупность организаций (предприятий-изготовителей, складов, дистрибуторов, провайдеров, экспедиторов, оптовой и розничной торговли), взаимодействующих в материальных, финансовых и информационных потоках, а также потоках услуг от источников исходного сырья до конечного потребителя.

Цепочка поставок начинается с приобретения сырья у поставщиков и заканчивается продажей готовых товаров и услуг клиенту. Одни звенья могут целиком принадлежать одной организации, другие – фирмам-контрагентам (клиентам, поставщикам и дистрибуторам). Таким образом, в цепочку поставок обычно входят несколько компаний.

Одним из основных отличий адаптивных цепей поставок (A-SCM) от традиционных SCM является создание дополнительного структурно-функционального резерва из различных альтернативных поставщиков для возможности оперативного маневра с целью учета колебаний спроса, заказов технологически новых продуктов, нарушений в процессе выполнения работ в SCM.

Основная цель управления резервами адаптивных A-SCM состоит в сохранении заданного уровня живучести SCM, а само управление резервами представляет комплекс мероприятий, ориентированных на выполнение указанной цели и связанных со сбором, оценкой и анализом информации о состоянии SCM, выявлением неработоспособных элементов, подсистем и связей между ними, включением резервных элементов и подсистем.

Поэтому современной тенденцией понимания эффективности SCM является проектирование таких А-SCM, которые бы характеризовались высоким уровнем экономической эффективности и необходимым уровнем живучести [74-76,275].

При этом можно различать два способа обеспечения живучести SCM, речь о которых шла в разделе 1. В одном из них идет борьба за сохранение работоспособности SCM за счет имеющейся (заранее введенной) структурной избыточности (структурной реконфигурации). Второй способ характерен тем, что, живучесть достигается с помощью гибкого перераспределения выполняемых А-SCM целей, задач и функций между неотказавшими компонентами (структурно-функциональная реконфигурация).

Данные технологии предполагают развитие таких подходов к построению SCM, которые учитывают ее структурную и функциональную распределенность и позволяют наиболее полно использовать реальные и виртуальные ресурсы для сохранения и/или восстановления возможности выполнения возложенных на систему функций при осуществлении неблагоприятных воздействий на ее элементы.

Возможные варианты проектирования адаптивных цепей поставок для различных отраслей представлены на рисунке 6.1.2.

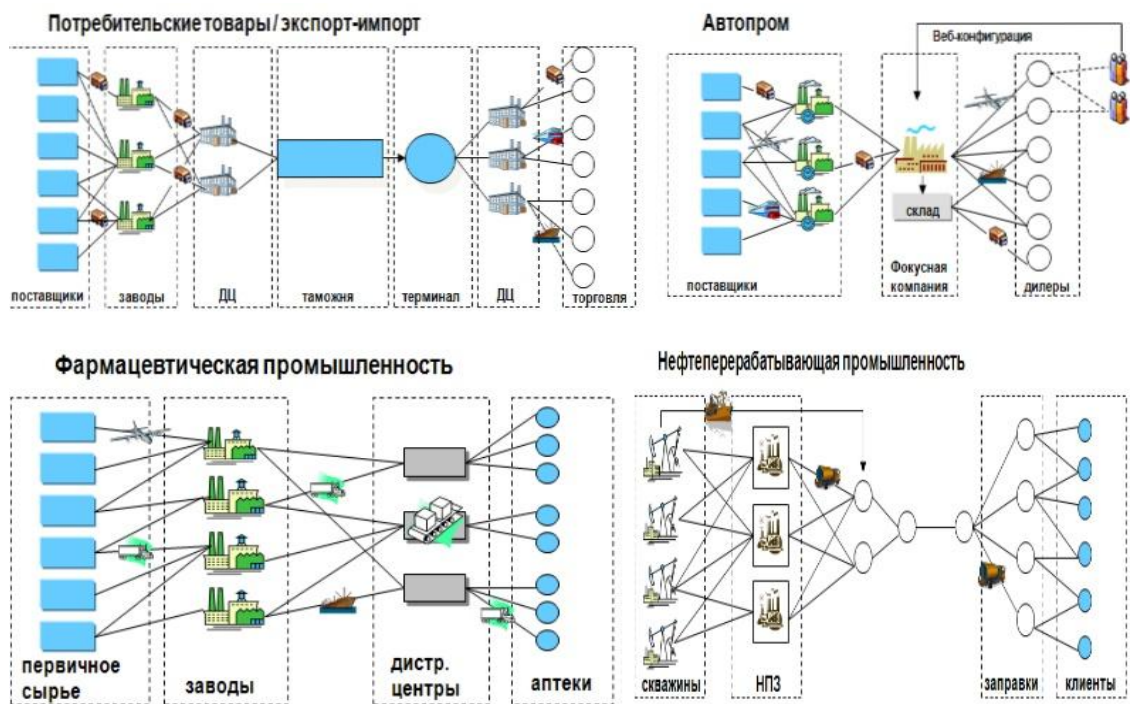


Рисунок 6.1.2 - Варианты адаптивных цепей поставок

Представленное на рисунке 6.1.3 обобщенное описание реализации адаптивных цепей поставок на практике [74-76,275] характерно для многих отраслей. Основная идея здесь состоит в следующем: часть операций в цепи поставок является стабильной, а другая часть формируется на основе выбора из нескольких альтернатив, что позволяет:

- гибко реагировать на индивидуальные требования клиентов к продукции;
- быстро запускать новые продукты на рынок;
- продолжать выполнение работ в цепи поставок даже в случае технологических или информационных сбоях и отклонений;
- сглаживать негативные последствия колебаний спроса.

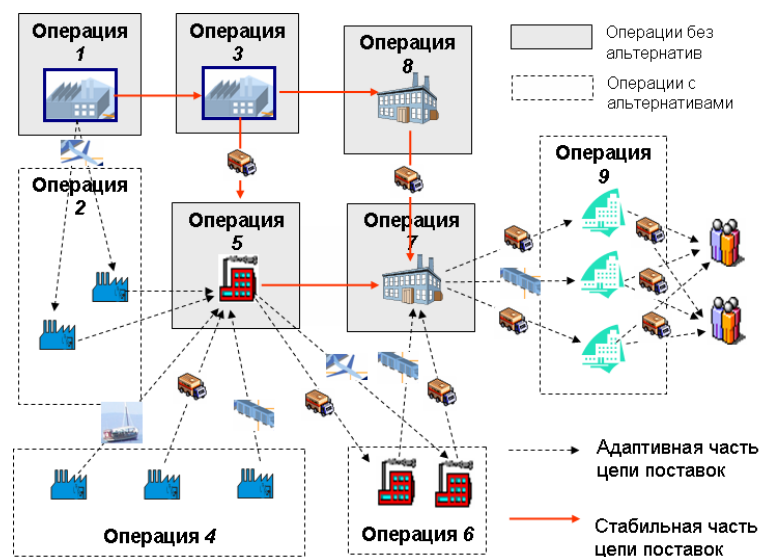


Рисунок 6.1.3 - Обобщенное описание реализации адаптивных цепей поставок на практике

Дистрибуция является существенным звеном общей цепи поставок компании, охватывающей потоки готовой продукции от производственных площадок или складов поставщиков до конечных потребителей. Дистрибуция – это на самом деле ключевой фактор в получении прибыли, поскольку именно на этом этапе формируется компромисс между логистическими затратами и уровнем обслуживания потребителей.

В качестве примера рассмотрим транспортно-дистрибуционную сеть (ДС) SCM (рисунок 6.1.4).

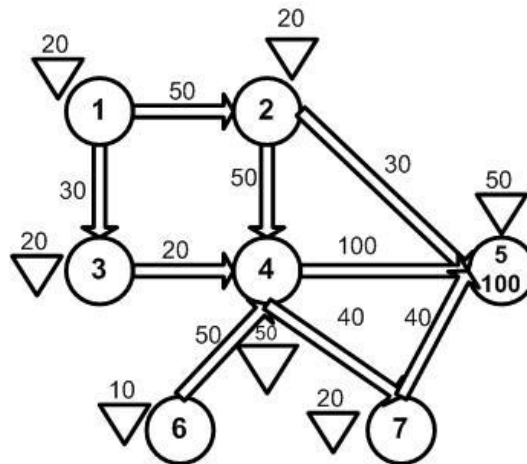


Рисунок 6.1.4 - Дистрибуционная сеть SCM

Поставка товаров осуществляется через узлы 1 и 6. Затем товары проходят обработку в центральном узле распределения 4. Товары из узла 1 проходят предварительную обработку в терминалах 2 и 3. Из центра 4 товар перемещается в региональный центр распределения 5, возможности которого ограничены доведением товара до потребителя в каждый период времени (скажем, месяц) 100 единицами. Для компенсации возможных проблем с каналом поставок $4 \rightarrow 5$, в ДС введен терминал аутсорсинга 7 в качестве альтернативного пути доставки товара в центр распределения 5. Кроме того, возможно переместить небольшие количества (максимально 30 единиц за период) товара непосредственно от терминала 2 до центра 5. Объемы транспортировки товара ограничены в каждый рассматриваемый период снабжения величиной на дугах ДС (рисунок 6.1.4). Узлы ДС имеют ограниченные складские помещения, представленные треугольниками на рисунке 6.1.4. Поставщики обеспечивают определенные количества заказа товара узлам 1 и 6 в каждый периода времени.

При этом будем предполагать, что:

- возможности складских помещений и транспортных каналов могут меняться в каждом периоде;
- возможности областного центра распределения могут меняться в каждом периоде,

- любой узел или дуга в ДС могут быть временно недоступны;
- товары, хранящиеся на складах в предыдущие периоды, могут быть использованы в следующих периодах;
- затраты на закупку товаров постоянны;
- не обработанный и не сохраненный товар отправляется назад на склад, находящийся не в основной ДС, с учетом дополнительных расходов;
- постоянные и переменные расходы на поставку, транспортировку, обработку, возврат не востребованной продукции, складирование являются линейными функциями от количества товара.

С учетом приведенных предположений основная задача состоит в нахождении плана совокупного потока продукции на динамически изменяющейся ДС с периодами постоянства структурного состояния с целью максимизации проданной потребителю продукции и минимизации постоянных и переменных расходов на ее поставку, транспортировку, возврат, хранение на складах. При этом вторичная решаемая задача заключается в анализе и синтезе структуры ДС, для которой возможно обеспечить требуемый уровень робастности планов при деструктивных воздействиях по элементам ДС.

6.1.2 Иллюстрация методики планирования структурно-функциональной реконфигурации дистрибуционной сети цепи поставок

Анализ ДС цепи поставок начнем с построения соответствующей ей технологической структуры, представленной на рисунке 6.1.5.

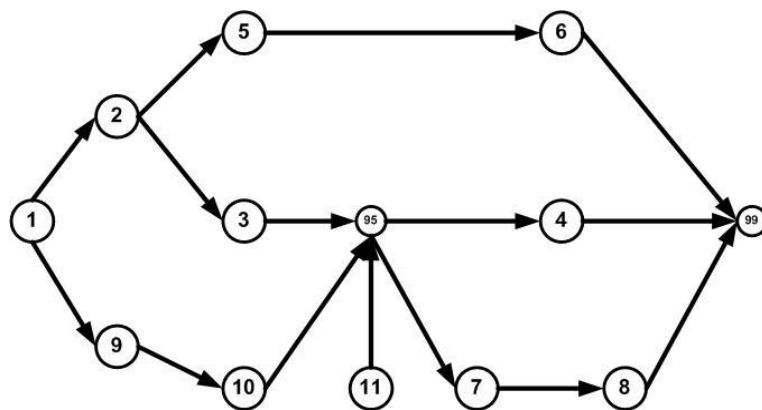


Рисунок 6.1.5 - Технологическая структура дистрибуционной сети SCM

В состав технологической структуры ДС входят различные операции получения, складирования, транспортировки и доставки до потребителя продукции на некотором временном интервале. Указанные технологические операции выполняются в узлах ДС (рисунок 6.1.4).

В результате анализа технологической структуры ДС с использованием методики из раздела 3 можно выделить множество критичных технологических операций, выполняемых в узлах сети.

Рассмотрим несколько наиболее важных критичных технологических операций, выполняемых в узлах ДС:

технологические операции узла 1 – складирование и доставка партий продукции в терминалы 2 и 3;

технологические операции узла 4 – складирование и непосредственная доставка партий продукции из центрального узла в региональный центр распределения;

технологические операции узла 7 – складирование и доставка партий продукции из центрального узла в региональный центр распределения через терминал аутсорсинга 7.

В результате применения методики, изложенной в разделе 4, получим фрагмент сценариев динамики технологической структуры ДС, изображенный на рисунке 6.1.6. $St_{i_1, i_2, \dots, i_k}$ - структурное состояние ДС, где i_1, i_2, \dots, i_k номера узлов ДС, в которых нарушено выполнение критичных технологических операций.

Каждая траектория Sc_x характеризуется набором структурных состояний ДС $\{St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^x\}$, смену которых ДС осуществляет на промежутке времени $T = (t_0, t_f]$ в результате ее реконфигурации. На рисунке 6.1.6 можно выделить оптимистическую ($St_0 \rightarrow St_7 \rightarrow St_{1,7}$) и пессимистическую ($St_0 \rightarrow St_4 \rightarrow St_{1,4}$) траектории структурной реконфигурации ДС.

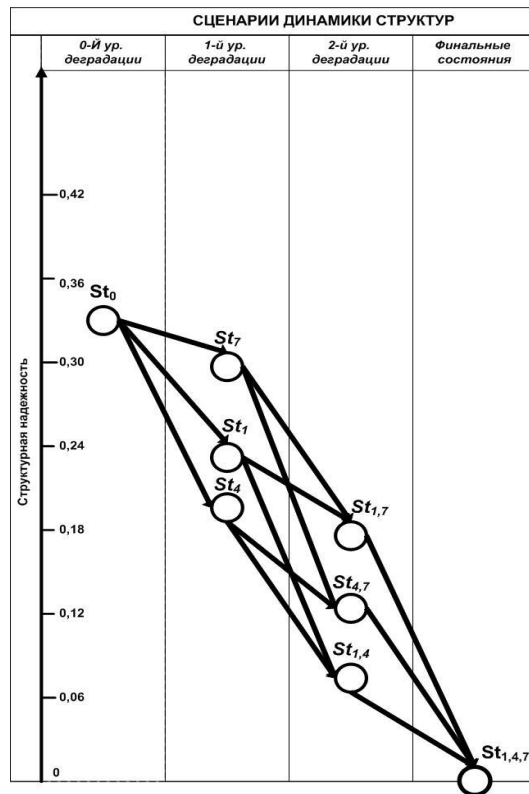


Рисунок 6.1.6 - Сценарии структурной реконфигурации ДС

Проведенный анализ функционирования ДС SCM позволил выявить следующие основные особенности решаемой задачи:

- Отказы выполнения тех или иных технологических операций или в целом узлов ДС возникают под действием различного рода причин (внутренних, внешних, объективных, субъективных и т.п.) и являются событиями возможными, но невероятными, либо вероятность которых мала и не может быть обоснованно оценена в процессе проектирования.
- Промежуточные структурные состояния ДС не изменяются непрерывно, а являются постоянными на некоторых временных интервалах.
- Требуется учитывать и анализировать текущие характеристики выполняемых технологических операций в узлах ДС.
- В зависимости от складывающейся обстановки следует оперативно осуществлять перераспределение выполняемых технологических операций между узлами ДС.
- Особенность задачи оценивания и анализа эффективности функционирования ДС для обоснованного перераспределения технологических операций

ДС между её работоспособными узлами состоит в ее многокритериальной постановке, а также в наличии условий принципиально неустранимых информационных и временных ограничений, связанных с неполнотой, неопределенностью, неточностью и противоречивостью как исходной данных, так и той информации, которая поступает (формируется) в ходе функционирования ДС.

С учетом временных интервалов постоянства структуры, мощности источников материальных потоков, интенсивности передачи и обработки продукции, объемов складских помещений на рисунках 6.1.7, 6.1.8 изображена динамика ДС с конкретными потоковыми характеристиками, соответствующая оптимистической и пессимистической траекториям.

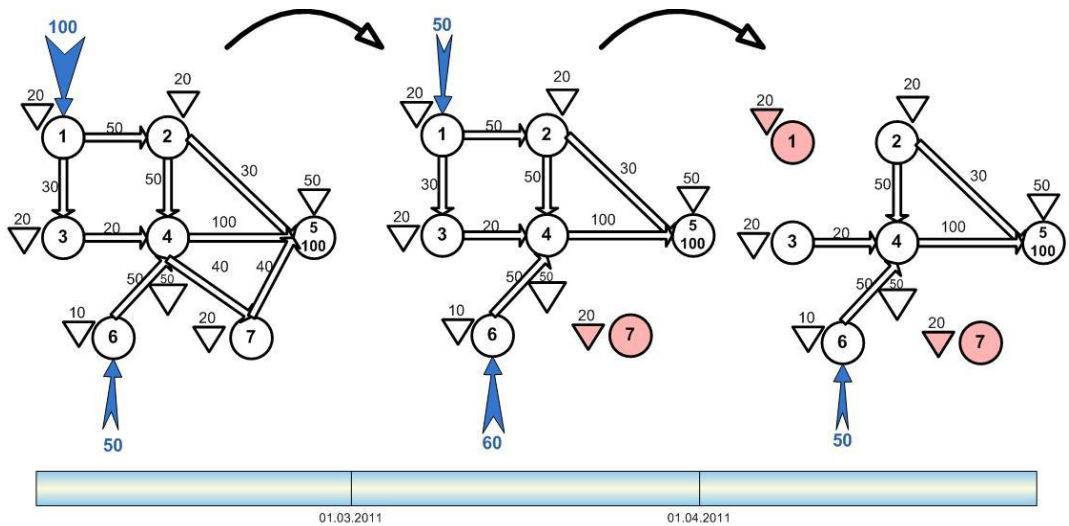


Рисунок 6.1.7 - Оптимистический сценарий реконфигурации ДС SCM

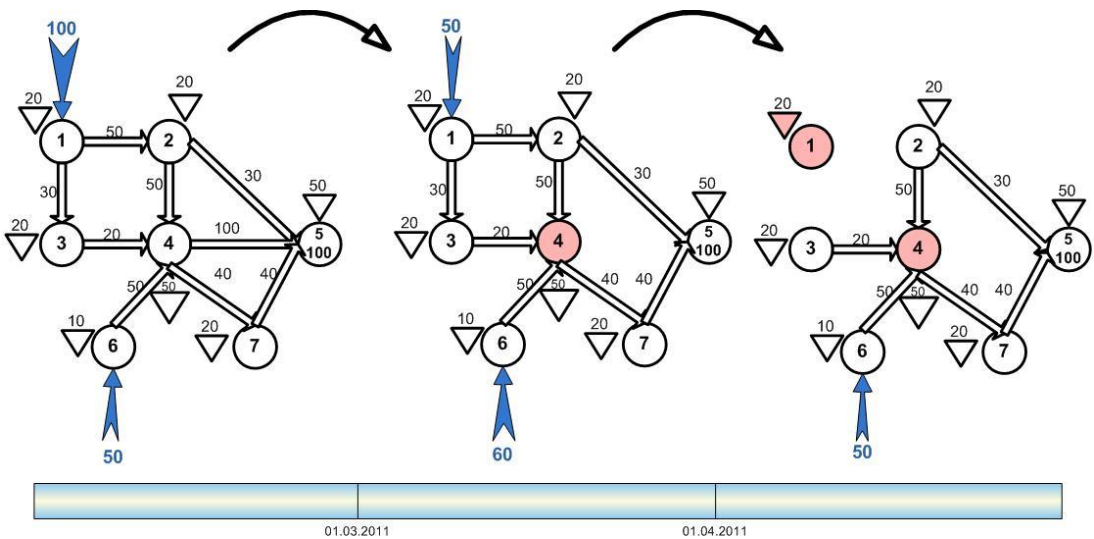


Рисунок 6.1.8 - Пессимистический сценарий реконфигурации ДС SCM

На рисунках 6.1.7, 6.1.8 приняты следующие условные обозначения. Рассматриваются три интервала постоянства структуры. На первом интервале постоянства структур изображена ДС SCM, соответствующая начальному структурному состоянию s_{t_0} . Задача состоит в максимизации доставляемой продукции до потребителя из предположения возможностей провайдера доставлять 300 единиц товара на плановый период трех месяцев (по 100 единиц в каждый месяц), минимизируя расходы, состоящие из хранения, транспортировки, поставки, возврата невостребованной продукции и постоянных затрат.

Переход из одного состояния структурного постоянства в другое осуществляется в соответствии с отказами критических технологических операций. Стрелками (синими) обозначены входные потоки материальных ресурсов на интервалах постоянства структур.

При моделировании структурно-функциональной реконфигурации на оптимистической и пессимистической траекториях структурной реконфигурации SCM будем использовать методику, изложенную в разделе 5, и разработанное модельно-алгоритмическое обеспечение. Интерфейс ввода исходных данных и настройки процесса планирования представлен на рисунке 6.1.9. Результат построения планов структурно-функциональной реконфигурации изображен на рисунке 6.1.10.

Программа для оптимизации обработки данных несколькими узлами [Исходные данные]

Файл | Данные | Ошибка

Общие | Узлы | Состояние [Связь между узлами]

Количество узлов: 7

Номер	Объем партии	Обработка данных	Адрес узла
1	20	0	
2	20	0	
3	20	0	
4	100	0	
5	50	500	
6	10	0	
7	20	0	

Задание связей между узлами

Состояние 1

из \ в	1	2	3	4	5	6	7
1	-	50	30	0	0	0	0
2	0	-	0	50	30	0	0
3	0	0	-	20	0	0	0
4	0	0	0	-	100	0	40
5	0	0	0	0	-	0	0
6	0	0	0	50	0	-	0
7	0	0	0	0	40	0	-

Начальные значения (x) данных поступающих в узлы

1	100
2	0
3	0
4	0
5	0
6	50
7	0

Добавить | Удалить | ОК | Отмена

Рисунок 6.1.9 - Интерфейс ввода исходных данных и настроек модели планирования

Статическая модель | Параметры для дин. модели | Динамическая модель

Поступившие данные (x)

Сост\Узел	1	2	3	4	5	6	7
1	100	0	0	0	0	50	0
2	50	0	0	0	0	60	0
3	0	0	0	0	0	50	0

Сохранённые данные (y)

Сост\Узел	1	2	3	4	5	6	7
1	20	0	10	0	0	0	0
2	5	0	5	0	0	10	0
3	0	0	0	0	0	10	0

Потери данных (z)

Сост\Узел	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0

Обработанные данные (q)

Сост\Узел	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	120	0	0
2	0	0	0	0	120	0	0
3	0	0	0	0	60	0	0

Переданные данные

Из \ в	Состояние 1							Состояние 2							Сост			
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7		1	2	3
1	-	50	30	0	0	0	0	1	50	15	0	0	0	0	1	-	5	0
2	0	-	0	30	20	0	0	2	0	-	0	30	20	0	2	0	-	0
3	0	0	-	20	0	0	0	3	0	0	-	20	0	0	3	0	0	-
4	0	0	0	-	80	0	20	4	0	0	0	-	80	0	4	0	0	0
5	0	0	0	0	-	0	0	5	0	0	0	0	-	0	5	0	0	0
6	0	0	0	50	0	-	0	6	0	0	50	0	-	0	6	0	0	0
7	0	0	0	0	20	0	-	7	0	0	0	0	20	0	7	0	0	0

Фиктивные узлы:

Рисунок 6.1.10 - Результат построения планов структурно-функциональной реконфигурации

Определение плана структурно-функциональной реконфигурации осуществлялось с учетом следующих трех критериев:

- первым критерием оптимальности плана выбирается максимизация количества обработанной и доведенной до потребителя продукции (J_1);
- второй по значимости критерий – минимизация количества продукции, подлежащей возврату (J_2);
- третий менее значимый критерий – максимизации сохраненных товаров в складских помещениях (J_3).

На рисунках 6.1.11, 6.1.12 представлены результаты решения задачи структурно-функциональной реконфигурации соответственно для оптимистической и пессимистической траекторий структурной реконфигурации ДС SCM.

На рисунках 6.1.11, 6.1.12 желтые треугольники обозначают фактическое использование складских помещений узлов ДС, а синие прямоугольники – фактический объем транспортируемого товара по ДС. В представленной ниже табли-

це 6.1.1 приведены результаты планирования по различным частным показателям эффективности.

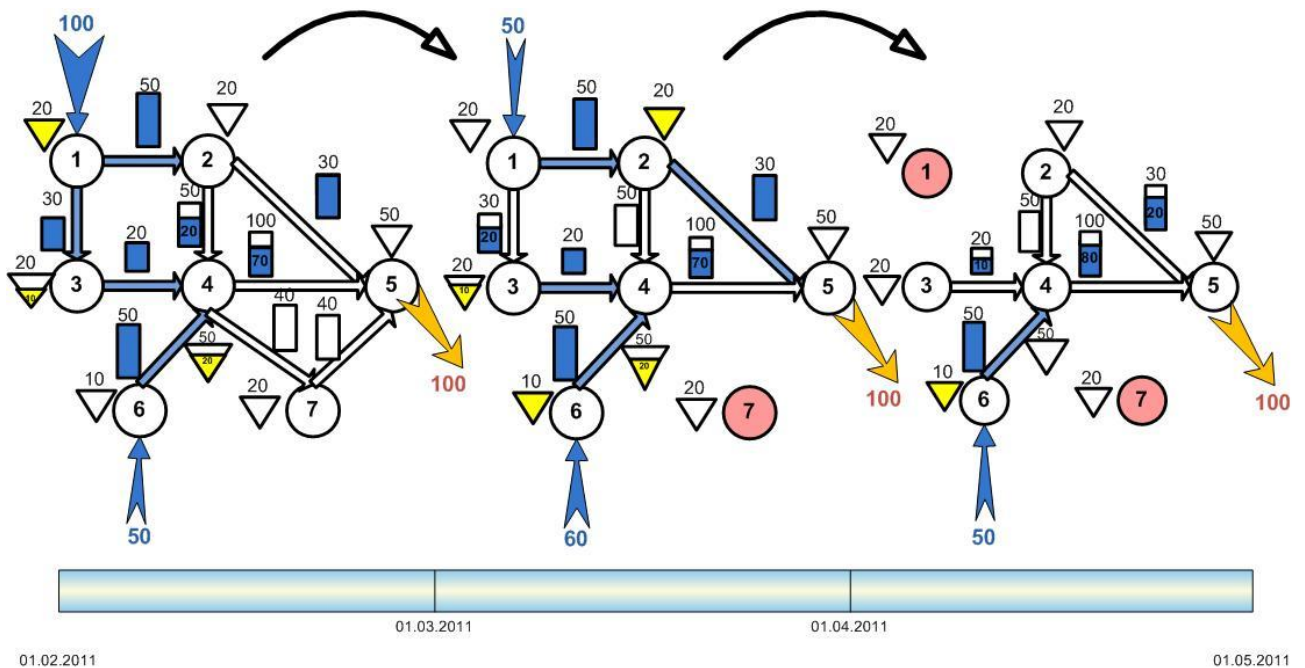


Рисунок 6.1.11 - Результат построения плана структурно-функциональной реконфигурации для оптимистической траектории

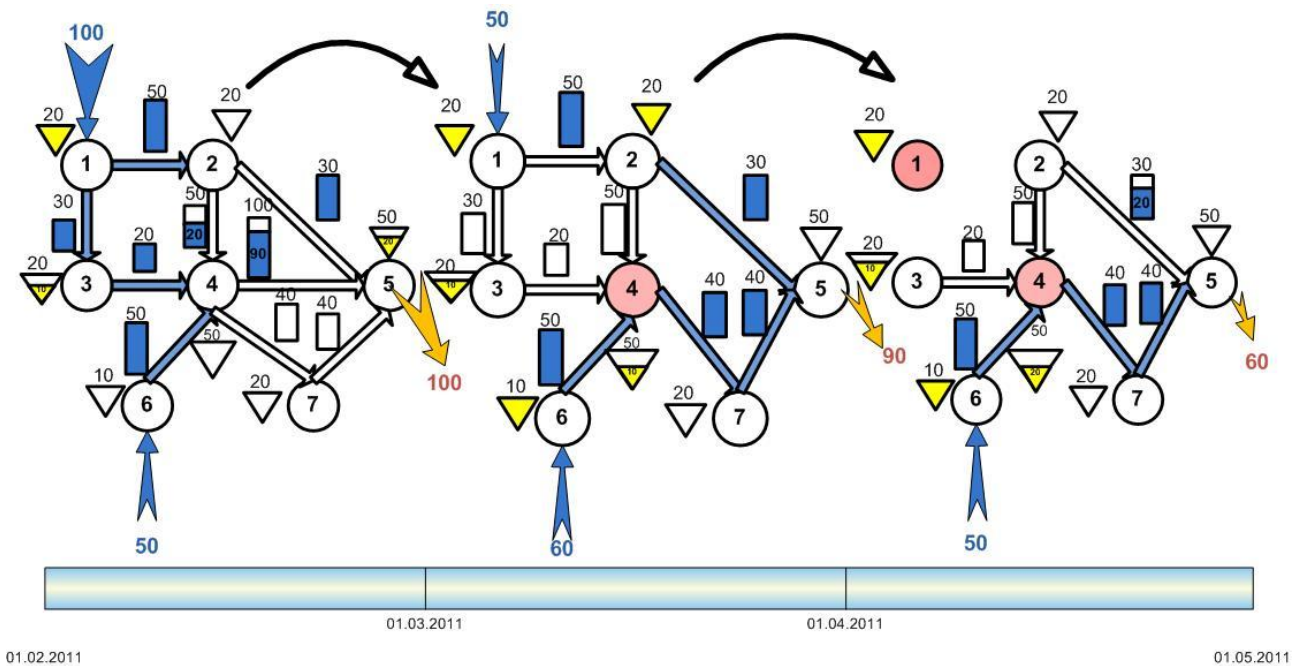


Рисунок 6.1.12 - Результат построения плана структурно-функциональной реконфигурации для пессимистической траектории

Таблица 6.1.1 - Результаты планирования.

Частные показатели	Оптимистическая траектория	Пессимистическая траектория
Объем доставляемого товара	300.0	250.0
Объем возвращенного товара	0.0	0.0
Объем хранящегося на складах товара	120.0	180.0
Транспортные расходы	30.0	25.0
Расходы на хранение товара	8.4	12.6
Расходы на производство товара	124.0	124.0
Общие расходы	252.4	251.6
Общий доход	300.0	250.0
Прибыль	47.6	-1.6

На оптимистической траектории до потребителя доставляется 300 единиц товара, что соответствует 100% удовлетворению его спроса. При этом на складах в разные период времени хранится соответственно 50, 60 и 10 единиц продукции. Общие затраты и расходы рассчитывались при следующих условиях: стоимость перевозки единицы товара равна 0.1; стоимость хранения единицы товара на складе равна 0.07; стоимость производства единицы товара равна 0.4; стоимость возврата единицы не востребованной продукции равна 0.3; постоянные расходы на поддержание ДС равны 90; стоимость продажи единицы товара равна 1. Следует отметить, что при данных условиях прибыль на оптимистической траектории составила 47.6.

Для пессимистического сценария до потребителя доставляется лишь 250 единиц товара, что составляет 83.3% от спроса. Т.е. объем продаж значительно снижается и чистая прибыль становится отрицательной равной -1.6.

6.1.3 Анализ планов структурно-функциональной реконфигурации дистрибуционной сети цепи поставок

Проведем анализ двух альтернативных планов ($\delta_{opt}, \delta_{pess}$) структурно-функциональной реконфигурации ДС цепи поставок (оптимистический и пессимистический сценарии) относительно следующих вариантов возмущающих воздействий:

- **вариант 1** - снижение объемов перевозимой продукции через терминал аутсорсинга 7 ($4 \rightarrow 7 \rightarrow 5$ на рисунках 6.1.7, 6.1.8);
- **вариант 2** – уменьшение объема складского помещения в центральном узле 4 (рисунки 6.1.7, 6.1.8);
- **вариант 3** – снижение объемов перевозимой продукции из центрального узла в региональный узел распределения ($4 \rightarrow 5$ на рисунках 6.1.7, 6.1.8);
- **вариант 4** – совокупное влияние этих трех возмущений.

Прокомментируем результаты проведенных исследований.

Оптимистический сценарий. План структурно-функциональной реконфигурации δ_{opt} оказался устойчив к возмущающим воздействиям по варианту 1 и варианту 2. На рисунке 6.1.13 представлены результаты экспериментов, проведенных на оптимистической траектории структурной реконфигурации, при влиянии возмущающих воздействий по варианту 3.

Результаты экспериментов, проведенных на пессимистической траектории структурной реконфигурации, при влиянии возмущающих воздействий по варианту 3 (по аналогии с исследованиями на оптимистической траектории), представлен на рисунке 6.1.14.

На рисунке 6.1.15 представлены результаты экспериментов, проведенных на пессимистической траектории структурной реконфигурации, при влиянии возмущающих воздействий по вариантам 1, 2, 3, 4.

Следует отметить, что при проведении исследований по варианту 4, предполагалось отсутствие складских помещений в центральном узле 4 и перевозок из центрального узла в региональный узел распределения ($4 \rightarrow 5$).

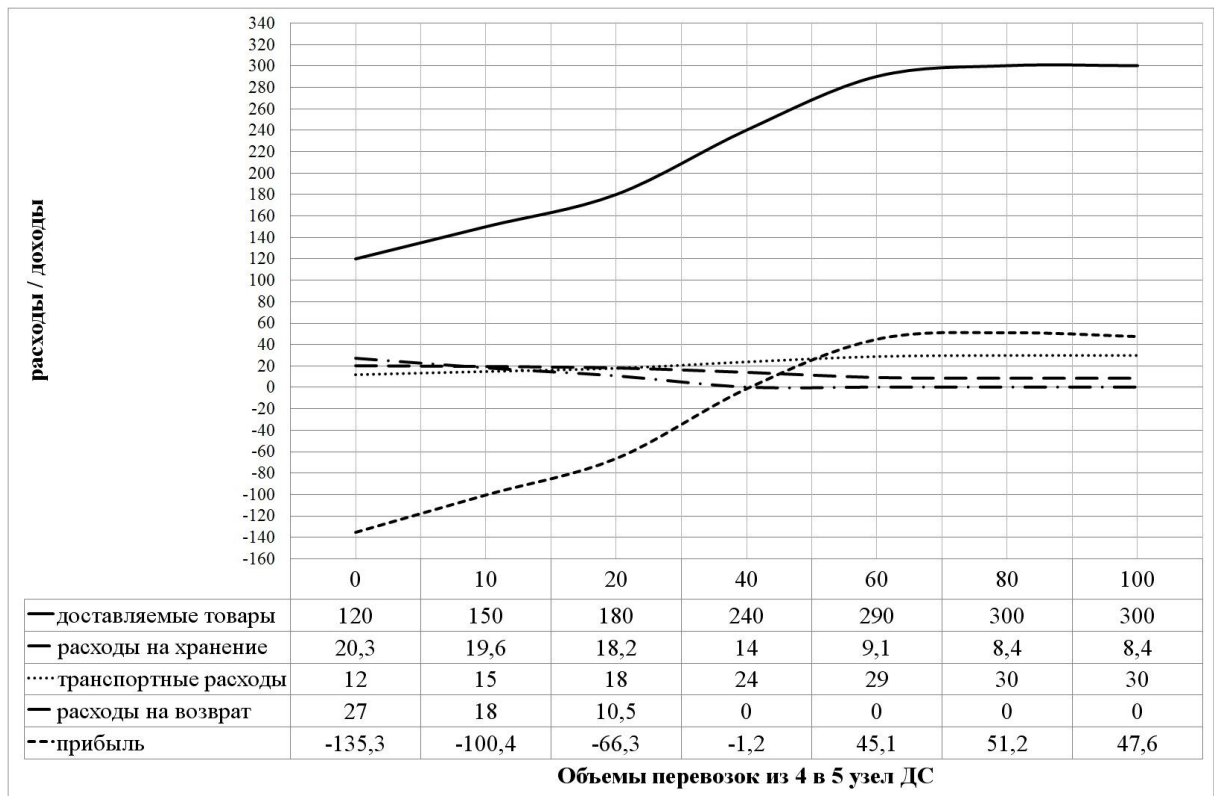


Рисунок 6.1.13 - Результаты экспериментов (оптимистический сценарий, возмущения по варианту 3)

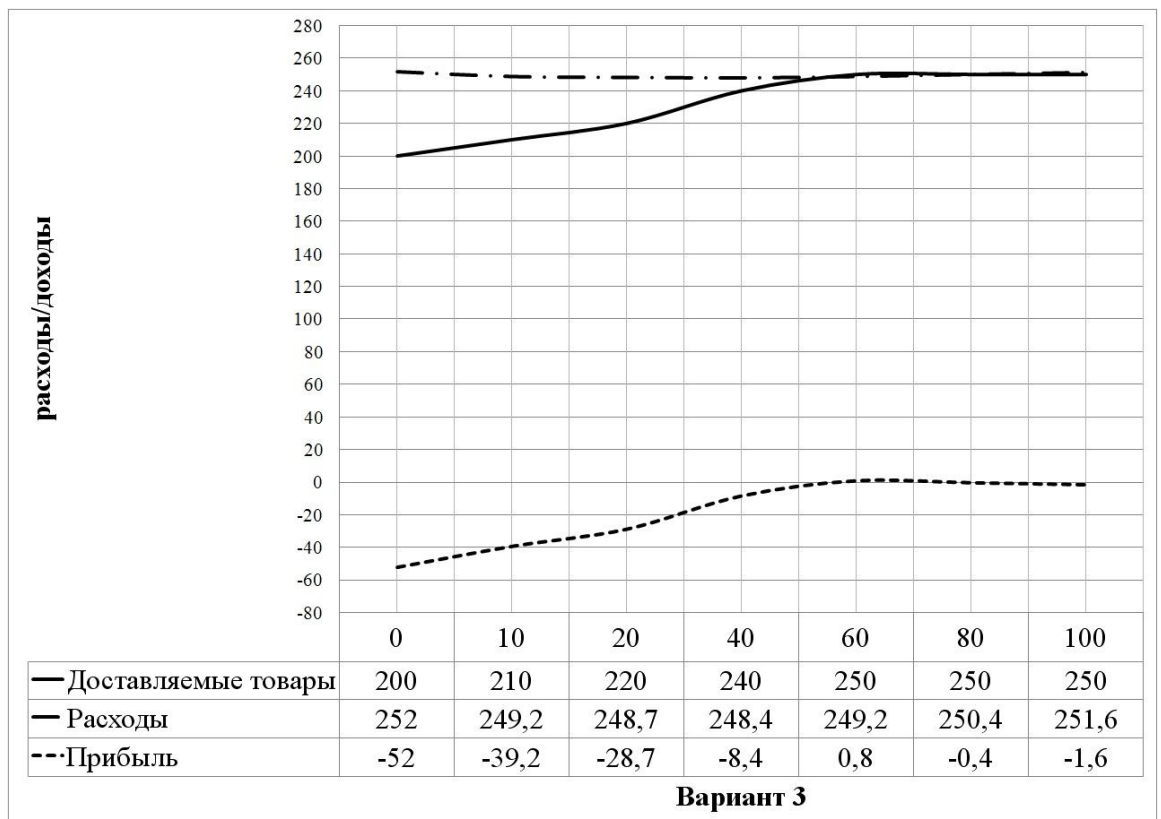


Рисунок 6.1.14 - Результаты экспериментов (пессимистический сценарий, возмущения по варианту 3)

Анализ результатов проведённых экспериментов позволил выявить ряд зависимостей для рассматриваемой задачи с заданными характеристиками ДС SCM:

➤ при снижении интенсивности транспортировки продукции из центрального узла 4 в региональный центр (вариант воздействия 3) не существенно влияет на различные расходы, но значительно влияет на объем доставляемой продукции потребителю при оптимистическом сценарии развития обстановки. Напротив объем поставляемой продукции потребителю при пессимистическом сценарии зависит от данного варианта воздействия лишь в небольшой степени (рисунки 6.1.13, 6.1.14);

➤ воздействие по варианту 1 влияет на объем поставляемой продукции потребителю только при пессимистическом сценарий развития обстановки;

➤ уменьшение складских площадей в узле 4 (вариант 2) не влияет на объем поставляемого товара ни при пессимистическом, ни при оптимистическом сценарии. Это связано с резервом мощности складов на других узлах ДС цепи поставок;

➤ воздействия по варианту 1 и 2 увеличивает объем возврата продукции до 50 и 20 единиц соответственно. Однако их взаимное влияние (вариант 4) увеличивает объем возврата продукции до 100 единиц (рисунок 6.1.15).

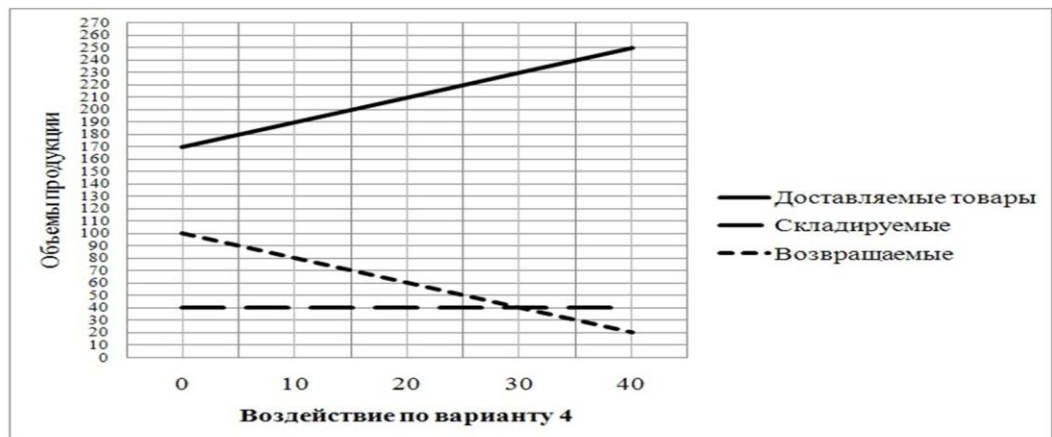
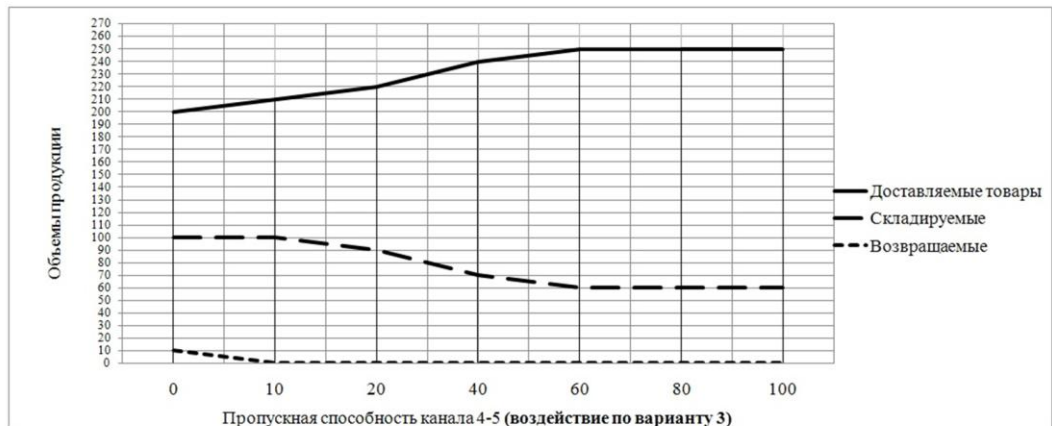
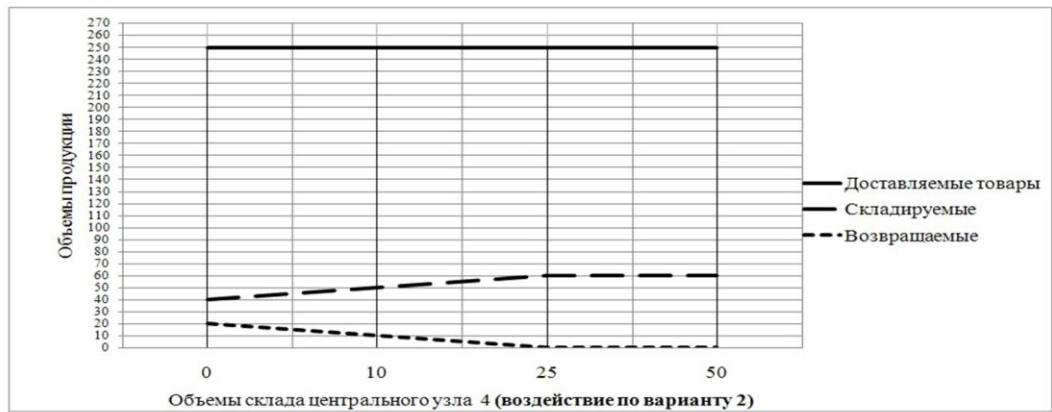
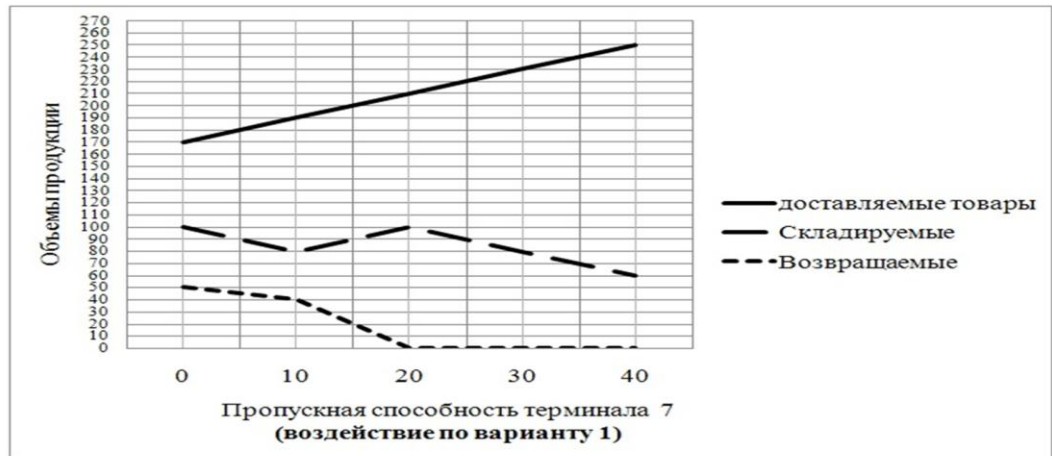


Рисунок 6.1.15 - Результаты экспериментов (пессимистическая траектория, возмущения по варианту 1-4)

6.1.4 Параметрический синтез дистрибуционной сети цепи поставок

Проведя анализ планов структурно-функциональной реконфигурации ДС SCM, представленных на рисунках 6.1.11, 6.1.12, перепроектируем структуру ДС путем уменьшения складских площадей в узлах 2, 3, 5, 7 и снижения интенсивности каналов транспортировки $2 \rightarrow 4$, $4 \rightarrow 5$. Данные действия не повлияют на планы структурно-функциональной реконфигурации при оптимистическом и пессимистическом сценариях развития обстановки. Проект данной сети представлен на рисунке 6.1.16. При этом постоянные затраты уменьшатся на 16 единиц, что соответственно увеличит прибыль.

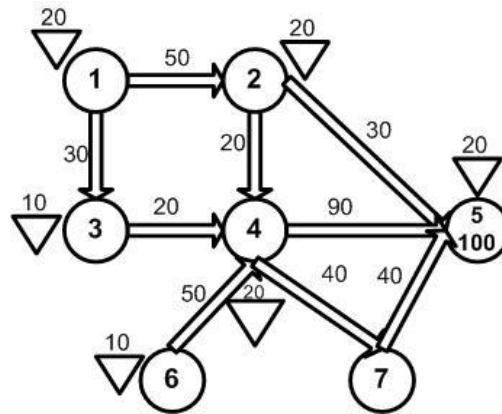


Рисунок 6.1.16 - Вариант 1 проекта ДС SCM

Как при оптимистическом, так и при пессимистическом сценариях планы $\delta_{opt}, \delta_{пес}$ не изменятся. Однако при оптимистическом сценарии прибыль увеличится с 47.6 до 63.6 единиц, а при пессимистическом сценарии - с -1.6 до 15.6 единиц.

Если же перепроектировать ДС SCM как на рисунке 6.1.17, то план δ_{opt} не изменится и постоянные расходы уменьшатся на 33 единицы. Прибыль возрастет с 47.6 до 80.6 единиц.

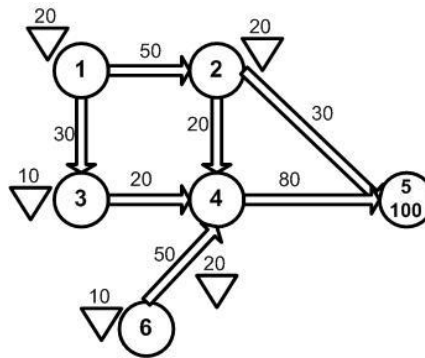


Рисунок 6.1.17 - Вариант 2 проекта ДС SCM

Однако в случае развития обстановки по пессимистическому сценарию объем доставляемой продукции до потребителя уменьшится с 250 единиц до 160, и прибыль снизится с -1.6 до -87.2 единицы.

Далее воспользуемся моделью параметрического синтеза ДС с учетом деструктивных воздействий в рамках оптимистического и пессимистического сценария развития структурной динамики SCM (5.31)-(5.44), изложенной в подразделе 5.4.4. Данная модель позволила спроектировать «идеальную» структуру ДС, изображенной на рисунке 6.1.18.

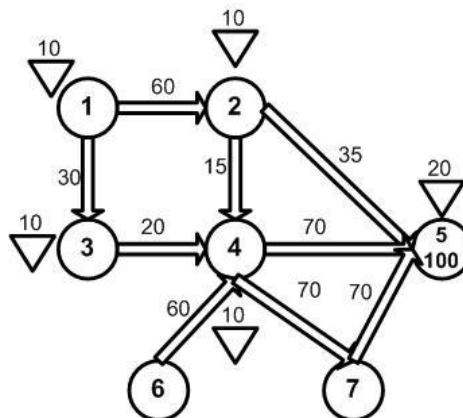
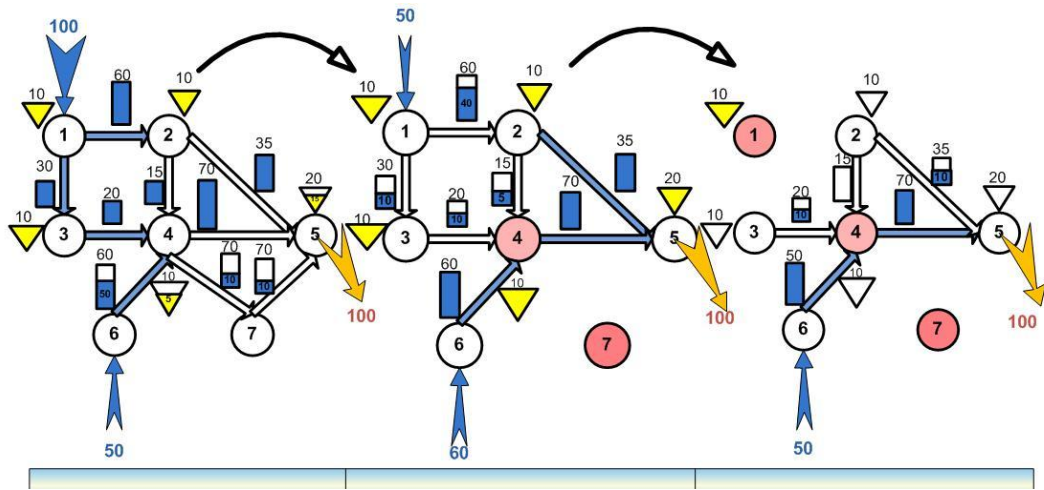
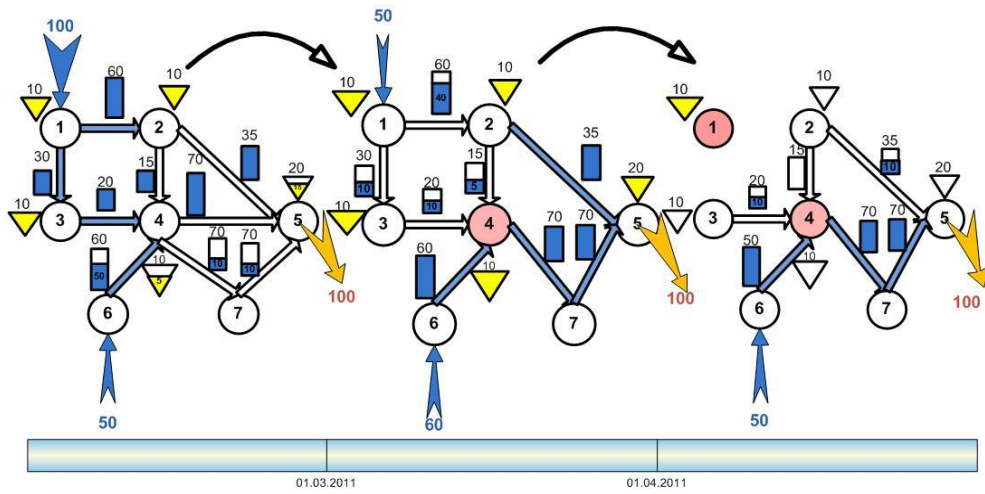


Рисунок 6.1.18 - «Идеальный» проекта ДС SCM

При этом планы структурно-функциональной реконфигурации указанной ДС для оптимистического и пессимистического сценариев структурной динамики SCM, приведены на рисунке 6.1.19.



а) Оптимистический сценарий



б) Пессимистический сценарий

Рисунок 6.1.19 - Планы структурно-функциональной реконфигурации «идеальной» ДС SCM

Результаты планирования обобщенно представлены в таблице 6.1.2.

Таблица 6.1.2 - Результаты планирования на «идеальной» ДС

Сценарий	Доставленный товар	Расходы на						Прибыль
		Хранение	Возврат	Транспортировку	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

Сравнивая результаты планирования на исходной и «идеальной» ДС, приведенные в таблицах 6.1.1 и 6.1.2, можно сделать следующие выводы.

На «идеальной» ДС получена положительная прибыль, как при оптимистическом, так и при пессимистическом сценарии из-за 100%-ого сервисного обслуживания потребителя (300 единиц поставленных товаров), уменьшения постоянных расходов (63 вместо 90) и расходов на хранение продукции (8.4 вместо 8.4 и 12.6 соответственно). При оптимистическом сценарии также уменьшена стоимость транспортировки товаров от 30.0 до 27.8. При пессимистическом сценарии стоимость транспортировки увеличилась от 25.0 до 33.6 главным образом из-за увеличения объема поставленных товаров.

В заключении проведем исследование влияния объемов партий поставок товаров на получаемую прибыль.

Объемы партий поставок можно варьировать различными способами. Например, варьировать объемы поставок на каждом отдельно взятом интервале постоянства, на двух различных интервалах постоянства структуры, на всех трех интервалах постоянства структуры. Причем варьировать можно равномерно или неравномерно. Проведем исследования получаемой прибыли при варьировании объемов поставок равномерно на всех трех интервалах постоянства структуры «идеальной» ДС при пессимистическом сценарии, представленных в таблице 6.1.3.

Таблица 6.1.3. Вариации партий поставок

Суммарная поставка	Интервал 1		Интервал 2		Интервал 3
	Узел 1	Узел 6	Узел 1	Узел 6	Узел 6
310	100	50	50	60	50
300	98	48	48	58	48
290	96	46	46	56	46
280	94	44	44	54	44
270	92	42	42	52	42
260	90	40	40	50	40
250	88	38	38	48	38
240	86	36	36	46	36
230	84	34	34	44	34

Результаты исследований представлены на рисунках 6.1.20, 6.1.21.

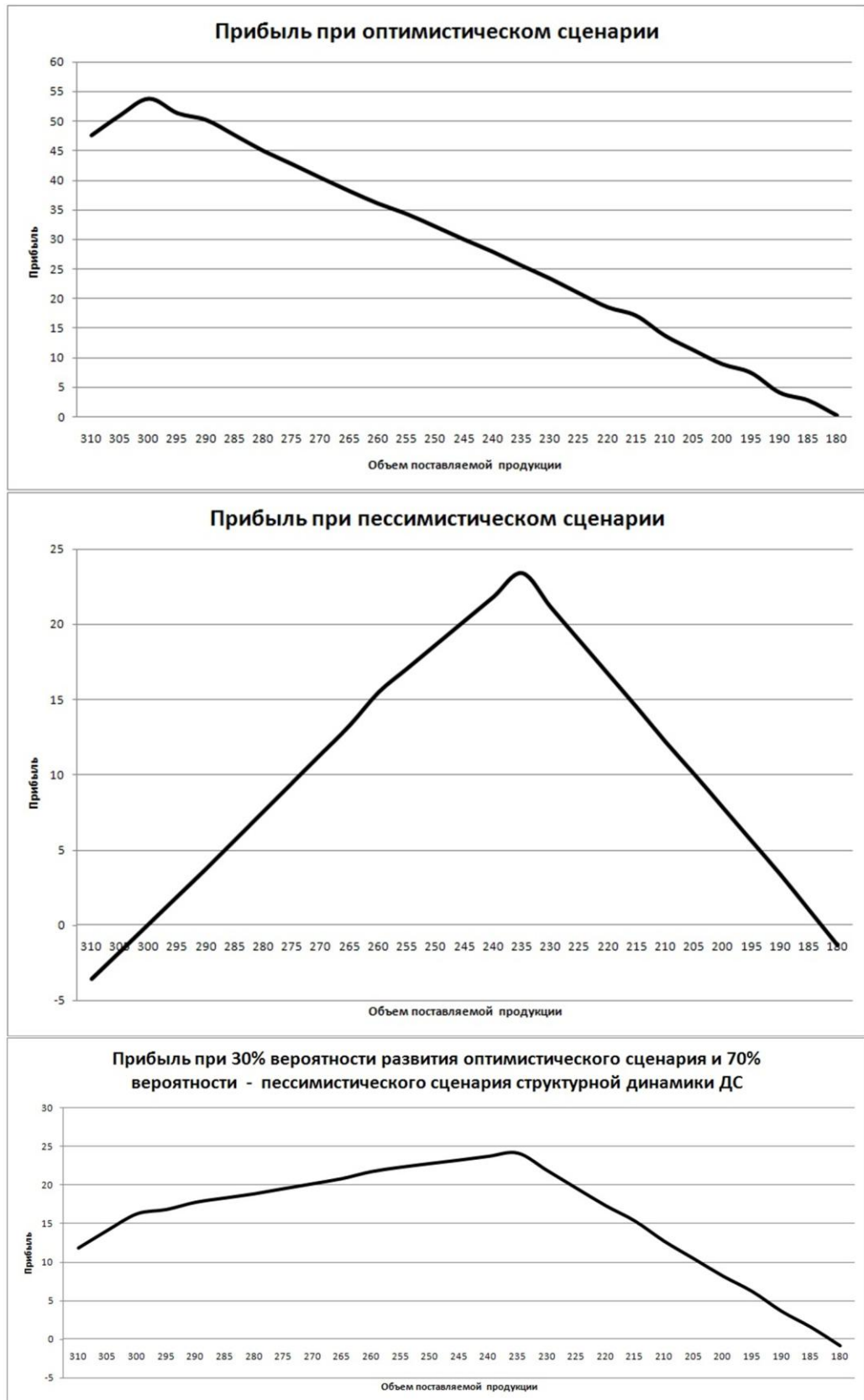


Рисунок 6.1.20 - Анализ объемов поставок продукции

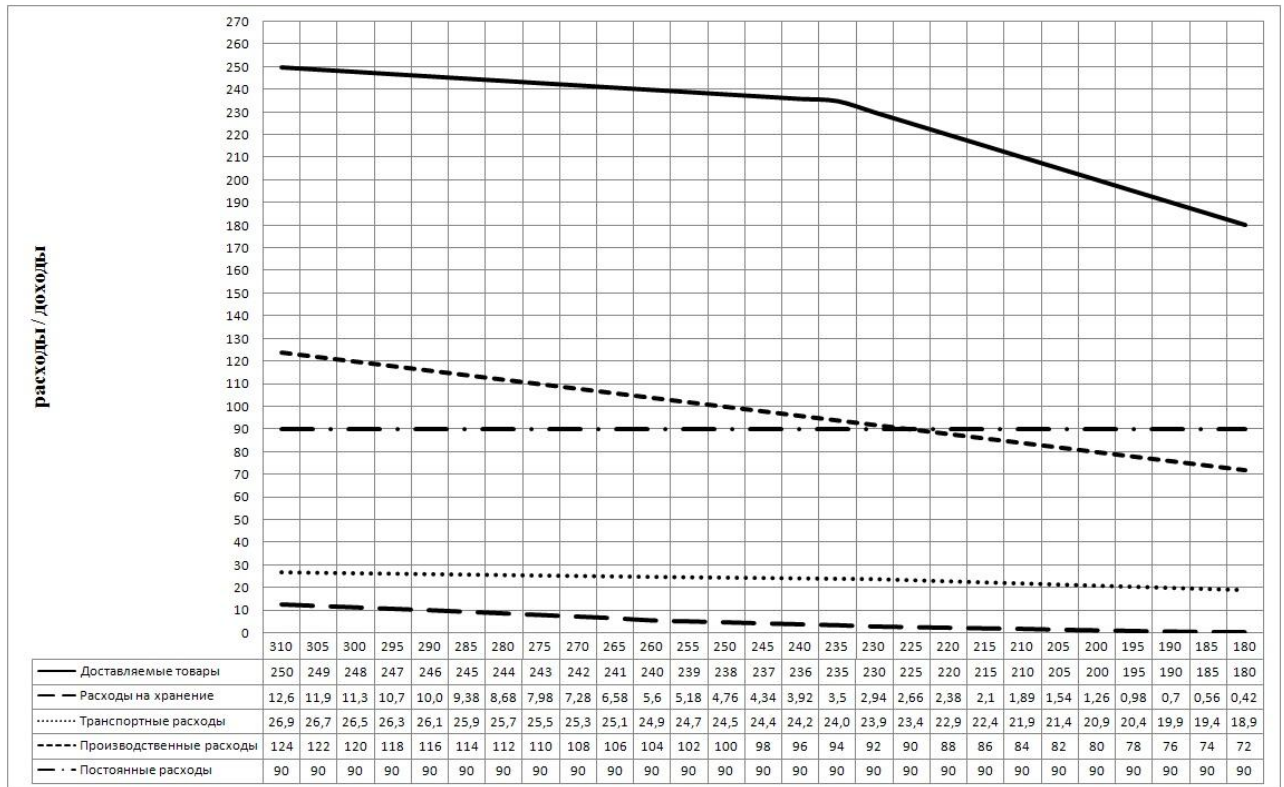


Рисунок 6.1.21 - Результаты экспериментов (пессимистический сценарий, варьирование объемов поставок)

Проведя анализ результатов исследования (рисунки 6.1.20, 6.1.21) можно заметить, что максимальная прибыль при pessimistic сценарии структурной динамики SCM может быть достигнута посредством сокращения объема поставок товаров в следующих соотношениях. На первом интервале постоянства структуры требует сокращение объема поставок в узле 1 на 13%-18%, то есть, 82-87 единиц; в узле 6 на 26%-36%, то есть, 32-37 единиц. На втором интервале рекомендуется уменьшить объемы поставок в узле 1 на 26%-36% , в узле 6 на 24%-30%. На третьем интервале рекомендуется уменьшить объемы поставок в узле 6 на 26%-36%.

6.2 Методика оценивания критичности отказов технических средств командно-измерительного комплекса

В данном подразделе рассмотрим применение методики оценивания критичности отказов (раздел 3) технических средств отдельного командно-

измерительного комплекса (ТСр ОКИК), представляющей собой развитие методов анализа видов, последствий и критичности отказов, позволяющей использовать множество различных количественных и качественных частных показателей критичности.

6.2.1 Анализ особенностей ОКИК как объекта эксплуатации

Одними из основных объектов наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) космическими аппаратами (КА) являются ОКИК, представляющие собой территориально объединённые совокупности ТСр НАКУ, предназначенные для выполнения задач управления КА. В целом ОКИК представляет собой структурно-сложную организационно-техническую систему.

Все элементы и подсистемы ОКИК можно условно разделить на две большие группы. К первой группе относятся средства и системы непрерывного использования (системы и средства энергоснабжения, система связи, системы единого времени и т.д.). Требования к надёжности таких средств и систем очевидны, поскольку определяются режимом постоянного применения данных средств по назначению.

Вторую группу составляют системы и средства, режим использования которых определяется технологическим циклом управления (ТЦУ) КА. Современные тенденции развития космических систем связаны с непрерывным восполнением и наращиванием состава орбитальных группировок КА, возрастанием требований по числу решаемых задач, что приведет к предельной нагрузке ТСр ОКИК операциями по управлению КА различного целевого назначения.

В таких условиях отказы ТСр будут приводить к различным последствиям по степени их влияния как на структурное состояние системы, так и на качество выполнения задач по предназначению. В этой связи возникает необходимость выявления ТСр, имеющих ключевое значение для функционирования ОКИК.

При проведении анализа критичности отказов, как правило, используются стандартные частные показатели критичности (ЧПК), такие как вероятность отка-

за и тяжесть его последствий (раздел 3). Специфика ОКИК состоит в том, что перспективное развитие рассматриваемых комплексов связано с внедрением унифицированных, высоконадежных ТСр, поэтому их сравнение по показателю «вероятность отказа» не является целесообразным.

В этой связи, целесообразно использовать показатели критичности отказов ТСр, учитывающие структурно-топологические и структурно-функциональные особенности ОКИК. В качестве таких показателей могут использоваться предложенные в разделе 3 показатель «Структурной значимости ТСр», позволяющий оценить сложность структурного построения и многоструктурный характер ОКИК, и показатель «Интенсивности применения ТСр», характеризующий интенсивность и равномерность применения ТСр при управлении КА.

6.2.2 Особенности методики многокритериального оценивания критичности отказов ТСр ОКИК

Учитывая достаточно высокую степень сложности разрабатываемой методики оценивания критичности отказов ТСр ОКИК, необходимо декомпозировать решаемую задачу на ряд этапов:

1 этап. Построение интегрального показателя критичности.

Данный этап является начальным, поэтому проведению анализа критичности отказов ТСр ОКИК должно предшествовать проведение системного анализа его функционирования. В результате проведения анализа необходимо во взаимодействии с ЛПР и экспертной группой сформировать множество ТСр ОКИК, функционирование которых влияет на способность конкретного ОКИК выполнять свои задачи по управлению конкретными типами КА.

Кроме того, необходимо произвести формирование множества ЧПК, с использованием которых будет проводиться анализ. Выбор ЧПК является одним из важнейших шагов при проведении многокритериального анализа критичности ТСр ОКИК, поэтому набор частных показателей должен удовлетворять ряду требований (подраздел 3.3.1), делающих его использование оправданным:

- количество ЧПК не должно превышать, как правило, пяти (в некоторых источниках – семи), что обусловлено психофизическими особенностями эксперта-человека;

- ЧПК должны характеризовать различные аспекты функционирования изучаемой системы;

- должна обеспечиваться адекватная оценка физического смысла ЧПК экспертами, а также однозначность понимания этого смысла как экспертами, так и ЛПР;

- ЧПК могут быть любых типов – полученные вычислительным, экспертным путём или путём анализа статистических данных.

Основной операцией начального этапа методики является реализация подходов к построению интегрального показателя критичности (подразделы 3.3.3 – 3.3.5).

2 этап. Вычисление значений ЧПК.

На данном этапе производится вычисление значений ЧПК, множество которых сформировано при реализации 1 этапа настоящей методики. При проведении анализа критичности отказов ТСр ОКИК целесообразно использовать ЧПК «Структурная значимость ТСр» (подраздел 2.2) и «Интенсивность применения ТСр» (подраздел 3.2), а также ЧПК, получаемые экспертными методами.

3 этап. Вычисление значений интегрального показателя критичности.

На данном этапе реализации методики производится вычисление значений интегрального показателя критичности для каждого ТСр ОКИК. При этом используется интегральный показатель критичности, построенный на 1 этапе реализации настоящей методики, а также значения ЧПК, вычисленные на 2 этапе методики. Кроме того, производится ранжирование исследуемых ТСр по интегральному показателю критичности отказов и формирование множества критичных ТСр, значение интегрального показателя критичности которых превышает заданное ЛПР максимально допустимое значение. Данный этап является основным, его реализация в совокупности с реализацией предыдущих этапов методики позволя-

ет выявить именно те ТСр, совершенствование которых необходимо для повышения живучести ОКИК.

4 этап. Заключительный.

На данном этапе производится анализ полученных результатов многокритериального оценивания, а также выработка предложений по совершенствованию выявленных критичных ТСр.

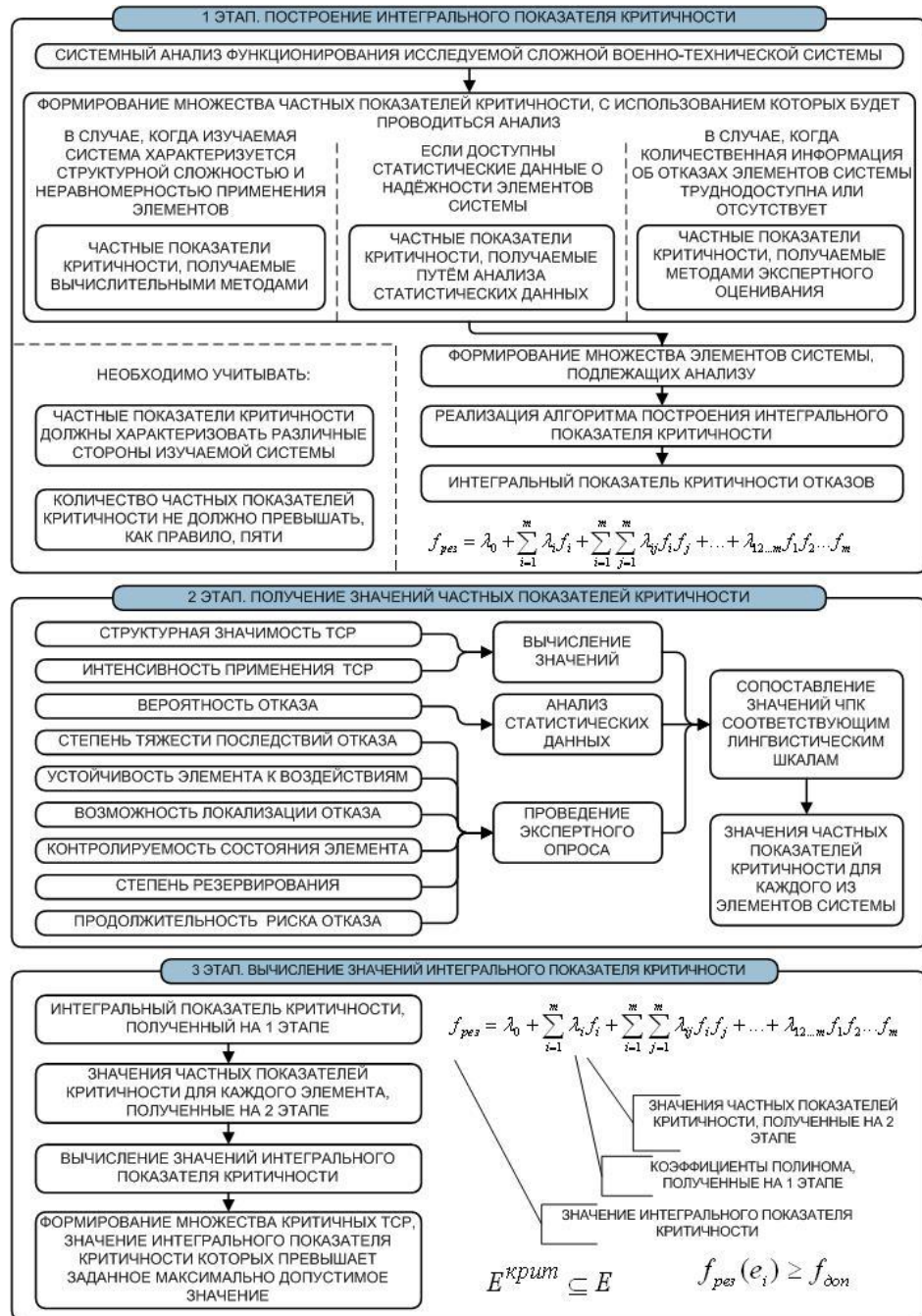


Рисунок 6.2.1 - Методика оценивания критичности отказов ТСр ОКИК

Необходимо отметить, что такие предложения носят, в основном, концептуальный характер и содержат рекомендации по совершенствованию ТСр ОКИК с точки зрения рассматриваемых ЧПК, учитывающих различные аспекты его функционирования. В общем виде методика многокритериального анализа критичности отказов ТСр ОКИК представлена на рисунке 6.2.1.

6.2.3 Результаты анализа критичности отказов ТСр ОКИК

Проведём экспериментальную апробацию разработанной методики и алгоритмов на примере проведения оценивания критичности отказов ТСр некоторого ОКИК, схема размещения объектов которого представлена на рисунке 6.2.2.

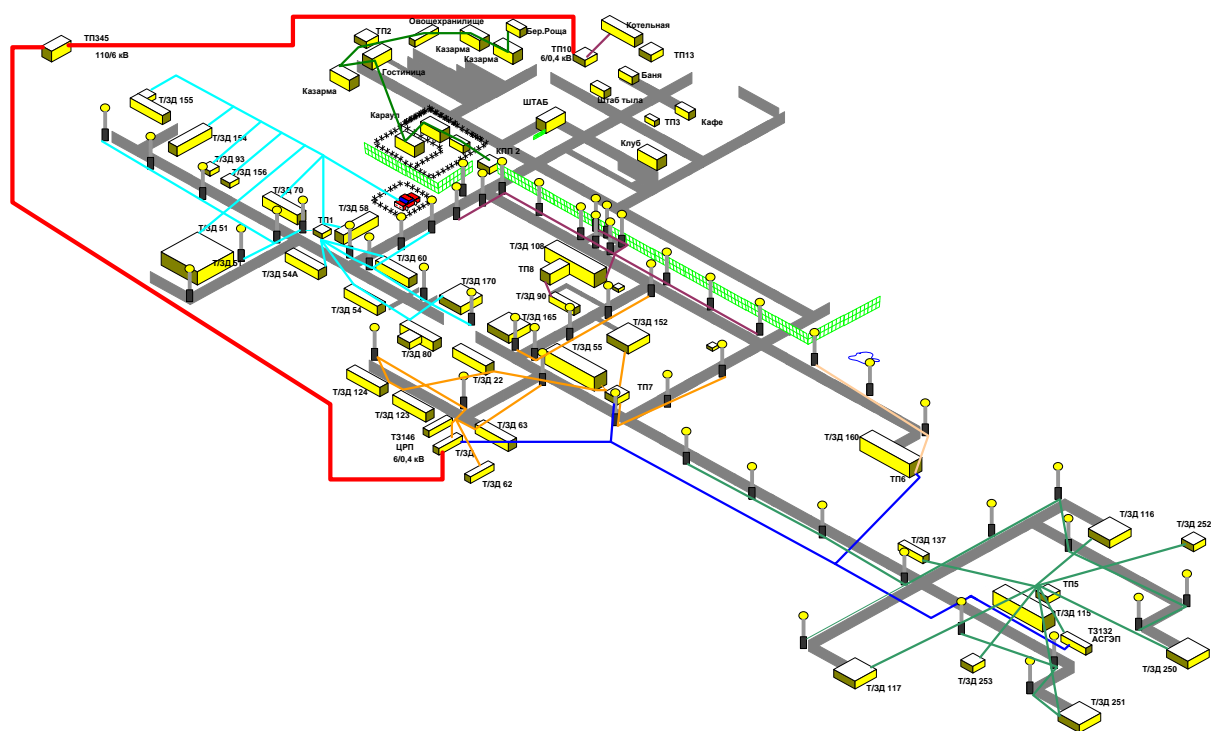


Рисунок 6.2.2 - Схема ТСр ОКИК

Для исследования ТСр были выбраны следующие частные показатели критичности отказов: «Тяжесть последствий отказа ТСр», «Структурная значимость ТСр», «Интенсивность применения ТСр». Лингвистические шкалы, физический смысл и возможные значения каждого используемого ЧПК представлены в таблице 6.2.1.

Таблица 6.2.1 - Лингвистические шкалы частных и интегрального показателя критичности отказов ТСр ОКИК

Показатели	Шкала	Значения термов лингвистической переменной
Интегральный показатель критичности отказа	<ol style="list-style-type: none"> 1. Элемент системы нуждается в первоочередном совершенствовании. 2. Элемент системы обладает критичностью выше среднего, нуждается в совершенствовании. 3. Элемент системы обладает средней критичностью отказа, по возможности необходимо совершенствование. 4. Элемент системы обладает критичностью ниже среднего, нуждается в совершенствовании в последнюю очередь. 5. Элемент системы обладает низкой критичностью отказа и не нуждается в совершенствовании. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая 2. Выше среднего 3. Средняя 4. Ниже среднего 5. Низкая
Тяжесть последствий отказа	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отказ неминуемо приводит к отказу системы и невыполнению задач по предназначению 2. Отказ приводит к существенному ухудшению характеристик системы и может привести к невыполнению задач по предназначению 3. Отказ приводит к ухудшению некоторых характеристик системы 4. Отказ приводит к ухудшению характеристик системы, но не влечёт за собой невыполнение задач по предназначению 5. Отказ приводит к незначительному ухудшению характеристик системы 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая 2. Выше среднего 3. Средняя 4. Ниже среднего 5. Низкая
Структурная значимость ТСр	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отказ элемента структуры приводит к отказу всей структуры 2. Отказ элемента структуры приводит к отказу большого количества элементов структуры 3. Отказ элемента структуры может привести к отказу других элементов структуры 4. Отказ элемента структуры может привести к отказу малого количества элементов структуры 5. Отказ элемента структуры не приводит к отказу других элементов структуры 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая 2. Выше среднего 3. Средняя 4. Ниже среднего 5. Низкая
Интенсивность применения ТСр	<ol style="list-style-type: none"> 1. ТСр применяется во всех сеансах управления 2. ТСр применяется в большинстве сеансов управления 3. ТСр применяется со средней интенсивностью 4. ТСр применяется в некоторых сеансах управления 5. ТСр применяется редко 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая 2. Выше среднего 3. Средняя 4. Ниже среднего 5. Низкая

Структурная значимость ТСр

Любая сложная система может и должна характеризоваться несколькими типами структур (функциональной, технологической, технической, топологической и т.п.). Использование рассмотренной структурной многоаспектности выступает своего рода неформальной декомпозицией (разбиением) системы.

Поэтому при проведении анализа любой сложной организационно-технической системы, в том числе и ОКИК, необходимо проводить исследование всех структур, характеризующих рассматриваемый объект.

Связано это со следующими причинами:

- структура ОКИК, ввиду своей сложности, подразделяется на множество структур подсистем, входящих в его состав;
- все типы таких структур связаны друг с другом определённым образом и находятся в зависимости друг от друга (к примеру, выход из строя структуры энергетической подсистемы неизбежно повлечёт за собой отключение аппаратуры и отказ структуры системы информационно-телеметрического обеспечения);
- структура сложных систем представляет собой множество структур различных подсистем, причём одни и те же элементы и связи обычно являются компонентами различных подсистем;
- на различные типы связей и элементов могут воздействовать различные по своей природе внутренние и внешние факторы, способные выводить из строя определённые типы элементов или связей (например, электромагнитный импульс выведет из строя средства вычислительной техники, но энергетическая подсистема останется невредимой).

Учитывая вышеизложенное, при проведении оценивания критичности отказов ТСр ОКИК предлагается использовать многоструктурный анализ, подразумевающий проведение декомпозиции изучаемой системы на множество структур подсистем, её характеризующих, а также их последующий анализ.

С учётом вышесказанного, возникает задача проведения многоструктурного анализа ОКИК. Примерами таких подсистем ОКИК могут являться:

- подсистема командно-программного обеспечения;

- подсистема информационно-телеметрического обеспечения;
- подсистема баллистико-навигационного обеспечения;
- энергетическая подсистема;
- подсистема частотно-временного обеспечения и т.п..

Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим только техническую структуру системы электропитания (ЭП) и системы единого времени (СЕВ), которые представлены в виде ориентированного графа (рисунок 6.2.3), при этом входным полюсом структуры ЭП будет являться ЦРП и входным полюсом структуры СЕВ является ПП СЕВ (58), а выходными – различные технические средства ОКИК.

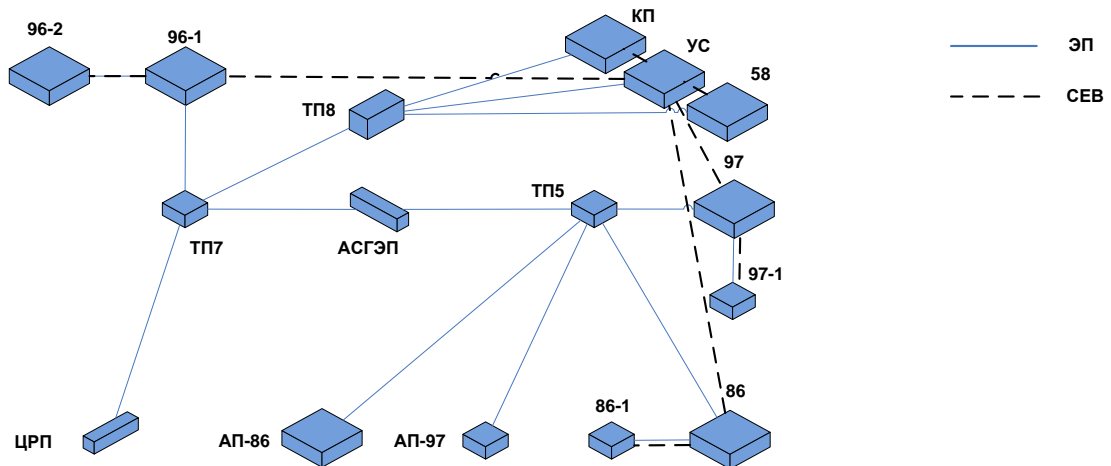


Рисунок 6.2.3 - Техническая структура ЭП и техническая структура СЕВ ОКИК

Рассчитаем геномы для указанных структур, а также вычислим значения вкладов в структурную надежность (раздел 2) для каждого ТСр (таблицы 6.2.2, 6.2.3).

Таблица 6.2.2 - Результаты вычислений для структуры СЕВ

Структурная надежность			
	Неоднородная вероятностная оценка	Однородная вероятностная оценка	Возможностная оценка
	0.197	0.308	0.368
Вклады в структурную надежность			
	Неоднородная вероятностная оценка	Однородная вероятностная оценка	Возможностная оценка
58	0.197	0.213	0.228

УС	0.197	0.213	0.228
КП	0.053	0.026	0.0
96-1	0.018	0.008	0.0
96-2	0.018	0.008	0.0
97	0.018	0.008	0.0
97-1	0.018	0.008	0.0
86	0.018	0.008	0.0
86-1	0.018	0.008	0.0

Таблица 6.2.3 - Результаты вычислений для структуры ЭП

Структурная надежность			
	Неоднородная вероятностная оценка	Однородная вероятностная оценка	Возможностная оценка
	0.167	0.307	0.362
Вклады в структурную надежность			
	Неоднородная вероятностная оценка	Однородная вероятностная оценка	Возможностная оценка
ЦРП	0.167	0.197	0.218
ТП-7	0.167	0.197	0.218
ТП-8	0.064	0.034	0.0
96-1	0.028	0.015	0.0
96-2	0.028	0.015	0.0
АСГЭП	0.023	0.012	0.0
ТП-5	0.023	0.012	0.0
58	0.009	0.003	0.0
УС	0.009	0.003	0.0
КП	0.009	0.003	0.0
АП-97	0.003	0.001	0.0
АП-86	0.003	0.001	0.0
97	0.001	0.0	0.0
97-1	0.001	0.0	0.0
86	0.001	0.0	0.0
86-1	0.001	0.0	0.0

Результаты значений показателя «Структурная значимость ТСр» для структур СЕВ и ЭП приведены в таблицах 6.2.4, 6.2.5.

Таблица 6.2.4 - Структурная значимость ТСр схемы СЕВ

	Оценка структурной значимости			Значения термов лингвистической переменной
	Неоднородная вероятностная оценка	Однородная вероятностная оценка	Возможностная оценка	
58	1	0.69	0.62	Выше среднего/Высокая

УС	1	0.69	0.62	Выше среднего/Высокая
КП	0.27	0.08	0.0	Низкая/Ниже среднего
96-1	0.09	0.03	0.0	Низкая
96-2	0.09	0.03	0.0	Низкая
97	0.09	0.03	0.0	Низкая
97-1	0.09	0.03	0.0	Низкая
86	0.09	0.03	0.0	Низкая
86-1	0.09	0.03	0.0	Низкая

Таблица 6.2.5 - Структурная значимость ТСр схемы ЭП

	Оценка структурной значимости			Значения термов лингвистической переменной
	Неоднородная вероятностная оценка	Однородная вероятностная оценка	Возможностная оценка	
ЦПП	1	0.64	0.60	Выше среднего/Высокая
ТП-7	1	0.64	0.60	Выше среднего/Высокая
ТП-8	0.38	0.11	0.0	Ниже среднего/Средняя
96-1	0.17	0.05	0.0	Низкая/Ниже среднего
96-2	0.17	0.05	0.0	Низкая/Ниже среднего
АСГЭП	0.14	0.04	0.0	Низкая/Ниже среднего
ТП-5	0.14	0.04	0.0	Низкая/Ниже среднего
58	0.05	0.01	0.0	Низкая
УС	0.05	0.01	0.0	Низкая
КП	0.05	0.01	0.0	Низкая
АП-97	0.02	0.003	0.0	Низкая
АП-86	0.02	0.003	0.0	Низкая
97	0.006	0.0	0.0	Низкая
97-1	0.006	0.0	0.0	Низкая
86	0.006	0.0	0.0	Низкая
86-1	0.006	0.0	0.0	Низкая

При вычислении обобщенных значений показателя «Структурная значимость ТСр» следует учитывать значения частных показателей «Структурная значимость» всех рассматриваемых подсистем ОКИК, в нашем примере подсистем ЭП и СЕВ. По результатам экспертного опроса в соответствии с методикой, изложенной в подразделе 3.3.5, определяется обобщенный показатель «Структурная значимость ТСр»

$$F^{Str} = 0,6375 + 0,3375F^{ЭП} + 0,1625F^{СЕВ} - 0,1375F^{ЭП}F^{СЕВ}.$$

Результаты вычислений приведены в таблице 6.2.6.

Таблица 6.2.6 - Структурная значимость ТСр

	Оценка структурной значимости			Значения термов лингвистической переменной
	Неоднородная вероятностная оценка	Однородная вероятностная оценка	Возможностная оценка	
ЦРП	0.950	0.608	0.570	Выше среднего/Высокая
ТП-7	0.950	0.608	0.570	Выше среднего/Высокая
ТП-8	0.361	0.105	0.000	Ниже среднего
96-1	0.207	0.065	0.000	Низкая/Ниже среднего
96-2	0.207	0.065	0.000	Низкая/Ниже среднего
АСГЭП	0.133	0.038	0.000	Низкая/Ниже среднего
ТП-5	0.133	0.038	0.000	Низкая/Ниже среднего
58	0.620	0.420	0.372	Средняя
УС	0.620	0.420	0.372	Средняя
КП	0.202	0.057	0.000	Низкая/Ниже среднего
АП-97	0.019	0.003	0.000	Низкая
АП-86	0.019	0.003	0.000	Низкая
97	0.059	0.018	0.000	Низкая
97-1	0.059	0.018	0.000	Низкая
86	0.059	0.018	0.000	Низкая
86-1	0.059	0.018	0.000	Низкая

Интенсивность применения ТСр

Управление КА осуществляется ТСр ОКИК в соответствии с тем или иным технологическим циклом управления (ТЦУ). Состав, размещение, технические характеристики и загрузка технических средств ОКИК определяют возможность вхождения в связь с КА для проведения технологических операций управления в требуемые интервалы времени. При этом в рамках зоны радиовидимости КА ТСр ОКИК может быть проведён сеанс управления (СУ). В рамках СУ выполняются так называемые сеансные операции управления.

С входом КА в зону радиовидимости ОКИК командно-измерительные системы осуществляют закладку на борт разовых команд и рабочих программ БА, при необходимости проведения коррекции орбиты осуществляют закладку уставок (особых программ для управления движением КА). При этом они получают с борта квитанции об исполнении команд, информацию оперативного контроля, принимают телесигнализацию, измеряют параметры движения КА. Телеметрические

средства принимают телеметрическую информацию о состоянии БА, осуществляют ее регистрацию на магнитные и бумажные носители, предварительную обработку. Средства измерения текущих навигационных параметров ведут радиоконтроль орбиты, предварительную обработку результатов измерений.

Проведение СУ по каждому КА с указанием времени их проведения, перечня задействуемых ТСр, режимов их работы и последовательности выполняемых операций ТЦУ КА, а также способов передачи информации в центр управления полетом осуществляется в соответствии с оперативным планом задействования средств ОКИК. План представляется в виде таблицы по форме, представленной в таблице 6.2.7.

Таблица 6.2.7 - Форма представления плана

Дата: «ДД» ММ. ГГГГ.		ОКИК № __	
№КА	№ витка	ЗРВ	ТСр – режимы работы
007	2165	13.43.12 -13.51.22	84-101,103 63-117 52

К основным режимам работы средств относятся: выдача разовых команд, закладка временных программ, закладка рабочих программ, закладка эфемеридной информации, приём телевизионной информации, съём телеметрической информации, радиоконтроль орбиты и другие [106]. Так, например, интервал выполнения типового ТЦУ космической навигационной системы (КНС) «ГЛОНАСС» равен 8 суткам. Состав типового ТЦУ КНС приведен в таблице 6.2.8.

Таблица 6.2.8 - Состав типового ТЦУ КНС

№ п/п	Наименование операции ТЦУ	Количество и периодичность
1.	Измерения текущих навигационных параметров	50-60 сеансов на интервале 8 суток
2.	Закладка на борт НКА эфемеридной информации	1 раз в сутки
3.	Закладка на борт НКА частотно-временных поправок	2 раза в сутки
4.	Закладка на борт НКА альманаха системы	1 раз на интервале 8 суток
5.	Съём телеметрической информации	2 раза на интервале 8 суток
6.	Сверка бортовой шкалы времени НКА	1 раз на интервале 8 суток

Как видно из таблицы, различные операции ТЦУ для управления конкретным типом КА производятся крайне неравномерно, а значит так же неравномерно применяются различные ТСр в масштабах наземного комплекса управления. Следует отметить, что в каждом сеансе управления де-факто задействуются командный пункт (КП) и узел связи (УС), при передаче командно-программной информации кроме командно-измерительной системы (КИС) используются соответствующие антенные пилоны, в процессе получения и обработки телеметрической информации (ТМИ) кроме собственно КИС будут использоваться радиотелеметрические станции.

При этом каждый сеанс управления можно характеризовать множеством ТСр, непосредственно участвующих в данном сеансе. Согласно подхода, предложенного в подразделе 3.2, каждый сеанс будет представлять собой ребро гиперграфа, соединяющее ТСр. На рисунке 6.2.4 представлен гиперграф фрагмента оперативного плана задействования ТСр ОКИК.

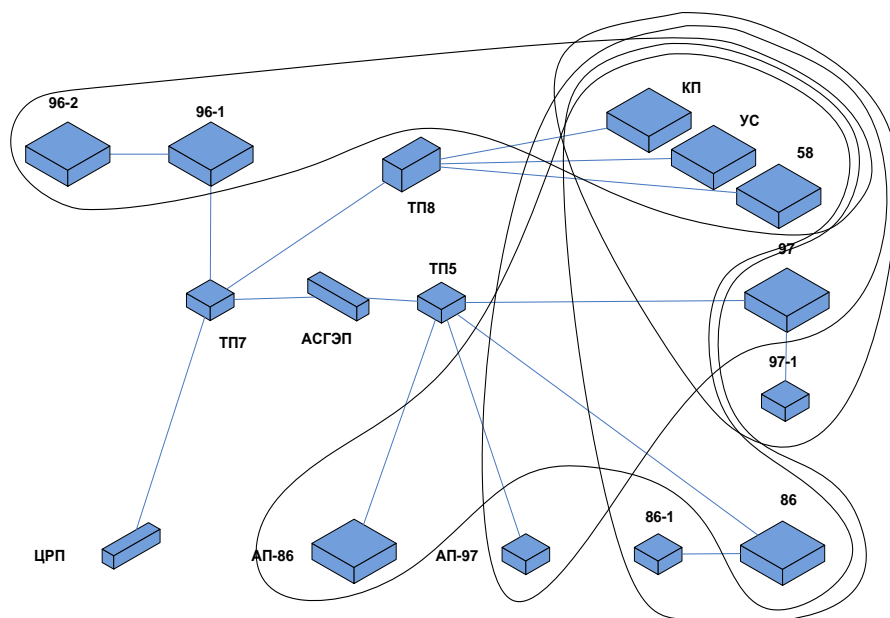


Рисунок 6.2.4 - Гиперграф фрагмента плана применения ТСр ОКИК

Так для плана применения ТСр ОКИК, состоящего из 31 СУ, матрица инцидентий соответствующего гиперграфа имеет следующий вид

$$\frac{\partial G}{\partial S} = \begin{vmatrix} 0 & \infty & \infty & 1,38 & 2,25 & \infty & \infty & 0,44 & 1,38 & 1,38 \\ & 0 & \infty & 1,21 & \infty & 2,5 & 0,4 & \infty & 1,21 & 1,21 \\ & & 0 & 6,75 & \infty & \infty & \infty & \infty & 6,75 & 6,75 \\ & & & 0 & 6,75 & 6,75 & 2,1 & 2,44 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & \infty & \infty & \infty & 6,75 & 6,75 \\ & & & & & 0 & \infty & \infty & 6,75 & 6,75 \\ & & & & & & 0 & \infty & 2,1 & 2,1 \\ & & & & & & & 0 & 2,44 & 2,44 \\ & & & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & 0 \end{vmatrix}$$

Используя результаты дифференцирования модельного графа, на рисунке 6.2.5 представлен граф его производной.

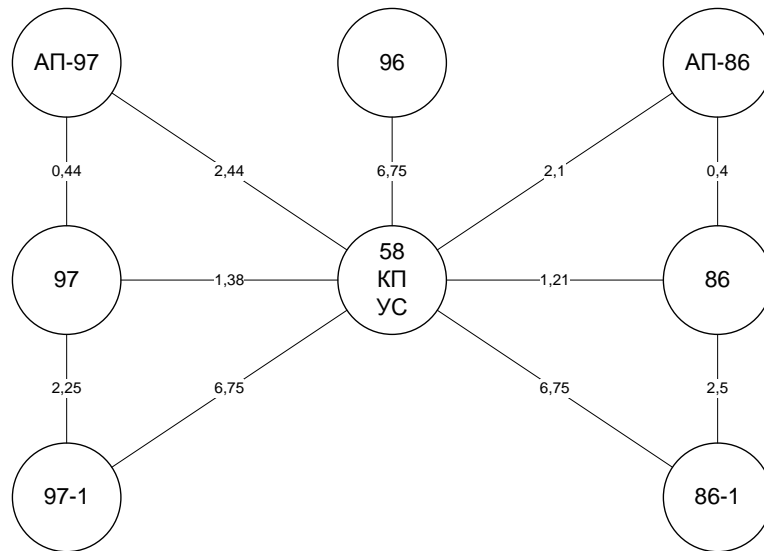


Рисунок 6.2.5 - Производная модельного графа степени взаимного участия ТСр ОКИК при управлении КА

Согласно подходу, изложенному в подразделе 3.2, определим нечеткое отношение $R = |r_{ij}|_{n \times n}$ интенсивности взаимного участия ТСр при управлении КА и вычислим значения структурно-функционального интегрального показателя интенсивности применения ТСр.

	97	86	96	58,КП,УС	97-1	86-1	АП-86	АП-97
97	1,000	0,000	0,000	0,955	0,927	0,000	0,000	0,986
86	0,000	1,000	0,000	0,961	0,000	0,919	0,987	0,000
96	0,000	0,000	1,000	0,782	0,000	0,000	0,000	0,000
58,КП,УС	0,955	0,961	0,782	1,000	0,782	0,782	0,932	0,921
R= 97-1	0,927	0,000	0,000	0,782	1,000	0,000	0,000	0,000
86-1	0,000	0,919	0,000	0,782	0,000	1,000	0,000	0,000
АП-86	0,000	0,987	0,000	0,932	0,000	0,000	1,000	0,000
АП-97	0,986	0,000	0,000	0,921	0,000	0,000	0,000	1,000

Результаты вычисления приведены в таблице 6.2.9.

Таблица 6.2.9 - Интенсивность применения ТСр

	Оценка интенсивности применения	Значения термов лингвистической переменной
ЦРП	0,000	Низкая
ТП-7	0,000	Низкая
ТП-8	0,000	Низкая
96-1	0,223	Ниже среднего
96-2	0,223	Ниже среднего
АСГЭП	0,000	Низкая
ТП-5	0,000	Низкая
58	0,890	Выше среднего/Высокая
УС	0,890	Выше среднего/Высокая
КП	0,890	Выше среднего/Высокая
АП-97	0,363	Ниже среднего/Средняя
АП-86	0,365	Ниже среднего/Средняя
97	0,484	Средняя
97-1	0,339	Ниже среднего/Средняя
86	0,483	Средняя
86-1	0,338	Ниже среднего/Средняя

Тяжесть последствий отказа ТСр

Следующим ЧПК, с использованием которого производится оценивание критичности отказов ТСр ОКИК, является показатель «Тяжесть последствий отказа». Значения данного показателя для каждого ТСр могут быть получены экспертными методами.

В этой связи был проведён экспертный опрос в виде анкетирования. В качестве экспертов выступали специалисты, имеющих опыт непосредственной работы на ТСр управления КА. Компетентность экспертов в данной предметной области подтверждается многолетним опытом работы, поэтому расчёт коэффициентов компетентности и согласованности мнений не проводился. Поэтому после проведения экспертного опроса производилось усреднение полученных лингвистических значений ЧПК.

В результате экспертного опроса с использованием лингвистической шкалы, указанной на рисунке 6.2.6 и в таблице 6.2.10, были получены значения частного показателя критичности «Тяжесть последствий отказа» для ТСр ОКИК (таблица 6.2.11).

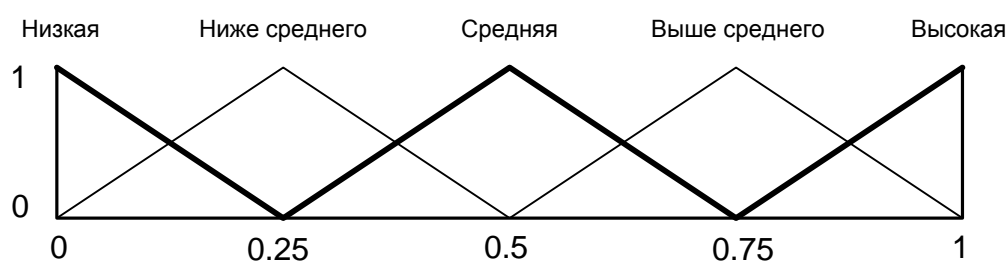


Рисунок 6.2.6 - Лингвистическая шкала оценки значений частного показателя критичности «Тяжесть последствий отказа»

Таблица 6.2.10 - Лингвистическая шкала оценки значений частного показателя критичности «Тяжесть последствий отказа»

Шкала	Значения термов лингвистической переменной
1. Отказ приводит к срыву сеансов управления КА.	1. Высокая
2. Отказ приводит к выполнению сеансов управления КА не в полном объёме.	2. Выше среднего
3. Отказ приводит к нарушениям в работе КА, однако в	3. Средняя

целом сеансы управления КА производятся успешно.	
4. Отказ приводит к ухудшению некоторых характеристик ОКИК, однако не влияет на качество проведения сеансов управления КА.	4. Ниже среднего
5. Отказ не приводит к срыву сеансов управления КА	5. Низкая

Таблица 4.13 – Результаты экспертного опроса относительно значений частного показателя критичности «Тяжесть последствий отказа»

	Значения термов лингвистической переменной
ЦРП	Высокая
ТП-7	Выше среднего
ТП-8	Средняя
96-1	Ниже среднего
96-2	Ниже среднего
АСГЭП	Средняя
ТП-5	Средняя
58	Высокая
УС	Высокая
КП	Высокая
АП-97	Средняя
АП-86	Средняя
97	Выше среднего
97-1	Средняя
86	Выше среднего
86-1	Средняя

Вычисление значений интегрального показателя критичности отказов ТСр ОКИК

Произведём вычисление значений интегрального показателя критичности для каждого ТСр ОКИК.

По результатам экспертного опроса в соответствии с методикой, изложенной в подразделе 3.3.5, определяется интегральный показатель критичности отказов ТСр ОКИК, который для используемого набора частных показателей критичности

(«Структурная значимость», «Интенсивность применения», «Тяжесть последствий отказов») имеет следующий вид:

$$F^{pez} = 0,5438 + 0,0689F^{CTP} + 0,2063F^{ИИТ} + 0,1438F^{ТП} - 0,0188F^{CTP}F^{ИИТ} + \\ + 0,0188F^{CTP}F^{ТП} - 0,0438F^{ИИТ}F^{ТП} - 0,0188F^{CTP}F^{ИИТ}F^{ТП}$$

Результаты вычисления значений интегрального показателя критичности отказов каждого ТСр ОКИК для полученных выше значений частных показателей критичности отказов приведены в таблице 6.2.12 и рисунке 6.2.7.

Таблица 6.2.12 - Результаты вычисления критичности отказов ТСр ОКИК

ТСр	Результаты вычислений критичности отказов		
	<i>Нижняя оценка критичности</i>	<i>Верхняя оценка критичности</i>	Ранжирование ТСр
ЦРП	0,543	0,638	4
ТП-7	0,446	0,527	7
ТП-8	0,250	0,313	14-16
96-1	0,281	0,308	12-13
96-2	0,281	0,308	12-13
АСГЭП	0,250	0,273	14-16
ТП-5	0,250	0,273	14-16
58	0,799	0,828	1-2
УС	0,799	0,828	1-2
КП	0,756	0,780	3
АП-97	0,413	0,416	8-11
АП-86	0,414	0,417	8-11
97	0,531	0,540	5-6
97-1	0,403	0,411	8-11
86	0,530	0,540	5-6
86-1	0,402	0,411	8-11

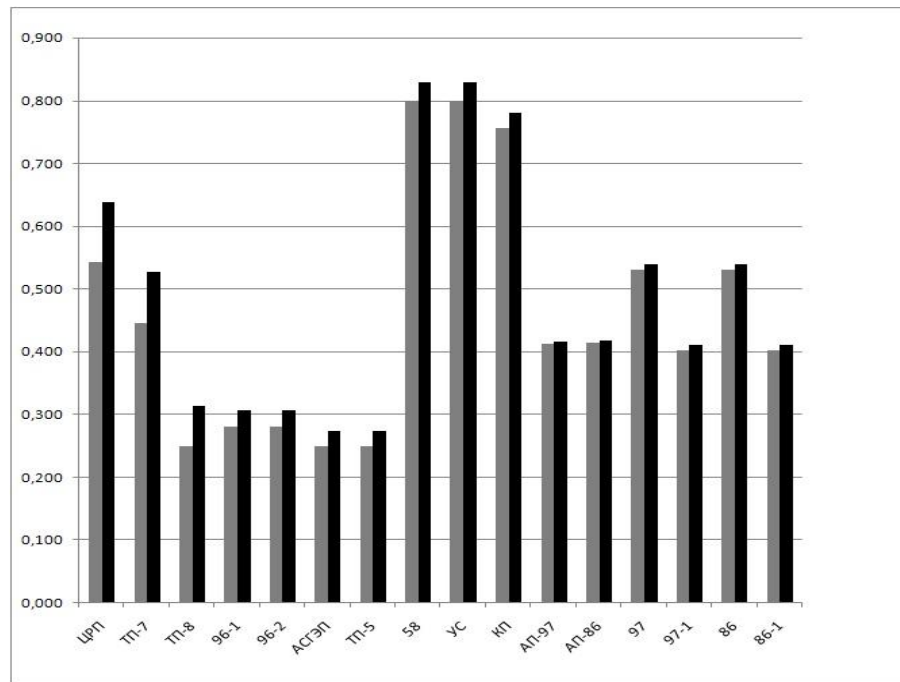


Рисунок 6.2.7 - Нижняя и верхняя оценка критичности отказов ТСр ОКИК

Некоторые предложения по совершенствованию ОКИК

Произведём анализ полученных результатов и обоснование основных направлений совершенствования ОКИК с точки зрения рассматриваемых частных показателей критичности отказов. Выявленные наиболее критичные ТСр относятся к различным системам ОКИК: СЕВ, УС, КП, система электроснабжения, командно-измерительная система.

Среди ТСр ОКИК, обладающих высокой структурной значимостью можно выделить ЦРП и ТП-7 в схеме ЭП, а также 58 и УС в схеме СЕВ. Для снижения значения данного показателя можно рекомендовать операцию структурного резервирования. Причем ввиду большой стоимости современных средств управления КА и отсутствия принципиальной технической возможности дублирования некоторых из указанных средств, целесообразно так же резервировать каналы передачи сигналов системы единого времени, каналы связи и передачи данных, линии электропередач и т.д.

Например, результаты комплексного исследования влияния на структурную надёжность схемы СЕВ операций резервирования как самих ТСр при безотказной

работе каналов передачи данных, так и каналов передачи информации между ними при безотказной работе ТСр приведены на рисунках 6.2.8, 6.2.9.

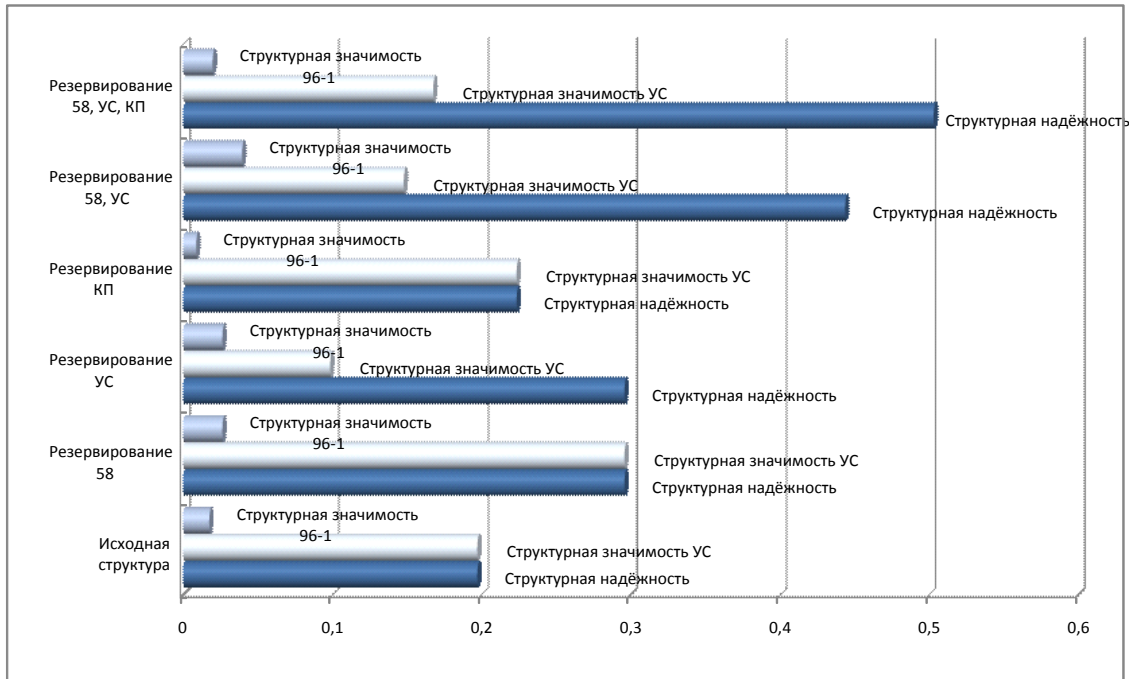


Рисунок 6.2.8 - Исследование влияния операции резервирования ТСр на структурную надёжность схемы СЕВ

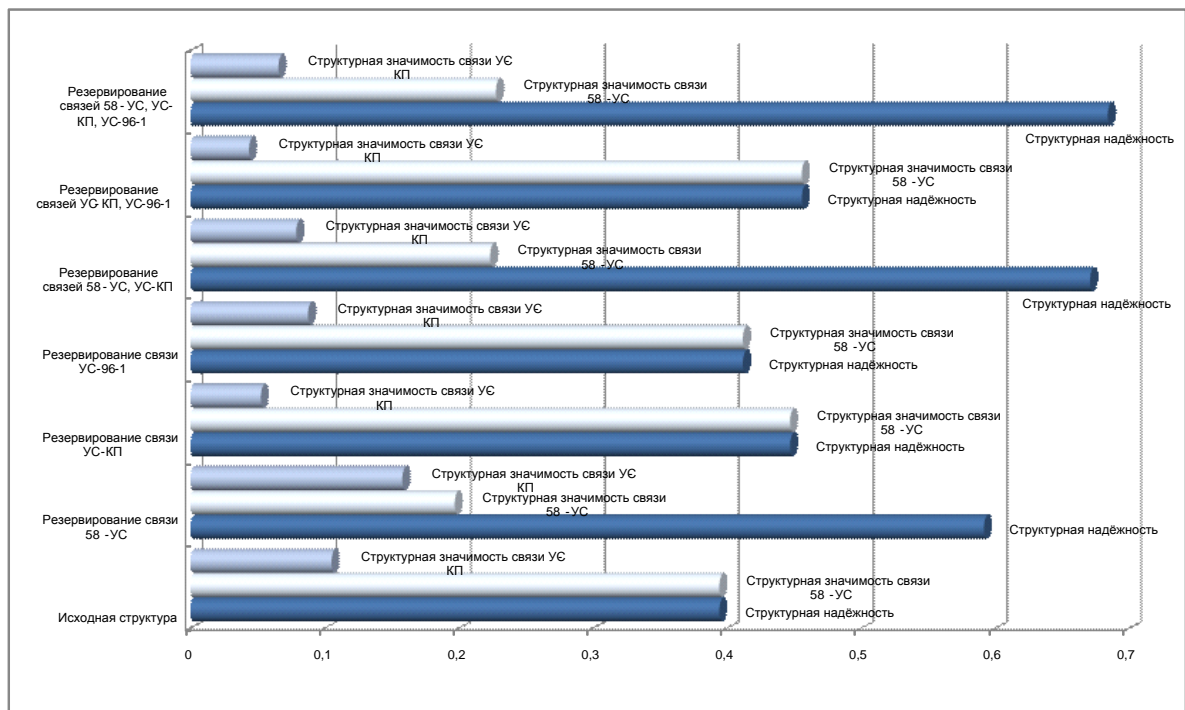


Рисунок 6.2.9 - Исследование влияния операции резервирования каналов передачи информации между ТСр на структурную надёжность схемы СЕВ

Для уменьшения значений частного показателя «Тяжести последствия отказов» необходимо осуществлять профилактику отказов, непрерывный контроль состояния, производить своевременное техническое обслуживание, восстановление и ремонт. Кроме того, большое значения для снижения последствий возможных отказов имеет своевременное обеспечение ТСр ЗИП.

Показатель интенсивности применения ТСр относится к структурно-функциональным показателям и характеризует участие ТСр при выполнении операций ТЦУ КА. В связи с тем, что большинство ТСр наземного комплекса управления КА в настоящее время разрабатываются как унифицированные и обладают функциональной избыточностью, для уменьшения интенсивности применения ТСр и повышения функциональной устойчивости рассматриваемой сложной организационно-технической системы следует ставить и решать задачи планирования применения ТСр в рамках как классической («слепой») реконфигурации, в основе которой лежит функциональное резервирование, так и предлагаемой в работе структурно-функциональной реконфигурации.

6.3 Методика многокритериального оценивания интегральных вкладов элементов и подсистем АСУ КА наблюдения в показатель надежности ее функционирования

6.3.1 Содержательное описание процесса функционирования автоматизированной системы управления космическими аппаратами

Под автоматизированной системой управления космическими аппаратами (АСУ КА) [56,105-107,178,223] понимается совокупность функционально взаимосвязанных по различным каналам связи (радио, радиорелейной, оптической, проводной и пр.) технических средств наземного и бортового (или бортовых) комплексов управления (**НКУ и БКУ**) с соответствующим информационным и математическим обеспечением, предназначенная для обеспечения управления КА в процессе подготовки и решения ими возложенных на них целевых задач.

При этом под **бортовым комплексом управления КА** – понимается совокупность находящихся на борту КА технических средств, объединённых в специализированные системы (подсистемы) управления (например, систему управления бортовой аппаратурой (СУБА), систему управления движением (СУД) и т.п.), а также соответствующего информационного и программного обеспечения, предназначенная для управления функционированием специальных и обеспечивающих бортовых подсистем (бортового оборудования) КА на всех этапах его жизненного цикла.

Для обеспечения процессов автоматизированного управления функционированием КА различного целевого назначения используется специально созданный для этих целей наземный автоматизированный комплекс управления. Под **наземным автоматизированным комплексом управления (НАКУ)** понимается совокупность взаимосвязанных технических средств, информационного, математического и программного обеспечения, сооружений Главного центра (ГЦ) управления и территориально разнесённых отдельных командно-измерительных комплексов (пунктов) ОКИК (КИП), предназначенная для формирования НКУ всех типов КА, входящих в состав орбитальной группировки (ОГ) или орбитальными системами (ОРС) КА различного целевого назначения. В этой связи, обобщённая структура АСУ КА может быть представлена на рисунке 6.3.1, где приняты обозначения: ССПД – средства связи и передачи данных; СЕВ – система единого времени; СЭС – система электроснабжения.

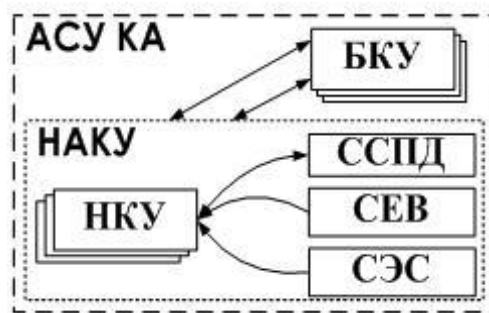


Рисунок 6.3.1 – Обобщённая структура АСУ КА

Для обеспечения управления конкретным типом КА (КА определённого целевого назначения) или конкретной ОГ КА из элементов НАКУ формируются **наземные комплексы управления**.

Наземный комплекс управления – совокупность взаимосвязанных технических средств, информационного, математического и программного обеспечения, сооружений центра управления полётом (ЦУП) с пунктом управления (ПУ), баллистического центра (БЦ), телеметрического центра (ТМЦ) и системы ОКИК (КИП), предназначенная для обеспечения управления ОГ КА определённого целевого назначения с момента выведения их на орбиту. Обобщённая структура НКУ представлена на рисунке 6.3.2, где дополнительно обозначены потоки баллистико-навигационной информации (БНИ), командно-программной информации (КПИ) и телеметрической информации (ТМИ).

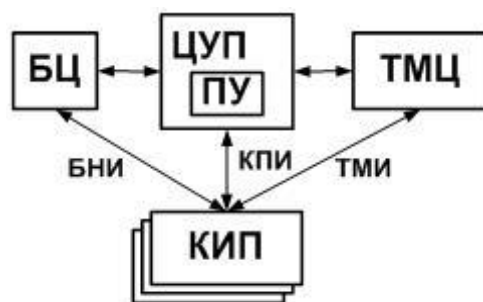


Рисунок 6.3.2 – Обобщённая структура НКУ

Организационно АСУ КА входят в состав соответствующих космических систем (КС). На рисунке 6.3.3 приведен пример обобщенной структуры типовой КС наблюдения (КСН).

Из данного рисунка следует, что наряду с КА, НКУ, НАКУ в состав КСН входит и наземный специальный комплекс (НСК), под которым мы в дальнейшем будем понимать совокупность взаимосвязанных технических средств, информационного, математического и программного обеспечения, предназначенная для обеспечения решения КА их целевых задач с момента выведения их на орбиту.

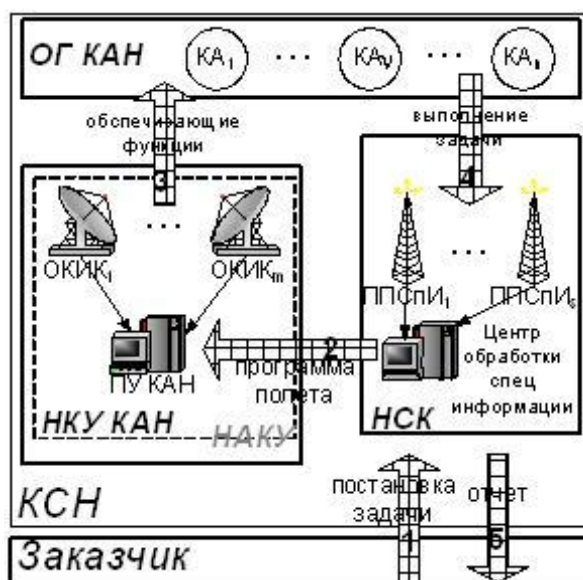


Рисунок 6.3.3 – Схема взаимодействия основных элементов космической системы наблюдения

Основополагающую роль как в составе КСН, так и в АСУ КА играют различные типы их базовых структур и подсистем, а также видов обеспечений.

При рассмотрении АСУ КА, в частности, следует выделять десять видов обеспечения АСУ, пять видов структур (структурного построения АСУ) и пять основных информационно-управляющих подсистем АСУ КА. Наглядно это представлено на рисунке 6.3.4.



Рисунок 6.3.4 – Основные элементы АСУ КА

При этом различают следующие **виды структур АСУ КА**:

1) **функциональная структура** – определяет принципы функционального построения и функционирования системы в различных режимах, организацию

управления её элементами, объёмы и направления основных информационных потоков, циркулирующих в ней, а также отражает особенности математического и информационного обеспечения АСУ КА;

2) **техническая структура** – определяет особенности конкретной технической реализации системы, отражающая особенности технического, лингвистического и эргономического обеспечения АСУ КА;

3) **технологическая структура** – определяет порядок выполнения системой отдельных функций, решения последовательности задач и выполнения комплекса операций, позволяющих достичь требуемого положительного эффекта или целей управления, отражающая особенности методического, математического, информационного и метрологического обеспечения АСУ КА;

4) **топологическая структура** – определяет пространственное взаиморасположение отдельных элементов системы, отражающая особенности организационного, математического и технического обеспечения АСУ КА;

5) **организационная структура** – определяет совокупность частей и подразделений, а также номенклатуру специалистов в них, участвующих в процессе эксплуатации и управления космическими средствами, а также связей между ними, определяющих их права, обязанности и порядок взаимодействия по вертикали (субординация) и горизонтали (взаимодействие, сотрудничество); организационная структура отражает особенности организационного, правового и методического обеспечения АСУ КА.

Для решения задач баллистико-навигационного обеспечения (БНО), информационно-телеметрического обеспечения (ИТО), командно-программного обеспечения (КПО), частотно-временного обеспечения (ЧВО), а также организации управления в составе АСУ КА выделены соответствующие **функциональные системы** (подсистемы) баллистико-навигационного обеспечения (СБНО), информационно-телеметрического обеспечения (СИТО), командно-программного обеспечения (СКПО), частотно-временного обеспечения (СЧВО) и система технологического управления (СТУ) средствами наземного комплекса.

Согласно функционально-структурного подхода к описанию объектов любой природы (в том числе и АСУ КА) (подраздел 1.2), особенно на этапах проектирования и создания СЛО, функциональные и технологические структуры занимают первостепенное значение по отношению к остальным структурам. При этом на ранних этапах жизненного цикла СЛО должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества функций и структур, а также внесён такой уровень избыточности в указанные множества, при которых на этапе применения СЛО по целевому назначению имелась бы возможность гибко реагировать на все расчётные и нерасчётные нештатные ситуации, вызывающие деградацию и реконфигурацию её структур.

Так на рисунке 6.3.5 представлена обобщенная функциональная структура АСУ КА, определяющая принципы функционирования системы, организацию управления её элементами, а также объёмы и направления циркулирующих в ней информационных потоков, где дополнительно обозначены соответствующие информационные каналы и информационные потоки:

- поток измеренных текущих навигационных параметров (ИТНП);
- поток начальных условий (НУ) для прогноза орбитального движения КА;
- поток эфемеридной информации (ЭИ), закладываемой на борт КА для автономного прогноза параметров его орбитального движения;
- поток разовых команд (РК), временных (ВП) и рабочих (РП) программ, а также уставок;
- поток частотно-временной информации (контроль и коррекция бортовой шкалы времени Δt и частоты бортового генератора (эталона частот) Δf);
- потоки технологической информации (ТИ), информации оперативного планирования (ОП) и оперативного управления (ОУ);
- поток телеметрической информации (ТМИ).

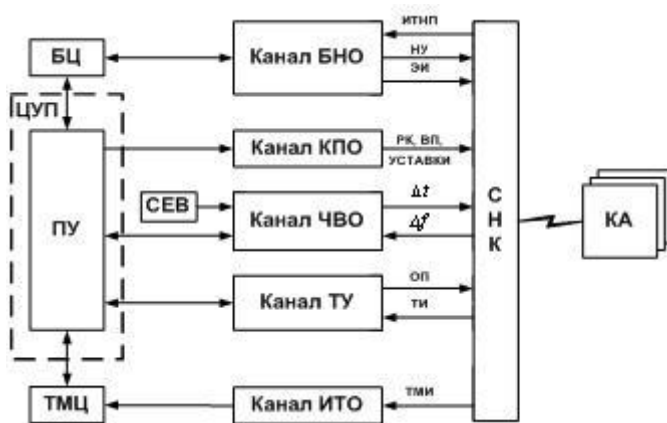


Рисунок 6.3.5 – Обобщённая функциональная структура АСУ КА

Для организации формирования и распространения информационных потоков в НКУ выделяются так называемые информационно-управляющие каналы (ИУК), включающие радиотехнические средства приёма и передачи информации, автоматизированные средства хранения, документирования (регистрации), отображения, обработки и анализа информации, а также каналы связи и средства передачи данных, и определяющие более детальную организационно-техническую структуру АСУ КАН, представленную на рисунке 6.3.6.

На рисунке 6.3.6, представляющем организационно-техническую структуру АСУ КАН, выделены две основные составляющие АСУ КАН – НКУ и совокупность БКУ КАН, входящих в состав ОГ КАН, а также основные организационные элементы НКУ КАН: ЦУП, ОКИК (либо, КИП),

При этом структурно могут быть выделены следующие основные элементы:

➤ **НКУ КАН**, включающий в свой состав ЦУП КАН, систему каналов связи и передачи данных, а также совокупность ОКИК (КИП);

➤ **БКУ КАН**, включающий в свой состав БЦВМ, систему управления бортовой аппаратурой (СУБА) или систему управления обеспечивающим бортовым оборудованием (ОБО) и специальным бортовым оборудованием (СБО), систему управления движением (СУД) КА, бортовую систему контроля и восстановления работоспособности (БСКВР), бортовую радиотелеметрическую систему (БРТМС) и бортовую радиотехническую систему (БРТС);

- **ЦУП КАН**, включающий в себя командный пункт (КП), ССПД, ТМЦ и БЦ, а также их средства автоматизации (СА);
- **ОКИК (КИП)**, включающий в свой состав КП, ССПД, пункт приёма (ПП) СЕВ, РТМС, командно-программные траекторные радиолнии (КПТРЛ), командно-измерительные системы (КИС), а также комплекс средств автоматизации (КСА) и АРМ номеров дежурных расчётов (ДР) ТСр.

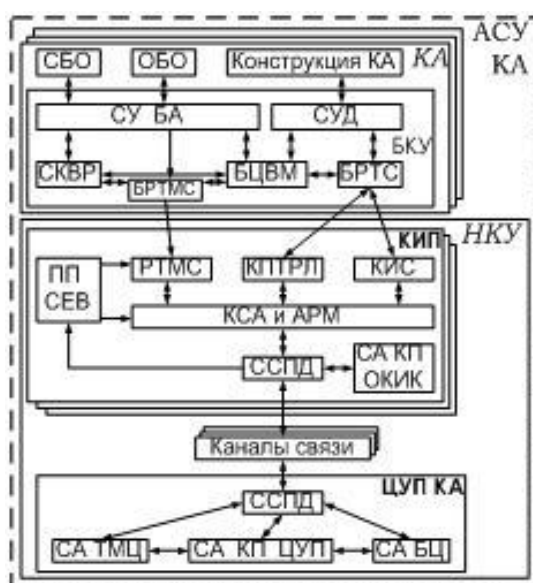


Рисунок 6.3.6 – Детализированная организационно-техническая структура АСУ КАН

6.3.2 Методика многокритериального оценивания интегральных вкладов элементов и подсистем наземной и орбитальной группировок АСУ КАН в показатель надежности ее функционирования

Методика многокритериального оценивания интегральных вкладов (далее методика МОИВ) элементов и подсистем (ЭиП) АСУ КАН предназначена для вычисления оценок вкладов ЭиП в показатель надежности функционирования АСУ КАН при следующих допущениях:

- задана логическая структура, описывающая процессы функционирования АСУ КАН и включающая в себя взаимосвязанные функции ее ЭиП, неод-

нородные по вероятности своей реализации (различные по значениям вероятности);

- задана логическая структура, описывающая процессы функционирования АСУ КАН и включающая в себя взаимосвязанные функции ее ЭИП, однородные по вероятности своей реализации (одинаковые по значениям вероятности));
- заданы возможности наступления событий, связанных с невыполнением своих функций ЭИП АСУ КАН и вызванных отказами ресурсов, обеспечивающих реализацию указанных функций.

Далее перечисленные условия будем для краткости обозначать: заданы неоднородные ЭИП; заданы однородные ЭИП; заданы возможностные ЭИП.

Цель предлагаемой методики МОИВ состоит в определении степени критичности отказов реализации собственных функций ЭИП АСУ КАН применительно к следующим конкретным условиям:

- заданы логические условия результативности съема специальной информации (СПИ) АСУ КАН;
- заданы логические условия безотказности наземного комплекса управления (НКУ) КАН;
- заданы логические условия частичной работоспособности наземного комплекса управления (НКУ) КАН (отсутствует телеметрический контур управления).

В основе методики МОИВ лежит теоретико-множественная модель выявления критически важных элементов (раздел 3), представленная на рисунке 6.3.7. Получаемая от экспертов информация Θ позволяет построить универсальную свертку частных показателей критичности (значениями частных показателей критичности являются величины вкладов ЭИП наземной и орбитальной группировок АСУ КАН в показатель надежности ее функционирования при различных логических условиях безотказности выполнения технологии управления космическими средствами), используя которую можно провести ранжирование ЭИП АСУ КАН.

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЫЯВЛЕНИЯ КРИТИЧНЫХ ЭИП

$\Pi = \langle \{w_i\}_{i \in N}, \{f_i\}_{i \in \Gamma}, \{F^k\}_{k \in \Gamma_1}, \Theta \rangle$
 $\{w_i\}_{i \in N}$ - множество ЭИП; $\{f_i\}_{i \in \Gamma}$ - множество частных показателей критичности отказов реализации функций ЭИП АСУ КА; $\{F^k\}_{k \in \Gamma_1}$ - множество правил согласования; Θ - недостающая информация, получаемая от ЛПР (экспертов).

Процесс построения множества критичных ЭИП АСУ КА

$$\Pi \xrightarrow{\Theta_1} A \xrightarrow{F^{рез}} \{w_i\}_{i \in N}^>$$

A – принцип компромисса, $f_{инт} = F^{инт}(\{f_i\}_{i \in \Gamma})$

Рисунок 6.3.7 – Теоретико-множественная модель

Алгоритм и методика многокритериального оценивания интегральных вкладов ЭИП АСУ КАН состоит из четырех этапов, представленных на рисунке 6.3.8.

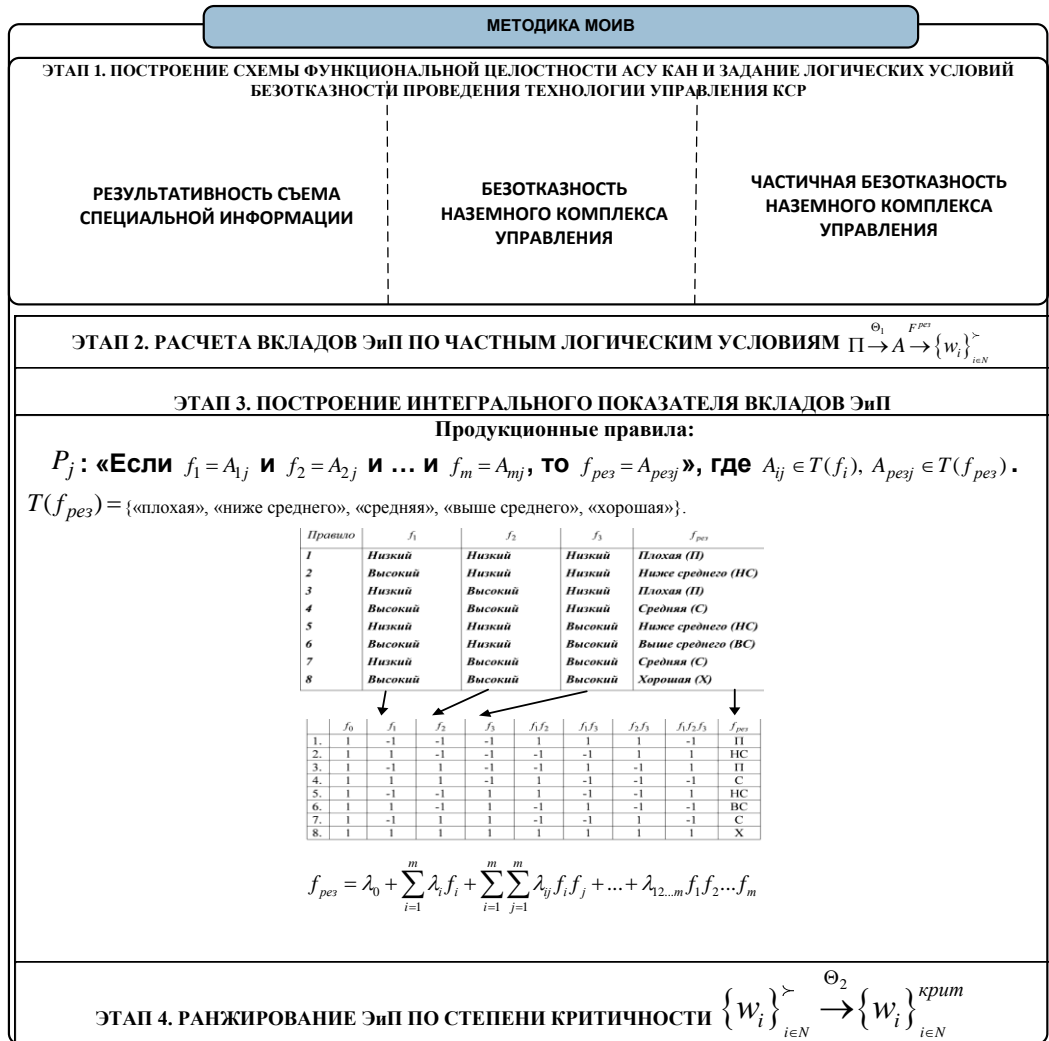


Рисунок 6.3.8 – Этапы методики МОИВ

Этап I (Вспомогательный) – построение схемы функциональной целостности АСУ КАН, задание логических условий безотказности выполнения технологии управления орбитальными и наземными КСр АСУ КАН, а также построение многочленов функций работоспособности перечисленных элементов и подсистем, заданных на вероятностном пространстве, по каждому из рассматриваемых логических условий, осуществляется с использованием лицензированного пакета прикладных программ (ППП) «Арбитр».

Этап II – логико-вероятностное и нечетко-возможностное моделирование, расчет и оценивание вкладов ЭИП наземной и орбитальной группировок АСУ КАН в показатель надежности ее функционирования. Исходными данными для данного этапа являются многочлены функции работоспособности АСУ КАН по каждому из рассматриваемых логических условий, вычисленные на *этапе I*. На *этапе II* осуществляется расчет положительных вкладов успешной реализации функций ЭИП наземной и орбитальной группировок АСУ КАН в показатель надежности ее функционирования при следующих вариантах задания исходных данных: заданы неоднородные ЭИП; заданы однородные ЭИП; заданы возможные ЭИП.

В основе вычисления вкладов в показатель надежности функционирования АСУ КАН лежит концепция генома логической структуры (раздел 2), представляющего собой вектор $\vec{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$, компонентами которого являются коэффициенты полинома функции работоспособности АСУ КАН $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, составленной из однородных элементов $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$, а также нечетко-возможностный подход, в основе которого лежит понятие пространства с мерой возможности

Этап III – построение интегрального показателя вкладов ЭИП в показатель надежности функционирования АСУ КАН. На данном этапе в качестве правила согласования частных показателей критичности используется комбинация метода нечеткого логического вывода и метода теории планирования эксперимента. Указанный подход (раздел 3) позволяет формализовать опыт (знания) эксперта (груп-

пы экспертов) в виде прогностических моделей построения интегрального показателя вкладов в многомерном критериальном пространстве и учесть комплексное влияние одновременно нескольких частных показателей критичности на интегральный показатель критичности отказов (интегральных вкладов) ЭиП АСУ КАН.

Этап IV - ранжирование по степени критичности отказов ЭиП АСУ КАН. Данный этап предназначен непосредственно для вычисления интегральных оценок вкладов ЭиП наземной и орбитальной группировок в показатель надежности функционирования АСУ КАН и их ранжирования по степени критичности.

6.3.3 Результаты применения методики МОИВ

Рассмотрим результаты реализации этапов предлагаемой методики.

Этап построение схемы функциональной целостности.

На основе проведенного анализа процесса функционирования АСУ КАН (подраздел 6.3.1) разработана структурная схемы функциональной целостности (СФЦ) АСУ КАН, представленная на рисунке 6.3.9.

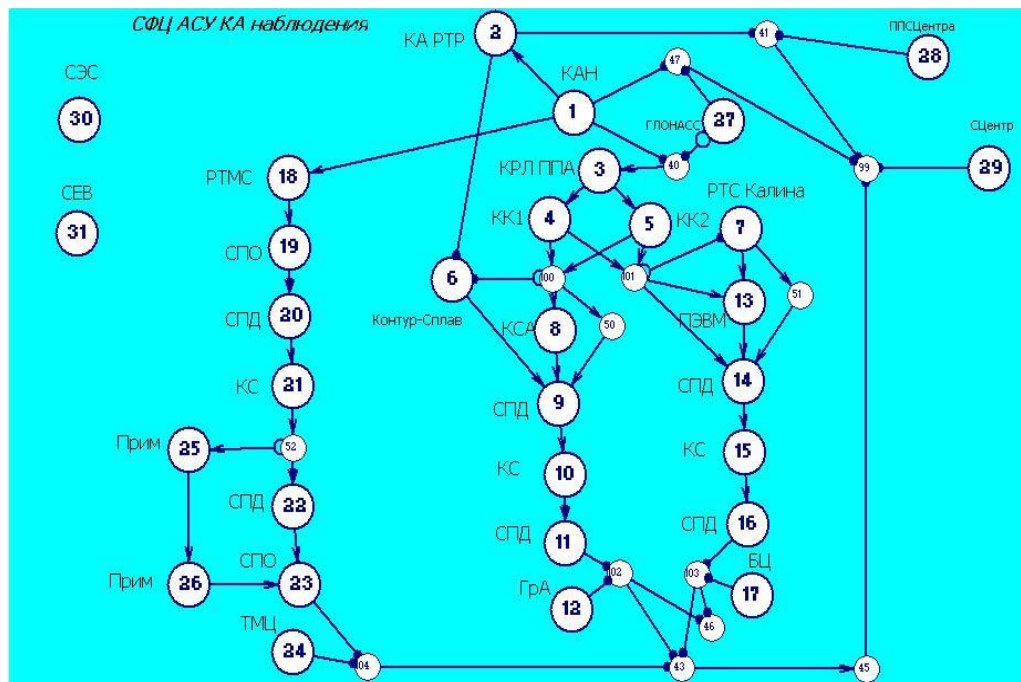


Рисунок 6.3.9 – Схема функциональной целостности АСУ КАН

Перечень обозначений, используемых на рисунке 6.3.9, приведены в таблице 6.3.1.

Таблица 6.3.1 – ЭИП АСУ КАН

Номера ФЭ	Сокращенное обозначение	Пояснения
1	КАН	Космический аппарат наблюдения
2	КА РТР	Космический аппарат ретранслятор
3	КРЛ ШИА	командно-измерительная система «Куб-Контур»
4	КК1	«Куб-Контур» первый полукомплект
5	КК2	«Куб-Контур» второй полукомплект
6	«Контур-Сплав»	командно-измерительная система «Контур-Сплав»
7	РТС «Калина»	командно-программно-траекторная радиолиния «Калина»
8	КСА	Комплекс средств автоматизации
9	СПД (КПИ) ОКИК	Средства передачи данных (командно-программная информация) отдельного командно-измерительного комплекса
10	КС (КПИ)	Канал связи (командно-программной информации)
11	СПД (КПИ) ЦУП	Средства передачи данных (командно-программная информация) центра управления полетами
12	Гра	Группа анализа ЦУПа
13	ПЭВМ (Калина)	Персональная электронная вычислительная машина командно-программно-траекторной радиолинии «Калина»
14	СПД (ТИ) ОКИК	Средства передачи данных (траекторные измерения) отдельного командно-измерительного комплекса
15	КС (ТИ)	Канал связи (траекторные измерения)
16	СПД (ТИ) ЦУП	Средства передачи данных (траекторные измерения) центра управления полетами
17	БЦ	баллистический центр
18	РТМС ОКИК	Радиотелеметрическая система отдельного командно-измерительного комплекса
19	СПО ОКИК	Средства предварительной обработки отдельного командно-измерительного комплекса
20	СПД (ТМИ) ОКИК	Средства передачи данных (телеметрическая информация) отдельного командно-измерительного комплекса
21	КС (ТМИ)	Канал связи (телеметрическая информация)
22	СПД (ТМИ) ЦУП	Средства передачи данных (телеметрическая информация) центра управления полетами
23	СПО ЦУП	Средства предварительной обработки центра управления полетами
24	ТМЦ	Телеметрический центр
25	Приморка ОКИК	Станция спутниковой связи «Приморка» отдельного командно-измерительного комплекса
26	Приморка ЦУП	Станция спутниковой связи «Приморка» центра управления полетами
27	ГЛОНАСС	глобальная навигационная спутниковая система

		(ГЛОНАСС, GPS)
28	ППС СНК	Приемо-передающая система специализированного наземного комплекса
29	СНК	специализированный наземный комплекс
30	СЭС	Система электроснабжения
31	СЕВ	Система единого времени

При построении данной СФЦ применялась прямая логика рассуждений. Это означает, что каждая функциональная вершина 1-31 СФЦ представляет исход $x_i, i = 1, \dots, 31$ безотказности (работоспособности, реализации собственных функций и т.п.) соответствующими ЭиП АСУ КАН.

С помощью фиктивных вершин 40-47, 50-52, 100-104 в СФЦ на рисунке 6.3.9 сгруппированы условия реализации или не реализации технологических операций, входящих в состав функциональной структуры АСУ КАН и влияющих на ее надежность в целом.

Прямые выходы y_{30}, y_{31} функциональных вершин 30 и 31 определяют условия безотказности соответственно системы электроснабжения (СЭС) и системы единого времени (СЕВ).

Прямой выход y_{99} фиктивной вершины 99 определяет группу условий результативности съема специальной информации (СпИ).

Прямой выход y_{43} фиктивной вершины 43 определяет условия работоспособности НКУ КАН (средства ОКИК, ЦУП, БЦ, ТМЦ) при управлении КАН и КА РТР.

Прямой выход y_{46} фиктивной вершины 46 определяет условия частичной работоспособности НКУ КАН (средства ОКИК, ЦУП, БЦ и отсутствие телеметрического контура управления) при управлении КАН и КА РТР.

Таким образом, логическое условие результативности съема СпИ АСУ КАН составляет $Y_{СпИ} = y_{30} \cdot y_{31} \cdot y_{99}$. Соответствующий многочлен функции результативности съема СпИ имеет следующий вид

$$P_{\text{НИ}} = P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P29*P28*P31*P30*P24*P23*P22*P21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P29*P28*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P29*P28*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P29*P28*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P29*P28*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2$$

Логическое условие работоспособности НКУ КАН составляет $Y_{i \text{ ёо}} = y_{30} \cdot y_{31} \cdot y_{43}$.

Соответствующий многочлен функции работоспособности НКУ КАН имеет следующий вид

$$P_{\text{НКУ}} = P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P31*P30*P24*P23*P22*P21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +Q3*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P24*P23*P22*P21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +Q3*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +Q3*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +Q3*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +Q3*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P3*Q4*Q5*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P24*P23*P22*P21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P3*Q4*Q5*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P3*Q4*Q5*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P3*Q4*Q5*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P3*Q4*Q5*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P3*P5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P24*P23*P22*P21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q18*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q19*P18*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P4*Q5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P24*P23*P22*P21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P4*Q5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q18*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P4*Q5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q19*P18*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P4*Q5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P4*Q5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P26*P25*P24*P23*Q21*P20*P19*P18*P17*P16*P15*P14*P12$$

Логическое условие частичной работоспособности НКУ КАН составляет $Y_{\text{НКУ-ТМИ}} = y_{30} \cdot y_{31} \cdot y_{46}$. Соответствующий многочлен функции частичной работоспособности НКУ КАН имеет следующий вид

$$P_{\text{НКУ-ТМИ}} = P6*P7*P9*P10*P11*P27*P1*P31*P30*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +Q3*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P3*Q4*Q5*P6*P7*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P17*P16*P15*P14*P12*P2+ \\ +P3*P5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P17*P16*P15*P14*P12+ \\ +P3*P4*Q5*P9*P10*P11*Q27*P1*P31*P30*P17*P16*P15*P14*P12$$

Этап расчета вкладов в показатель надежности функциональной структуры.

После построения многочленов функций работоспособности, заданных на вероятностном пространстве, переходим ко II этапу. Следует отметить, что большое значение имеют оценки положительного и отрицательного вкладов ЭИП наземной и орбитальной группировок АСУ КАН в показатель надежности ее функционирования. Это вызвано тем, что вклад каждого i -го ЭИП характеризует насколько изменится значение показателя надежности функционирования АСУ КАН при изменении параметра Q_i исследуемого ЭИП от текущего состояния до 0 (безотказный ЭИП) или до 1 (отказ ЭИП). Многочлены для вычисления положительных и отрицательных вкладов ЭИП имеют следующий вид (раздел 2):

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

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

Следует отметить, что нулевое значение вклада i -го ЭИП говорит о том, что данный элемент не влияет на показатель надежности функционирования АСУ КАН, значение положительного вклада i -го ЭИП определяет то максимально возможное увеличение значения показателя надежности функционирования АСУ КАН, если перевести данный ЭИП в безотказное состояние.

Каждому из рассматриваемых многочленов $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, $B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ можно сопоставить соответствующие обобщенные геномы $\vec{\chi}_+^i$, $\vec{\chi}_-^i$, используя которые можно вычислять вклады ЭИП наземной и орбитальной группировок АСУ КАН в показатель надежности ее функционирования.

Так в случае вероятностного описания многочлена функции работоспособности ЭИП наземной и орбитальной группировок АСУ КАН для однородных ЭИП (одинаковая вероятность безотказной работы элементов системы) вычисление вкладов осуществляется по формуле

$$\beta_i^+ = \vec{\chi}_+^i \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1}\right)^T,$$

а для неоднородных ЭИП (различная вероятность безотказной работы элементов системы) по следующей формуле

$$\beta_i^+ = \bar{\chi}_+^i \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T.$$

Зачастую для объектов, входящие в АСУ КАН, возникают проблемы определения вероятности их отказа при функционировании. Для расчета показателя надежности функционирования АСУ КАН в этом случае воспользуемся нечетко-возможностным подходом, в основе которого лежит понятие пространства с мерой возможности. При нечетко-возможностном описании многочлена функции работоспособности ЭИП наземной и орбитальной группировок АСУ КАН соответствующие вклады вычисляются следующим образом

$$\beta_i^+ = \mu_*, \text{ где } \mu_* - \text{ решение уравнения } \bar{\chi}_+^i \cdot (1, \mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = 1 - \mu_*.$$

Подобные вычисления вкладов в рамках данной методики были проведены для логического условия результативности съема специальной информации (СПИ) АСУ КАН, логического условия безотказности НКУ КАН, логического условия частичной работоспособности НКУ КАН (отсутствие телеметрического контура управления). Для перехода к этапу III методики МОИВ полученные результаты необходимо перевести в шкалу измерений $[-1, 1]$. Данный перевод осуществляется по формуле $\bar{\beta} = \frac{2\beta - \beta^{\max} - \beta^{\min}}{\beta^{\max} - \beta^{\min}}$. Значения вкладов ЭИП наземной и орбитальной группировок АСУ КАН в показатель надежности ее функционирования приведены на рисунке 6.3.10.

x0	x1	x2	x3	y	x1*x2	x1*x3	x2*x3	x1*x2*x3
1	-1	-1	-1	0	1	1	1	-1
1	1	-1	-1	0,9	-1	-1	1	1
1	-1	1	-1	0,7	-1	1	-1	1
1	1	1	-1	0,95	1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	0,5	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	0,93	-1	1	-1	-1
1	-1	1	1	0,8	-1	-1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1	1	1

x0*y	x1*y	x2*y	x3*y	x1*x2*y	x1*x3*y	x2*x3*y	x1*x2*x3*y	Yрасч	Yрасч-Yфакт
0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000 0,0000
0,9	0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	0,9	0,9	0,900	0,000 0,0000
0,7	-0,7	0,7	-0,7	-0,7	0,7	-0,7	0,7	0,700	0,000 0,0000
0,95	0,95	0,95	-0,95	0,95	-0,95	-0,95	-0,95	0,950	0,000 0,0000
0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,500	0,000 0,0000
0,93	0,93	-0,93	0,93	-0,93	0,93	-0,93	-0,93	0,930	0,000 0,0000
0,8	-0,8	0,8	0,8	-0,8	-0,8	0,8	-0,8	0,800	0,000 0,0000
1	1	1	1	1	1	1	1	1,000	0,000 0,0000
Среднее арифметическое									0,000 0,0000
0,7225	0,2225	0,14	0,085	-0,11	-0,065	-0,0475	0,0525		

Рисунок 6.3.11 – Результаты экспертного опроса

Так, например, во второй строке таблицы представлено следующее суждение эксперта: «Если вклад ЭИП в 1 логическое условие ($X_1=1$) имеет значение «высокий», вклад ЭИП во 2 логическое условие ($X_2=-1$) имеет значение «низкий», вклад в 3 логическое условие ($X_3=-1$) имеет значение «низкий», то результирующий вклад в показатель надежности функционирования АСУ КАН оценивается как $Y=0.9$ ». Эксперт отвечает на 8 заданных вопросов. Далее после проведенного экспертного опроса осуществляется автоматическое построение интегрального показателя для оценивания вкладов ЭИП в показатель надежности функционирования АСУ КАН. Результаты опроса экспертов и коэффициенты интегрального показателя вкладов приведены на рисунке 6.3.11.

По результатам экспертного опроса определяется интегральный показатель вклада ЭИП АСУ КАН в показатель надежности ее функционирования ($Y_{\text{ЭИП}}$) по формуле:

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{инт}} = & 0.7225 + 0.2225Y_{\text{СнИ}} + 0.14Y_{\text{НКВ}} + 0.085Y_{\text{НКВ-ТМИ}} - \\
 & -0.11Y_{\text{СнИ}}Y_{\text{НКВ}} - 0.065Y_{\text{СнИ}}Y_{\text{НКВ-ТМИ}} - 0.0475Y_{\text{НКВ}}Y_{\text{НКВ-ТМИ}} + \\
 & + 0.0525Y_{\text{СнИ}}Y_{\text{НКВ}}Y_{\text{НКВ-ТМИ}}
 \end{aligned}$$

Этап ранжирования по степени критичности отказов ЭиП АСУ КАН

На *этапе IV* в результате проведенных вычислений осуществляется построение диаграммы интегральных вкладов ЭиП АСУ КАН в показатель надежности функционирования АСУ КАН для неоднородных ЭиП, однородных ЭиП и возможностных ЭиП (рисунок 6.3.12).

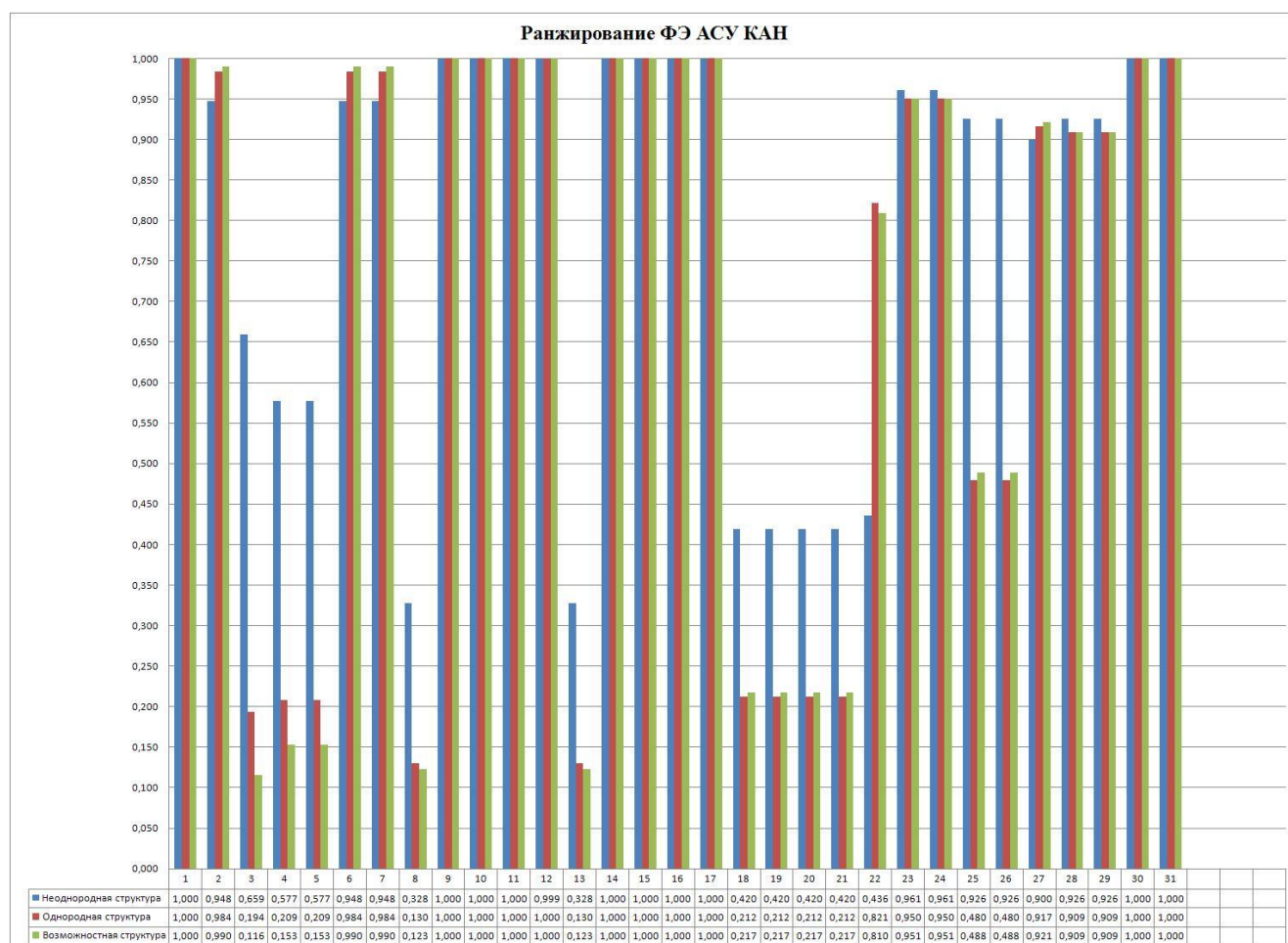


Рисунок 6.3.12 – Диаграмма интегральных вкладов ЭиП

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

➤ наиболее критичными при отказе реализации собственных функций являются такие элементы и подсистемы АСУ КАН как КА (1), система электропитания (30), система единого времени (31), средства автоматизации тракта передачи командно-программной информации (9, 10, 11, 12) и тракта передачи траекторной информации (14, 15, 16, 17);

➤ следующими по важности идут КА ретранслятор (2), система ГЛОНАСС (27), средства специального наземного комплекса (28, 29), командно-

измерительные системы «Контур-Сплав», «Калина» (6, 7) и телеметрический центр (23, 24).

6.4 Методика многокритериального сравнительного анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде в различных субъектах РФ

В данном подразделе рассмотрим применение подхода к многокритериальному оцениванию, изложенного в разделе 3, для решения задачи сравнительного анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде в различных субъектах РФ.

6.4.1 Разработка системы показателей для анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде

Основными приоритетами и направлениями формирования электронного правительства являются [88]:

1. развитие систем обеспечения удаленного доступа граждан к информации о деятельности государственных органов на основе использования информационно-коммуникационных технологий (развитие сайтов государственных органов в сети Интернет; создание инфраструктуры общественного доступа к информации о деятельности государственных органов и к государственным услугам, предоставляемым в электронном виде; развитие ведомственных центров обработки телефонных обращений организаций и граждан; создание единой системы информационно-справочной поддержки взаимодействия граждан с государственными органами);

2. предоставление государственных услуг с использованием современных информационно-коммуникационных технологий (предоставление государственных услуг на основе многофункциональных центров; предоставление государственных услуг с использованием сети Интернет; создание единой инфраструктуры обеспечения юридически значимого электронного взаимодействия; развитие защищенной межведомственной системы электронного документооборота; вне-

дрение информационных систем планирования и мониторинга деятельности государственных органов; формирование необходимой нормативно-правовой базы формирования электронного правительства).

Органы, предоставляющие государственные услуги, согласно Федеральному Закону № 210 от 27.07.2010 «Об организации предоставления государственных услуг» обязаны [128]:

1. предоставлять государственные услуги в соответствии с административными регламентами;
2. обеспечивать возможность получения заявителем государственной услуги в электронном виде, если это не запрещено законом, а также в иных формах, предусмотренных законодательством Российской Федерации, по выбору заявителя;
3. предоставлять в иные государственные органы, органы местного самоуправления, организации документы и информацию, необходимые для предоставления государственных услуг, а также получать от иных государственных органов, органов местного самоуправления, организаций такие документы и информацию (вступил в силу с 1 июля 2011 года);
4. исполнять иные обязанности в соответствии с требованиями федеральных законов, административных регламентов и иных нормативных правовых актов, регулирующих отношения, возникающие в связи с предоставлением государственных услуг.

В основе разработки системы показателей анализа качества организации предоставления государственных услуг лежат следующие цели и задачи:

1. определение общих принципов оценки качества организации предоставления услуг;
2. мониторинг качества организации предоставления услуг в электронном виде;
3. создание основы для выработки оперативных и стратегических решений по организации предоставления государственных услуг в электронном виде;

4. возможность своевременного принятия решений по корректировке организации предоставления услуг;

5. проведение комплексного анализа качества организации предоставления услуг в электронном виде.

В качестве основных критериев разработки системы показателей были выбраны принципы, обеспечивающие полноту проведения анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде. Указанные критерии перечислены ниже.

1. Количество показателей должно быть достаточным для проведения комплексного анализа.

2. Показатели должны быть измеримы, доступны для расчета и давать объективный результат.

3. Полученный в ходе анализа результат должен быть однозначным и исключать возможность двойной трактовки.

4. Показатели должны быть сопоставимы во времени для возможности их оценки в динамике.

5. Показатели должны учитывать все аспекты процесса организации предоставления государственных услуг в электронном виде.

6. Оценка и расчет показателей должны базироваться на первичной информации и статистических показателях, имеющихся в существующих документах по организации предоставления государственных услуг в электронном виде, в том числе с использованием информационных ресурсов Интегрированной системы информационно-аналитического обеспечения деятельности исполнительных органов государственной власти.

При классификации показателей были выбраны три группы, соответствующие предъявляемым требованиям – группа социально-экономических показателей (таблица 6.4.1), группа показателей для анализа информационно-технологической и инфраструктурной составляющей (таблица 6.4.2) и группа организационно-методических и административных показателей (таблица 6.4.3).

Показатели первой группы позволяют оценить обеспечение необходимых социальных и экономических условий для использования государственных услуг в электронном виде, а так же преимущества для населения и организаций при переходе на предоставление государственных услуг в электронном виде.

Таблица 6.4.1 - Группа социально-экономических показателей

№	Наименование	Шкала значений и интерпретация
I-1	Уровень проникновения Интернет в регионе	менее 40% – низкий показатель 40 – 70% – средний показатель более 70% – высокий показатель
I-2	Уровень проникновения широкополосного доступа (ШПД) в регионе	менее 30% – низкий показатель 30 – 60% – средний показатель более 60% – высокий показатель
I-3	Уровень проникновения ШПД в ведомствах	менее 40% – низкий показатель 40 – 70% – средний показатель более 70% – высокий показатель
I-4	Количество ПК и других средств доступа на 100 домохозяйств	менее 40 – низкий показатель 40 – 60 – средний показатель более 60 – высокий показатель
I-5	Доля расходов на Интернет в регионе в общей структуре расходов на связь	менее 20% – низкий показатель 20 – 40% – средний показатель более 40% – высокий показатель
I-6	Количество районов с действующими многофункциональными центрами (МФЦ)	менее 50% районов – низкий показатель 50 – 80% районов – средний показатель более 80% районов – высокий показатель
I-7	Доля сокращения посещений заявителем других ведомств, участвующих в оказании государственной услуги из-за отсутствия данного функционала в МФЦ	менее 40% - низкий показатель 40 – 70% - средний показатель более 70% – высокий показатель
I-8	Доля сокращения посещений заявителем других ведомств при получении одновременно нескольких взаимосвязанных государственных услуг из-за отсутствия данного функционала в МФЦ (в т.ч., функционала «единого окна»)	менее 30% - низкий показатель 30 – 60% - средний показатель более 60% - высокий показатель
I-9	Среднее время ожидания обслуживания в МФЦ	более 30 минут – низкий показатель от 15 до 30 минут – средний показатель менее 15 минут – высокий показатель
I-10	Доля сокращения количества предоставляемых заявителем документов	менее 30% – низкий показатель 30 – 50% – средний показатель более 50% – высокий показатель
I-11	Доля сокращения межведомственного бумажного документооборота	менее 40% – низкий показатель 40 – 70% – средний показатель более 70% – высокий показатель
I-12	Полнота размещенной на Портале информации о предоставлении государственных услуг	информация не представлена или ее объем минимален – низкий показатель представлена основная информация, с недостаточной степенью актуальности – средний показатель представлена исчерпывающая информация – высокий показатель

Именно эта группа показателей позволяет отслеживать качественные социальные изменения и позволяет, на основании проводимого мониторинга, повышать уровень социальной ответственности Государства.

Показатели второй группы позволяют оценить уровень подготовки информационно-технологического обеспечения предоставления государственных услуг.

Рассматриваемая группа показателей позволяет контролировать уровень информатизации и автоматизации при реализации и оказании государственных услуг в электронном виде. Помимо ИТ-составляющей посредством рассматриваемой группы показателей можно проводить анализ инфраструктурных решений, используемых при предоставлении государственных услуг в электронном виде.

Таблица 6.4.2 - Группа показателей для анализа информационно-технологической и инфраструктурной составляющей

№	Наименование	Шкала значений и интерпретация
II-1	Доля сотрудников в государственных органах, подключенных к сети Интернет (в подключенных к сети Интернет организациях)	менее 70% – низкий показатель 70 – 90% – средний показатель более 90% – высокий показатель
II-2	Доля услуг, предоставляемых в электронном виде посредством МФЦ	менее 50% - низкий показатель 50 – 80% - средний показатель более 80% - высокий показатель
II-3	Доля услуг, предоставляемых в электронном виде посредством Портала	менее 50% - низкий показатель 50 – 70% - средний показатель более 70% - высокий показатель
II-4	Доля ведомств, включенных в межсистемное взаимодействие с МФЦ	менее 40% - низкий показатель 40 – 70% - средний показатель более 70% - высокий показатель
II-5	Доля ведомств, включенных в единую систему документооборота с МФЦ	менее 50% - низкий показатель 50-80% - средний показатель более 80% - высокий показатель
II-6	Возможность подачи и/или повторной подачи документов заявителем на предоставления государственной услуги в любом МФЦ	возможности нет – низкий показатель возможность есть, но при выполнении дополнительных условий – средний показатель возможность есть – высокий показатель
II-7	Доля запросов, обрабатываемых системой документооборота (по отношению к общему количеству документов)	менее 30% - низкий показатель 30 – 60% - средний показатель более 60% - высокий показатель
II-8	Доля услуг, для которых реализована загрузка на Портал документов в стандартизованных форматах (например, RTF, CSV и PDF)	менее 50% - низкий показатель 50 - 70% - средний показатель более 70% - высокий показатель
II-9	Организация обратной связи с заявителями через Портал и/или по электронной почте	ни один из способов не реализован – низкий показатель

№	Наименование	Шкала значений и интерпретация
		реализован один из способов – средний показатель реализованы оба способа – высокий показатель
II-10	Среднее время задержки в межведомственной рассылке информации в электронном виде	более 1 рабочего дня – низкий показатель от 1 часа до 1 рабочего дня – средний показатель менее 1 часа – высокий показатель
II-11	Степень разработки функционала для использования универсальных идентификационных карт для доступа к государственным услугам в электронном виде на Портале	менее 40% - низкий показатель 40 – 70% - средний показатель более 70% - высокий показатель
II-12	Степень разработки функционала для использования универсальных идентификационных карт для доступа к государственным услугам в электронном виде в МФЦ	менее 40% - низкий показатель 40-70% - средний показатель более 70% - высокий показатель
II-13	Авторизация и аутентификация пользователей МФЦ и Портала	ни один из механизмов не реализован – низкий показатель реализован один из механизмов – средний показатель реализованы оба механизма – высокий показатель
II-14	Реализация электронной цифровой подписи (ЭЦП) (для ведомств)	не реализовано – низкий показатель реализовано частично – средний показатель реализовано в полной мере – высокий показатель
II-15	Реализация ЭЦП (для заявителя)	не реализовано – низкий показатель реализовано частично – средний показатель реализовано в полной мере – высокий показатель
II-16	Установка защищенных соединений при работе личными данными	не реализовано – низкий показатель реализовано частично (на сегменте сети) – средний показатель реализовано в полной мере – высокий показатель
II-17	Реализация приема электронных платежей	отсутствие концепции решения – низкий показатель наличие проработанного, но не внедренного решения – средний показатель полнофункциональное решение – высокий показатель

Показатели, характеризующие организационно-методическую и административную деятельность субъекта РФ, сведены в третью группу показателей. На основании анализа таких индикаторов возможно повышение эффективности деятельности ведомств и организаций, отвечающих за разработку, внедрение и предоставление государственных услуг в электронном виде. Показатели данной

группы также позволяют отследить выполнение программ по переводу услуг в электронный вид в соответствие с текущим законодательством и оценить уровень административной поддержки данных процессов.

Таблица 6.4.3 - Группа организационно-методических и административных показателей

№	Наименование	Шкала значений и интерпретация
III-1	Соблюдение сроков перевода услуг в электронный вид	организация менее 50% услуг в срок – низкий показатель организация от 50 до 90% в срок – средний показатель организация более 90% услуг в срок – высокий показатель
III-2	Наличие утвержденных планов внедрения услуг в электронном виде, в т.ч. по внедрению универсальной электронной карты	планы фактически отсутствуют – низкий показатель планы существуют, но не утверждены – средний показатель планы существуют, утверждены и выполняются – высокий показатель
III-3	Наличие соглашений с ведомствами об организации совместных работ по предоставлению услуг на основе универсальных электронных карт	соглашения фактически отсутствуют, работа в регионе не ведется – низкий показатель соглашения на фазе проекта, с некоторыми ведомствами соглашения существуют – средний показатель соглашения заключены, совместные работы ведутся фактически – высокий показатель
III-4	Наличие регламентов и процедур межведомственного взаимодействия при предоставлении государственных услуг в электронном виде, в т.ч. с использованием универсальной электронной карты	регламенты и процедуры фактически отсутствуют – низкий показатель регламенты и процедуры существуют фрагментарно, часть не соблюдается – средний показатель регламенты и процедуры – разработаны, внедрены, фактически используются
III-5	Наличие единого органа, управляющего и ответственного за внедрение ИКТ в регионе	единый орган отсутствует – низкий показатель единый орган формально существует, частично функционален – средний показатель единый орган существует, фактически выполняет возложенные на него обязанности – высокий показатель
III-6	Наличие органа, ответственного за координацию информатизации СЛО Стратегией социально-экономического развития	координирующий орган отсутствует – низкий показатель координирующий орган формально существует, частично функционален – средний показатель координирующий орган существует, фактически выполняет возложенные на него обязанности – высокий показатель
III-7	Наличие единого официального электронного информационного ресурса с информацией о государственных услугах, предоставляемых в регионе	единый ресурс отсутствует, деятельность фактически не ведется – низкий показатель единый ресурс существует, формальные требования соблюдаются – средний показатель единый ресурс существует, обладает свойствами инновационности, информация актуализирована – высокий показатель

6.4.2 Особенности методики многокритериального сравнительного анализа качества организации предоставления услуг

Ниже представлен подход к проведению многокритериального сравнительного анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде в различных субъектах РФ на основании анализа системы показателей.

В ходе анализа системы показателей, проведенного в подразделе 6.4.1, все показатели разбиты на три группы: $F = \{f_j, j = \overline{1, m}\} = F^{CЭ} \cup F^{ИТ} \cup F^{ОМ}$, где $F^{CЭ}$ – группа социально-экономических показателей, $F^{ИТ}$ – группа показателей для анализа информационно-технологической и инфраструктурной составляющих, $F^{ОМ}$ – группа организационно-методических и административных показателей.

Следует отметить, что все частные показатели анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде из приведенных групп могут быть получены:

- вычислительными методами;
- путём анализа статистических данных, например «Доля услуг, для которых реализована загрузка на Портал документов в стандартизованных форматах (например, RTF, CSV и PDF)», «Среднее время задержки в межведомственной рассылке информации в электронном виде» из группы $F^{ИТ}$ и подобные;
- за счёт обработки экспертной информации, представляющие собой лингвистические переменные, например «Количество открытых МФЦ», «Уровень проникновения ШПД в регионе» из группы $F^{CЭ}$ и подобные.

На *первом этапе* построения интегрального показателя качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде осуществляется описание и вычисление частных показателей.

Значения частных показателей качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде в самом общем случае представляют собой лингвистические переменные Y_j .

$$Y_j = f_j = \langle y_j, T(y_j), U, G, M \rangle$$

где y_j - название показателя;

$T(y_j)$ - терм-множество названий лингвистического показателя, областью определения каждого из которых является универсальное множество U ;

G - синтаксическая процедура, позволяющая оперировать элементами терм-множества $T(y_j)$, в частности, генерировать новые термы (значения);

M - семантическая процедура, позволяющая превратить каждое новое значение лингвистической переменной, образуемое процедурой G , в нечеткую переменную, т.е. сформировать соответствующее нечеткое множество универсального множества U .

Так, например, лингвистическая шкала применительно к одному из частных показателей «Уровень проникновения Интернет в регионе» приведена в таблице 6.4.4.

Для формального представления термов лингвистических переменных можно использовать нечеткие числа (L-R) типа. Тогда значения показателя «Уровень проникновения Интернет в регионе» можно представить по универсальной 100 бальной шкале как на рисунке 6.4.1.

Таблица 6.4.4 – Примр лингвистической шкалы

Показатель	Шкала	Терм
Уровень проникновения Интернет в регионе	1. менее 40%	1. Низкий
	2. 40 – 70%	2. Средний
	3. более 70%	3. Высокий

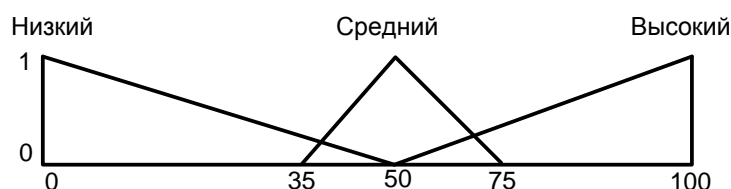


Рисунок 6.4.1 - Представление частного показателя в виде лингвистической переменной

Аналогично можно описать возможные значения других частных показателей анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде.

Согласно подхода, изложенного в подразделе 3.3.5, осуществляется кодирование частных показателей f_j в шкалу $[-1, +1]$. Результат кодирования представлен на рисунке 6.4.2.

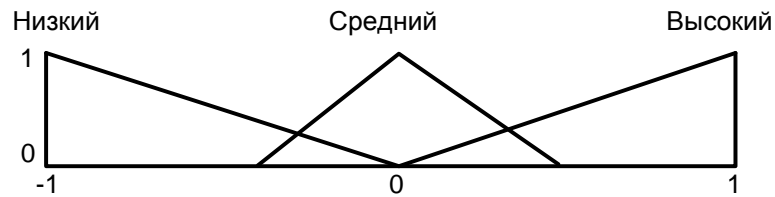


Рисунок 6.4.2 - Кодирование частного показателя

На **втором этапе** построения интегрального показателя качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде осуществляется построение иерархии системы показателей.

Так группа F^{C9} состоит из 12 показателей и разбивается на 3 подгруппы:

1. Предоставление государственных услуг в электронном виде с использованием сети Интернет (I-1, I-2, I-3, I-12)
2. Предоставление государственных услуг на основе многофункциональных центров (I-6, I-7, I-8, I-9).
3. Характеристики социально-экономического положения региона для предоставления государственных услуг в электронном виде (I-4, I-5).

Группа F^{III} состоит из 20 показателей и разбивается на 4 подгруппы:

1. Предоставление государственных услуг с использованием сети Интернет (II-1, II-3, II-8 II-9).
2. Предоставление государственных услуг на основе многофункциональных центров (II-2, II-4, II-5, II-6).
3. Обеспечение информационной безопасности (I-13, II-14, II-15, II-16).
4. Обеспечение информационно-технологических возможностей для организации предоставления государственных услуг в электронном виде в регионе (II-7, II-10, II-11, II-12, II-17).

Группа F^{OMA} состоит из 7 показателей и разбивается на 2 подгруппы:

1. Развитость нормативно-правовой базы формирования электронного правительства (III-2, III-3, III-4).
2. Административно-организационное обеспечение процесса организации предоставления государственных услуг в электронном виде (III-1, III-5, III-6, III-7).

В каждую из подгрупп входит свой набор частных показателей, идентификаторы которых указаны в скобках.

На *третьем этапе* для каждой из подгрупп осуществляется построение интегрального показателя этой подгруппы с использованием входящих в нее частных показателей по методике, предложенной в подразделе 3.3.5.

На *четвертом этапе* для каждой из групп $F^{CЭ}$, $F^{ИТ}$, F^{OMA} осуществляется построение интегрального показателя этой группы с использованием входящих в нее результирующих показателей подгрупп по методике, предложенной на третьем этапе.

На *пятом этапе* осуществляется построение интегрального показателя «Качество организации предоставления государственных услуг в электронном виде» с использованием результирующих показателей групп $F^{CЭ}$, $F^{ИТ}$, F^{OMA} по методике, предложенной на *третьем этапе*.

6.4.3 Результаты сравнительного анализа качества организации предоставления услуг в электронном виде в различных субъектах РФ

Сравнительный анализ качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде проводился для перечисленных ниже субъектов РФ, априори характеризующихся высоким уровнем развития и организации предоставления государственных услуг в электронном виде.

1. Санкт-Петербург (базовый субъект РФ, для которого осуществлялась экспертиза);
2. Республика Татарстан;
3. Калининградская область;

4. Астраханская область;
5. Архангельская область;
6. Республика Башкортостан.

Для каждого из списка субъектов РФ определялись значения вышеприведенных показателей, полученные путем анализа данных из открытых источников, мнений экспертов, а также официальных и нормативных документов.

Так, например, для Республики Татарстан значения показателей групп $F^{СЭ}$, $F^{ИТ}$, $F^{ОМА}$ приведены в таблицах 6.4.5 – 6.4.7.

Таблица 6.4.5 - Группа социально-экономических показателей Республики Татарстан

№	Наименование	Шкала значений и интерпретация
I-1	Уровень проникновения Интернет в регионе	средний показатель (40 – 70%)
I-2	Уровень проникновения ШПД в регионе	высокий показатель (более 60%)
I-3	Уровень проникновения ШПД в ведомствах	высокий показатель (более 70%)
I-4	Количество ПК и других средств доступа на 100 домохозяйств	средний показатель (40 – 60)
I-5	Доля расходов на Интернет в регионе в общей структуре расходов на связь	высокий показатель (более 40%)
I-6	Количество районов с действующими МФЦ	низкий показатель (менее 50% районов)
I-7	Доля сокращения посещений заявителем других ведомств, участвующих в оказании государственной услуги из-за отсутствия данного функционала в МФЦ	низкий показатель (менее 40%)
I-8	Доля сокращения посещений заявителем других ведомств при получении одновременно нескольких взаимосвязанных государственных услуг из-за отсутствия данного функционала в МФЦ (в т.ч., функционала «единого окна»)	низкий показатель (менее 30%)
I-9	Среднее время ожидания обслуживания в МФЦ	высокий показатель (менее 15 минут)
I-10	Доля сокращения количества предоставляемых заявителем документов	средний показатель (30 – 50%)
I-11	Доля сокращения межведомственного бумажного документооборота	высокий показатель (более 70%)
I-12	Полнота размещенной на Портале информации о предоставлении государственных услуг	высокий показатель (представлена исчерпывающая информация)

Таблица 6.4.6 - Группа показателей для анализа информационно-технологической и инфраструктурной составляющих Республики Татарстан

№	Наименование	Шкала значений и интерпретация
II-1	Доля сотрудников в государственных органах, подключенных к сети Интернет (в подключенных к сети Интернет организациях)	высокий показатель (более 90%)
II-2	Доля услуг, предоставляемых в электронном виде посредством МФЦ	средний показатель (50 – 80%)
II-3	Доля услуг, предоставляемых в электронном виде посредством Портала	средний показатель (50 – 70%)

№	Наименование	Шкала значений и интерпретация
II-4	Доля ведомств, включенных в межсистемное взаимодействие с МФЦ	средний показатель (40 – 70%)
II-5	Доля ведомств, включенных в единую систему документооборота с МФЦ	высокий показатель (более 80%)
II-6	Возможность подачи и/или повторной подачи документов заявителем на предоставления государственной услуги в любом МФЦ	средний показатель (возможность есть, но при выполнении дополнительных условий)
II-7	Доля запросов, обрабатываемых системой документооборота (по отношению к общему количеству документов)	высокий показатель (более 60%)
II-8	Доля услуг, для которых реализована загрузка на Портал документов в стандартизованных форматах (например, RTF, CSV и PDF)	высокий показатель (более 70%)
II-9	Организация обратной связи с заявителями через Портал и/или по электронной почте	высокий показатель (реализованы оба способа)
II-10	Среднее время задержки в межведомственной рассылке информации в электронном виде	высокий показатель (менее 1 часа)
II-11	Степень разработки функционала для использования универсальных идентификационных карт для доступа к государственным услугам в электронном виде на Портале	средний показатель (40 – 70%)
II-12	Степень разработки функционала для использования универсальных идентификационных карт для доступа к государственным услугам в электронном виде в МФЦ	средний показатель (40-70%)
II-13	Авторизация и аутентификация пользователей МФЦ и Портала	высокий показатель (реализованы оба механизма)
II-14	Реализация ЭЦП (для ведомств)	высокий показатель (реализовано в полной мере)
II-15	Реализация ЭЦП (для заявителя)	низкий показатель (не реализовано)
II-16	Установка защищенных соединений при работе личными данными	высокий показатель (реализовано в полной мере)
II-17	Реализация приема электронных платежей	средний показатель (наличие проработанного, но не внедренного решения)

Таблица 6.4.7 - Группа организационно-методических и административных показателей Республики Татарстан

№	Наименование	Шкала значений и интерпретация
III-1	Соблюдение сроков перевода услуг в электронный вид	высокий показатель (организация более 90% услуг в срок)
III-2	Наличие утвержденных планов внедрения услуг в электронном виде, в т.ч. по внедрению универсальной электронной карты	высокий показатель (планы существуют, утверждены и выполняются)
III-3	Наличие соглашений с ведомствами об организации совместных работ по предоставлению услуг на основе универсальных электронных карт	высокий показатель (соглашения заключены, совместные работы ведутся фактически)
III-4	Наличие регламентов и процедур межведомственного взаимодействия при предоставлении государственных услуг в электронном виде, в т.ч. с использованием универсальной электронной карты	высокий показатель (регламенты и процедуры разработаны, внедрены, фактически используются)
III-5	Наличие единого органа, управляющего и ответственного за внедрение ИКТ в регионе	высокий показатель (единый орган существует, фактически выполняет возложенные на него обязанности)

№	Наименование	Шкала значений и интерпретация
III-6	Наличие органа, ответственного за координацию информатизации СлО Стратегией социально-экономического развития	высокий показатель (координирующий орган существует, фактически выполняет возложенные на него обязанности)
III-7	Наличие единого официального электронного информационного ресурса с информацией о государственных услугах, предоставляемых в регионе	высокий показатель (единый ресурс существует, обладает свойствами инновационности, информация актуализирована)

В результате применения описанной выше методики были получены (таблица 6.4.8) интегральные значения исходных показателей по трем группам и в целом по субъектам РФ.

Таблица 6.4.8 - 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	

Интегральные оценки в таблице 6.4.8 получены следующим образом.

1. По результатам экспертного опроса о влиянии показателей $F^{CЭ}$, $F^{ИТ}$, $F^{ОМ}$ на интегральный показатель «Качество организации предоставления государственных услуг в электронном виде» строится таблица 6.4.9.

Таблица 6.4.9 - Результаты экспертного опроса

$F^{CЭ}$	$F^{ИТ}$	$F^{ОМ}$	F^{Σ}
Низкий	Низкий	Низкий	0,0
Высокий	Низкий	Низкий	0,6
Низкий	Высокий	Низкий	0,5

Высокий	Высокий	Низкий	0,9
Низкий	Низкий	Высокий	0,3
Высокий	Низкий	Высокий	0,8
Низкий	Высокий	Высокий	0,7
Высокий	Высокий	Высокий	1

2. По методике, изложенной в подразделе 3.3.5, определяется интегральный показатель «Качество организации предоставления государственных услуг в электронном виде»:

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

3. Значения показателей F^{C3} , F^{IT} , F^{OMA} (таблица 6.4.8) переводятся в шкалу [-1,1]. Результаты шкалирования представлены в таблице 6.4.10.

Таблица 6.4.10 - Перевод значений показателей в шкалу [-1,1]

Субъекты РФ	1. Группа социально-экономических показателей	2. Группа показателей для анализа информационно-технологической и инфраструктурной составляющих	3. Группа организационно-методических и административных показателей
Санкт-Петербург	1,00	-0,40	-0,14
Республика Татарстан	0,33	0,50	1,00
Калининградская область	-0,50	0,30	-0,14
Астраханская область	-0,50	-0,20	-1,00
Архангельская область	-1,00	-1,00	0,43
Республика Башкортостан	0,17	1,00	-0,43

4. Осуществляется вычисление интегрального показателя «Качество организации предоставления государственных услуг в электронном виде» для каждого субъекта РФ по формуле, приведенной выше в п.2. Результаты вычислений приведены в таблице 6.4.8.

В соответствии с полученными результатами Санкт-Петербург имеет лучшее значение по группе социально-экономических показателей. Вместе с тем, невысокими являются значения по группе показателей анализа информационно-

технологической и инфраструктурной составляющих, в этой группе лидером является Башкортостан.

Подводя итоги проведенной экспертизы организации предоставления государственных услуг в электронном виде в Санкт-Петербурге, следует отметить, что Санкт-Петербург является субъектом РФ, в котором уделяется значительное внимание развитию и внедрению традиционных и инновационных государственных услуг, предоставляемых в электронном виде.

Основным недостатком при предоставлении государственных услуг в электронном виде является недостаточная межведомственная интеграция. Основной сложностью при внедрении – является значительное количество государственных услуг, высокая численность населения, достаточно сжатые сроки, отводимые на внедрение государственных услуг в электронном виде. Тем не менее, руководство профильных Комитетов Города обеспечивает исполнение практически всех основных требований к качественной организации предоставления государственных услуг в электронном виде.

Многокритериальный сравнительный анализ, проводимый в рамках настоящей экспертизы, показал, что Санкт-Петербург лидирует по соответствию перечисленных требований:

- Уровень обеспечения удаленного доступа к информации о деятельности государственных органов;
- Качество административного и организационного обеспечения предоставления государственных услуг в электронном виде;
- Качество работ по созданию МФЦ по принципу «Одного окна»;
- ИТ и административное обеспечение межведомственного электронного взаимодействия при предоставлении государственных услуг.

Указанное лидерство диктует повышенные требования к дальнейшему исполнению перечисленных требований.

В тоже время необходимо отметить, что Санкт-Петербург отстает при сравнительном анализе от других регионов по ряду требований. Эти требования перечислены ниже.

- Состав и качество разработки административных регламентов (лидер – Татарстан);
- Состояние и перспективы работ по внедрению универсальной электронной карты (лидер – Татарстан);
- Качество обеспечения защиты персональных данных (лидеры – Астраханская область и Башкортостан);
- Уровень разработки нормативно-правовой базы региона для государственных услуг в электронном виде (лидер – Татарстан).

В скобках указаны те субъекты РФ, которые лидируют по каждому конкретному требованию и являются своего рода источниками передового опыта, анализ которого позволит в значительной степени повысить данные показатели в Санкт-Петербурге.

Отдельно, необходимо отметить крайне высокие значения показателей из группы социально-экономических показателей Санкт-Петербурга, что свидетельствует о том внимании, которое уделяет Правительство Санкт-Петербурга социально-экономическим вопросам.

Выводы

В заключение данного раздела можно сделать следующие выводы.

1. На основании проведенных в предыдущих разделах исследований представлена схема взаимосвязей компонент методического обеспечения задач классов А, Б, В для решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов. Приведены основные элементы методологического и методического обеспечения, включающее в себя методы, модели и алгоритмы решения проблемы диссертационных исследований. Представлены экспериментальные результаты применения разработанных подходов, моделей, методов и алгоритмов при решении ряда актуальных и важных задач в различных предметных областях.

2. Представлены результаты исследований дистрибуционной сети цепи поставок. Исследования проводились с использованием научно-методического обеспечения, разработанного и представленного в диссертационной работе (разделы 2, 3, 4, 5), включающее:

- модели, методы и алгоритмы выявления критичных технологических операций, выполняемых в ДС SCM;
- модельно-алгоритмическое обеспечение построения сценариев структурной реконфигурации ДС SCM;
- модели, методы и алгоритмы планирования структурно-функциональной реконфигурации ДС SCM;
- модельно-алгоритмическое обеспечение параметрического синтеза ДС SCM.

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

3. 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, а также разработана методика многокритериального оценивания интегральных вкладов элементов и подсистем АСУ КА наблюдения в показатель надёжности ее функционирования, имеющих существенное значение для ракетно-космической отрасли знаний. В основе приведенного научно-методического аппарата лежат подходы, изложенные в разделах 2 и 3. 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 выявленных критичных ТСр и каналов передачи информации между ними позволяют повысить структурную надёжность подсистем КИК и снизить структурную значимость выявленных элементов на 10-25%.

4. Разработана методика многокритериального сравнительного анализа качества организации предоставления государственных услуг в электронном виде. Данная методика включает: разработку системы показателей; декомпозицию показателей на социально-экономические, информационно-технологические и организационно-методические; методику многокритериального сравнительного анализа качества организации предоставления электронных услуг, в основе которой лежит подход, изложенный в подразделе 3.3.5. Применение данной методики позволило разработать рекомендации по совершенствованию процесса организации государственных услуг в электронном виде в Санкт-Петербурге.

Заключение

В ходе проведения диссертационных исследований, формулировки и решения поставленной в работе научной проблемы разработки моделей и методов планирования реконфигурации сложных объектов, обладающих структурно-функциональной избыточностью и функционирующих в динамически изменяющихся условиях, были получены следующие научные и практические результаты.

1. Обоснована актуальность и проведен системный анализ научной проблемы 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.

Дальнейшее развитие научных исследований в данной области целесообразно проводить в следующих направлениях:

- развитие и обобщение данного подхода на основе разрабатываемой современной теории управления структурной динамикой сложных технических объектов в критических приложениях;
- разработка методов и моделей структурно-функционального анализа и синтеза немонотонных структур сложных объектов;
- разработка методического и программного обеспечения расчета необходимого уровня структурной избыточности и оптимального разнотипного резервирования элементов и подсистем СЛО для обеспечения требуемого уровня его надежности и живучести; управления функциональной и структурной реконфигурацией СЛО в штатном режиме и заданных условиях;
- разработка и внедрение комплексов обнаружения различных деструктивных воздействий в современных сложных организационно-технических системах.

Список сокращений и условных обозначений

АВПКО	- анализ видов, последствий и критичности отказов
АСИВСС	- адаптивные и самоорганизующиеся информационно-вычислительные системы и сети
АСУ	- автоматизированная система управления
БКУ	- бортовой комплекс управления
БНИ	- баллистико-навигационная информация
БП	- бизнес-процесс
БРТМС	- бортовая радиотелеметрическая система
БРТС	- бортовая радиотехническая система
БСКВР	- бортовая система контроля и восстановления работоспособности
БЦ	- баллистический центр
ВВФ	- время восстановления функционирования
ВиП	- виртуальное предприятие
ВП	- временная программа
ГЦ	- главный центр
ДВМ	- динамический взвешенный мультиграф
ДС	- дистрибуционная сеть
ИИТ	- интеллектуальные информационные технологии
ИСС	- информационные системы и сети
ИТНП	- измерение текущих навигационных параметров
ИУК	- информационно-управляющий канал
КА	- космический аппарат
КАН	- космический аппарат наблюдения
КИС	- командно-измерительная система
КНС	- космическая навигационная система
КП	- командный пункт
КПИ	- командно-программная информация
КПТРЛ	- командно-программная траекторная радиолиния

КСА	- комплекс средств автоматизации
ЛПР	- лицо, принимающее решение
МАИС	- межведомственная автоматизированная информационная система
МИТ	- мобильные информационные технологии
МФЦ	- многофункциональный центр
НАКУ	- наземный автоматизированный комплекс управления
НКУ	- наземный комплекс управления
НСК	- наземный специальный комплекс
НУ	- начальные условия
ОБО	- обеспечивающие бортовое оборудование
ОГ	- орбитальная группировка
ОКИК	- отдельный командно-измерительный комплекс
ОЛВМ	- общий логико-вероятностный метод
ОП	- оперативное планирование
ОРС	- орбитальная система
ОУ	- оперативное управление
ПП	- пункт передачи
ПУ	- пункт управления
РК	- разовая команда
РП	- рабочая программа
СБНО	- система баллистико-навигационного обеспечения
СБО	- специальное бортовое оборудование
СЕВ	- система единого времени
СИТО	- система информационно-телеметрического обеспечения
СКПО	- система командно-программного обеспечения
СЛО	- сложный объект
СПб ИАЦ	- Санкт-Петербургский информационно-аналитический центр
СПИ	- специальная информация
ССПД	- средства связи и передачи данных
СТУ	- система технологического управления

СУ	- сеанс управления
СУБА	- система управления бортовой аппаратурой
СУД	- система управления движением
СФЦ	- схема функциональной целостности
СЧВО	- система частотно-временного обеспечения
ТИ	- технологическая информация
ТМИ	- телеметрическая информация
ТМЦ	- телеметрический центр
ТС	- техническое состояние
ТСр	- техническое средство
ТЦУ	- технологический цикл управления
УС	- узел связи
УСД	- управление структурной динамикой
ФАЛ	- функция алгебры логики
ФСП	- функционально-структурный подход
ФЭ	- функциональный элемент
ЦРП	- центральная распределительная подстанция
ЦУП	- центр управления полётом
ЧПК	- частный показатель критичности
ШПД	- широкополосный доступ
ЭИ	- эфемеридная информация
ЭиП	- элементы и подсистемы
ЭП	- электропитание
ЭЦП	- электронная цифровая подпись
A-SCM	- Adaptive Supply Chain Management
DT	- Disaster Tolerance
ITaaS	- IT as a Service)
SaaS	- Software as a Service
PaaS	- Platform as a Service
IaaS	- Infrastructure as a Service

Список литературы

1. Авиженис, А. Отказоустойчивость – свойство, обеспечивающее постоянную работоспособность цифровых систем / А. Авиженис // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66, № 10. – С. 5–25
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
3. Андреев, В. Л. Классификационные построения в экологии и систематике / В. Л. Андреев. – М.: Наука, 1980. – 142 с.
4. Андрейчиков, А. В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике: учебник / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 368 с.
5. Андрейчиков, А. В. Интеллектуальные информационные системы: учебник / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 424 с.
6. Анисимов, В. Г. Методы и модели оптимизации в управлении развитием сложных технических систем / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов. – СПб.: Политехника, 2004. – 280 с.
7. Анисимов, В. Г. Инвестиционный анализ в условиях неопределенности / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Г. А. Ботвин. – СПб.: СПГПУ, 2006. – 288 с.
8. Антонов, Ю. В. Надёжность и безопасность информационно–управляющих систем (методы оценивания и контроля) / Ю. В. Антонов, В. П. Белов, А. Д. Голяков и др. – СПб.: ОАО “НИИ ТМ”, 2004. – 326 с.
9. 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
10. Атанс, М. Оптимальное управление / М. Атанс, П. Фалб. – М.: Машиностроение, 1968. – 764 с.

- 11.Афанасьев, В. Г. Методы анализа надёжности и критичности отказов сложных систем: учебное пособие / В. Г. Афанасьев, В. А. Зеленцов, А. Н. Миронов. – СПб.: МО, 1992. – 99 с.
- 12.Ахметов, Р. Н. Концепция автономного управления живучестью КА ДЗЗ в аномальных ситуациях / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // Механика и машиностроение. Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – том 11, №3. – С. 165-176
- 13.Ахметов, Р. Н. Особенности обеспечения целевой эффективности космических аппаратов зондирования Земли на основе методов рефакторинга и обратной инженерии / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // Онтология проектирования. – 2012. – № 4. – С. 7–17
- 14.Ахметов, Р. Н. Принципы управления космическими аппаратами мониторинга Земли в аномальных ситуациях / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // Информационно–управляющие системы. – 2012. – № 1. – С. 16–22
- 15.Балашов, Е. П. Эволюционный синтез систем / Е. П. Балашов. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
- 16.Бармен, Скотт Разработка правил информационной безопасности / Скотт Бармен. – М.: Вильямс, 2002. – 208 с.
- 17.Башлыков, А. А. Проектирование систем принятия решений в энергетике / А. А. Башлыков. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 120 с.
- 18.Беленков, В. Г. Катастрофоустойчивость корпоративных информационных систем. Часть 1 / В. Г. Беленков, В. И. Будзко, И. Н. Сеницын. – М.: ИПИ РАН, 2002.
- 19.Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.
- 20.Беллман, Р. Процессы регулирования с адаптацией / Р. Беллман. – М.: Наука, 1964. – 359 с.

21. Белов, П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: учебное пособие для студ. высш. учеб. Заведений / П. Г. Белов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 512 с.
22. Березюк, Н. Т. Живучесть микропроцессорных систем управления / Н. Т. Березюк, А. Я. Гапунин, Н. И. Подлесный. – К.: Техника, 1988. – 143 с.
23. Богатырев, В. А. Децентрализованное динамическое распределение запросов в многомашиных вычислительных системах / В. А. Богатырев // Электронное моделирование. – 1994. – Т. 16, №3. – С. 38 – 43
24. Богатырев, В. А. Децентрализованный метод динамического распределения запросов в отказоустойчивых многомашиных вычислительных системах / В. А. Богатырев // Автоматика и вычислительная техника. – 1993. – № 3. – С. 73–75
25. Богатырев, В. А. К повышению надежности вычислительных систем на основе динамического распределения функций / В. А. Богатырев // Изв. вузов. Приборостроение. – 1981. – № 8. – С. 62–65
26. Богатырев, В. А. Мультипроцессорные системы с динамическим перераспределением запросов через общую магистраль / В. А. Богатырев // Изв. вузов. Приборостроение. – 1985. – № 3. – С. 33–38
27. Богатырев, В. А. Надежность вариантов размещения функциональных ресурсов в однородных вычислительных сетях / В. А. Богатырев // Электронное моделирование. – 1997. – № 3. – С. 21–29
28. Богатырев, В. А. Отказоустойчивые многомашиные вычислительные системы динамического распределения запросов при дублировании функциональных ресурсов / В. А. Богатырев // Изв. вузов. Приборостроение. – 1996. – № 4. – С. 81–84
29. Богатырев, В. А. Протоколы динамического перераспределения запросов в распределенных вычислительных системах / В. А. Богатырев // Электронное моделирование. – 1996. – № 3. – С. 24–27
30. Богатырев, В. А. Счетно–эстафетный децентрализованный метод динамического распределения запросов в многомашиных вычислительных системах

- / В. А. Богатырев // Автоматика и вычислительная техника. – 1993. – № 1. – С. 10–13
31. Борисов, А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига: Зинанте, 1990. – 184 с. 7–3
32. Бородакий, Ю. В. Информационные технологии. Методы, процессы, системы / Ю. В. Бородакий, Ю. Г. Лободинский. – М.: Радио и связь, 2002. – 451 с.
33. Бородакий, Ю. В. Основы теории систем управления (исследование и проектирование) / Ю. В. Бородакий, Ю. Г. Лободинский. – М.: Радио и связь, 2004. – 256 с.
34. Бородакий, Ю. В. О функциональной устойчивости информационно-вычислительных систем / Ю. В. Бородакий, А. А. Тарасов // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2006. – № 7. – С. 79–93
35. Боронин, В. А. Отказоустойчивые вычислительные системы / В. А. Боронин, А. А. Тарасов, А. Н. Королев, А. Э. Клещенко. – Рига: МО СССР, 1990. – 56 с.
36. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо-Ю-Ши. – М.: Наука, 1972. – 544 с.
37. Будзко, В. И. К выбору варианта построения катастрофоустойчивых информационно-телекоммуникационных систем / В. И. Будзко, В. Г. Беленков, П. А. Кейер // Системы и средства информатики. – М.: Наука, 2003. – вып. 13. – С. 16–40
38. Будзко, В. И. Проблемы создания катастрофоустойчивых автоматизированных систем банковских расчетов / В. И. Будзко, В. Г. Беленков, П. А. Кейер // Системы и средства информатики. – М.: Наука, 2002. – вып. 12. – С. 48–57
39. Букатова, И. Л. Эволюционное моделирование и его приложения / И. Л. Букатова. – М.: Наука, 1979. – 232 с.
40. Бурбаки, Н. Теория множеств / Н. Бурбаки. – М.: Мир, 1965. – 456 с.

- 41.Верзилин, Д. Н. Методологические и методические основы создания и применения катастрофоустойчивых информационных систем / Д. Н. Верзилин, М. Ю. Охтилев, А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Системный анализ и информационные технологии : труды второй международной конференция САИТ–2007, РФ, г. Обнинск, 10–14 сентября 2007 года. – М.: ЛКИ, 2007. – Т. 2. – С. 245–246
- 42.Верзилин, Д. Н. Постановка и возможные пути решения задачи синтеза облика катастрофоустойчивой информационной системы / Д. Н. Верзилин, А. Н. Павлов, С. А. Потрясаев, Б. В. Соколов // Информационная безопасность регионов России : материалы V Санкт–Петербургской межрегиональной конференции ИБРР–2007, РФ, г. Санкт–Петербург, 23–25 октября 2007 года. – СПб.: СПОИСУ, 2007. – С. 45–46
- 43.Военная системотехника и системный анализ. Модели и методы принятия решений в сложных организационно–технических комплексах в условиях неопределённости и многокритериальности: 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.
- 44.Гаврилов, Г. П. Задачи и упражнения по дискретной математике: учебное пособие / Г. П. Гаврилов, А. А. Сапоженко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
- 45.Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
- 46.Галатенко, В. А. Стандарты информационной безопасности / В. А. Галатенко. – М.: Интернет–университет информационных технологий, 2006. – 264 с.
- 47.Гахов, В. Р. Нечеткий регулятор системы сближения космических аппаратов / В. Р. Гахов, А. Н. Павлов // Инфотелекоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании: сборник трудов I международной научно–технической конференции. – Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2004. – С. 136–143

48. Горбатов, В. А. Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика / В. А. Горбатов. – М.: Наука. Физматлит, 2000. – 544 с.
49. Горбатов, В. А. Дискретная математика: учебник для студентов вузов / В. А. Горбатов, А. В. Горбатов, М. В. Горбатова. – М.: АСТ «Астрель», 2003. – 447 с.
50. Городецкий, В. И. Технология разработки прикладных многоагентных систем в инструментальной среде MASDK / В. И. Городецкий, О. В. Карсаев // Труды СПИИРАН. – СПб.: Наука, 2006. – вып. 3, т. 1. – С. 11–32
51. Городецкий, В. И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения / В. И. Городецкий // Новости искусственного интеллекта. – М.: ЦНИЭИуголь, 1996. – № 1. – с. 44 – 59
52. Горопашная, А. В. Методы анализа безопасности сложных технических систем : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.01 / Горопашная Анастасия Визвуховна. – СПб., 2009. – 17 с.
53. ГОСТ 24.702–85 Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Эффективность автоматизированных систем управления. Основные положения. – М.: ИПК издательство стандартов, 1986. – 4 с.
54. ГОСТ 27.310–95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – М.: ИПК издательство стандартов, 1998. – 12 с.
55. ГОСТ Р 51901.12–2007 Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. – М.: Стандартиформ, 2008. – 35 с.
56. ГОСТ Р 53802-2010 Системы и комплексы космические. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2011. – 28 с.
57. Гэри, М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
58. Данциг, Дж. Линейное программирование, его применения и обобщения / Дж. Данциг. – М.: Прогресс, 1965. – 600 с.

- 59.Добановский, С. А. Системы автоматического управления с реконфигурацией / С. А. Добановский, Н. А. Озерянный // Измерение, контроль, автоматизация. – 1990. – № 4(76). – С.62–80
- 60.Додонов, А. Г. Введение в теорию живучести вычислительных систем / А. Г. Додонов, М. Г. Кузнецова, Е. С. Горбачик, отв. ред. В. А. Гуляев. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с.
- 61.Додонов, А. Г. Живучесть информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. – К.: Наукова думка, 2011. – 256 с.
- 62.Дюбуа, Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад. – М.: Радио и связь, 1990. – 280 с.
- 63.Ефремов, А. С. Критерии предельного состояния координатных АТС / А. С. Ефремов, В. А. Зеленцов, А. Н. Миронов, К. А. Холоименко // Вестник связи. – 2004. – №2. – С. 71–76
- 64.Заде, Л. Теория линейных систем. Метод пространства состояний / Л. Заде, Ч. Дезоер. – М.: Наука, 1970. – 704 с.
- 65.Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
- 66.Зайченко, Ю. П. Исследование операций. Нечеткая оптимизация / Ю. П. Зайченко. – К.: Выща школа, 1991. – 193 с.
- 67.Запечников, С. В. Информационная безопасность открытых систем. Том 1. Угрозы, уязвимости, атаки и подходы к защите / С. В. Запечников, Н. Г. Милославская, А. И. Толстой, Д. В. Ушаков. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2006. – 536 с.
- 68.Запечников, С. В. Информационная безопасность открытых систем. Том 2. Средства защиты в сетях / С. В. Запечников, Н. Г. Милославская, А. И. Толстой, Д. В. Ушаков. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2008. – 560 с.
- 69.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
70. 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
71. 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
72. Земляков, С. Д. Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах / С. Д. Земляков, В. Ю. Рутковский, А. В. Силаев // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 2. – С. 3–20
73. Иванов, В. А., Фалдин Н.В. Теория оптимальных систем автоматического управления / В. А. Иванов, Н. В. Фалдин. – М.: Наука, 1981. – 307 с.
74. Иванов, Д. А. Supply Chain Managment: концепции, технологии, модели / Д. А. Иванов. – СПб.: Изд–во Политехн. Ун–та, 2005. – 172 с.
75. Иванов, Д. А. Виртуальные предприятия и логистические цепи: комплексный подход к организации и оперативному управлению в новых организационных формах производственной кооперации / Д. А. Иванов. – СПб.: Изд–во СПбГУЭФ, 2003. – 86 с.
76. Иванов, Д. А. Управление цепями поставок / Д. А. Иванов. – СПб.: Изд–во Политехн. ун–та, 2009. – 660 с.
77. Имаев, Д.Х. Методика расчета отказоустойчивости систем управления технологическими процессами / Д.Х. Имаев, М.Ю. Шестопапов // Технические науки - от теории к практике. - 2013. - № 18. - С. 19-25.
78. Имитационное моделирование производственных систем / А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев, В. И. Плескунин и др.; под общ. ред. А. А. Вавилова. – М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983. – 416 с.

79. Иыуду, К. А. Надёжность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем: учебное пособие для вузов по спец. «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети» / К. А. Иыуду. – М.: Высш. шк., 1989. – 216 с.
80. Калинин, В. Н. В основе высшего образования – системный подход / В. Н. Калинин, Ю. С. Мануйлов, А. Н. Павлов, А. В. Петрошенко // Современный этап модернизации российского образования : сб. материалов всероссийской научно–практической конференции. – СПб., 2004. – С. 96–103
81. Калинин, В. Н. Теория систем и управления (структурно–математический подход) / В. Н. Калинин, Б. А. Резников. – Л.: ВИКИ, 1987. – 417 с.
82. Каляев, И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
83. Капица, С. П. Синергетика и прогнозы будущего. Серия «Синергетика: от прошлого к будущему» / С. П. Капица, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинецкий. – 3-е изд. – М.: УРСС, 2003. – 288 с.
84. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
85. Кирилин, А. Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А. Н. Кирилин, Р. П. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб. – М.: Машиностроение, 2012. – 384 с.
86. Клементьев, И. П. Введение в облачные вычисления / И. П. Клементьев, В. А. Устинов. – М.: УГУ, 2007. – 233 с.
87. Коломейко, В. В. Проблемы адаптации и реконфигурации многопроцессорных систем повышенной живучести / В. В. Коломейко // Искусственный интеллект. – 2005. – № 4. – С. 217–223
88. Концепция формирования в Российской Федерации электронного правительства до 2010 года, одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации № 632–р; 6 мая 2008 г.

89. Корноушенко, Е. К. Управление процессами в слабоформализованных средах при стабилизации графовых моделей среды / Е. К. Корноушенко, В. И. Максимов // Труды института проблем управления РАН. – 1999. – Т. 2. – С. 82–94
90. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
91. Кравец, В. Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами / В. Г. Кравец. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
92. Кравец, В. Г. Основы управления космическими полетами / В. Г. Кравец, В. Е. Любинский. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.
93. Кривулец, В. Г. Об оценках надежности монотонных структур / В. Г. Кривулец, В. П. Полесский // Проблемы передачи информации. – 2001. – Т.37, №4. – С.112–129
94. Кузнецов, С. Распределенный интеллект сети. Обзор ноябрьского, 2002 года номера журнала Computer (IEEE Computer Society, V. 15, No. 11, 2002) [Электронный ресурс] / С. Кузнецов // Открытые системы. – 2002. – № 12. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2002/12/182284/>
95. Кульба, В. В. Анализ устойчивости социально–экономических систем с использованием знаковых орграфов / В. В. Кульба, П. Б. Миронов, В. М. Назаретов // Автоматика и телемеханика. – 1993. – № 7. – С. 130–137
96. Кульба, В. В. Методы формирования сценариев развития социально–экономических систем / В. В. Кульба, Д. А. Кононов, С. А. Косяченко, А. Н. Шубин. – М.: СИНТЕГ, 2004. – 291 с.
97. Ларичев, О. И. Наука и искусство принятия решений / О. И. Ларичев. – М.: Наука, 1979. – 200 с.
98. Ларичев, О. И. Объективные модели и субъективные решения / О. И. Ларичев. – М.: Наука, 1987. – 143 с.
99. Лепихин, А. М. Вероятностный риск–анализ конструкций технических систем / А. М. Лепихин, Н. А. Махутов, В. В. Москвичев, А. П. Черняев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 174 с.

100. Литвак, Б. Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа / Б. Г. Литвак. – М.: Радио и связь, 1982.–184 с.
101. Лэсдон, Л. С. Оптимизация больших систем / Л. С. Лэсдон. – М.: Наука, 1975. – 432 с.
102. Маевский, Л. С. Методы обеспечения надёжности информационно–телекоммуникационных систем на различных этапах жизненного цикла / Л. С. Маевский. – СПб.: Издатель Барзилович З.П., 1999. – 112 с.
103. Максимов, В. И. Структурно–целевой анализ развития социально–экономических ситуаций / В. И. Максимов // Проблемы управления. – 2005. – № 3. – С. 30–38
104. Мануйлов, Ю. С. Методика прогнозирования структурной устойчивости функционирования АСУ КА / Ю.С. Мануйлов, А.Н. Павлов, Д.А. Павлов // Сборник «Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского». – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2013. – Вып. 640. – С. 123-128
105. 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.
106. Мануйлов, Ю. С. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю. С. Мануйлов, В. Н. Калинин, В. С. Гончаревский, И. И. Делий, Е. А. Новиков; под общ. ред. Ю. С. Мануйлова. – СПб.: ВКА, 2010. – 609 с.
107. 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, 2010. – 266 с.
108. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, Я. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

109. Месарович, М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахара. – М.: Мир, 1978. – 312 с.
110. Методы анализа и синтеза структур управляющих систем / Б. Г. Волик, Б. Б. Буянов, Н. В. Лубков и др.; под ред. Б. Г. Волик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 296 с.
111. 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
112. Многокритериальные задачи принятия решений / под ред. Д. М. Гвишиани, С. В. Емельянова. – М.: Машиностроение, 1978.–192 с.
113. Можаяев А. С. Теоретические основы общего логико–вероятностного метода автоматизированного моделирования систем / А. С. Можаяев, В. Н. Громов. – СПб.: ВИТУ, 2000. – 145 с.
114. Можаяев, А. С. Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем / А. С. Можаяев // Моделирование и Анализ Безопасности и Риска: труды третьей международной научной школы МАБР – 2003 (РФ, СПб, 20–23августа 2003 г.). – СПб.: СПбГУАП, 2003. – С. 101–110
115. Моисеев, Н. Н. Элементы теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1975. – 528 с.
116. Морозов, В. П. Элементы теории управления ГАП. Математическое обеспечение / В. П. Морозов, Я. С. Дымарский. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. – 336 с.
117. Москвин, Б. В. Оптимизация передачи данных в вычислительной сети с коммутацией пакетов / Б. В. Москвин // Тез. докл. I Всесоюзн. конф. «Компак 87». – Рига, 1987. – С. 168–171

118. Москвин, Б. В. Теория принятия решений: учебник / Б. В. Москвин. – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2004, – 383 с.
119. 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, 2005. – 260 с.
120. 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
121. 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
122. Надёжность и эффективность в технике: справочник в 10–ти т. / Ред. совет: В. С. Авдучевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1988. – т.3. Эффективность технических систем / под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – 327 с.
123. Надёжность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
124. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 382с.
125. Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
126. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
127. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / под ред. Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 409 с.

128. Об организации предоставления государственных и муниципальных услуг: федер. закон от 27.07.2010 г. № 210–ФЗ / Правовой сервер "Консультант Плюс" / [Электронный ресурс] / Режим доступа: www.consultant.ru
129. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
130. 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
131. Осипенко, С. А. Динамическая реконфигурация информационных систем специального назначения / С. А. Осипенко, А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения: материалы научной конференции в честь 20–летия ФГУП «Концерн «Системпром»: под общей редакцией члена–корреспондента РАН, доктора технических наук, профессора Ю.В. Бородакия. – М.: ФГУП «Концерн «Системпром», 2011. – С. 43–44
132. Осипенко, С. А. Исследование безопасности сложных технических объектов / С. А. Осипенко, А. Н. Павлов // Известия Вузов. Приборостроение. – 2010. – том №53, №11. – С. 27–31
133. Острейковский, С. А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / С. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев. – М.: Физматлит, 2008. – 349 с.
134. Охтилев, М. Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа / М. Ю. Охтилев. – СПб.: ВИКИ им. А.Ф.Можайского, 1998. – 161 с.
135. 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: мате-

- риалы докладов VIII Всероссийской школы–семинара (РФ, Апатиты, 29 марта – 2 апреля 2010 г.). – Апатиты: КНЦ РАН, 2010. – С. 54–56
136. 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
137. Охтилев, М. Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
138. Павлов, А. Н. Анализ топологии π - $\tilde{n}d\tilde{o} \acute{a}e$ 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
139. 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
140. Павлов, А. Н. Исследование немонотонных систем: анализ «мостиковой» структуры / А. Н. Павлов // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды X Международной научной школы МАБР–2010 (РФ, Санкт–Петербург, 6–10 июля 2010 г.). – СПб.: ГУАП, 2010. – С. 85–93
141. 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
142. 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
143. 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 Междуна-

- родной научно–технической конференции (РФ, Воронеж, 12–14 мая 2010 г.). – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 2010. – С. 483–492
144. 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
145. 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
146. Павлов, А. Н. Методы принятия решений по управлению КА и средствами наземного комплекса в особые периоды обстановки на основе применения аппарата нечетких множеств и мер / А. Н. Павлов // Сб. трудов 1–й Космической НПК. – СПб.: МО РФ, 2003. – том 3. – С. 139–144
147. Павлов, А. Н. Нечетко–возможностный подход к анализу и оцениванию безопасности сложных организационно–технических систем / А. Н. Павлов // Региональная информатика–2008: материалы XI Санкт–Петербургской международной конференции РИ–2008 (РФ, г. Санкт–Петербург, 22 – 24 октября 2008 г.). – СПб.: СПОИСУ, 2008. – С. 48–49
148. 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 2011г.). – СПб.: СПбГИЭУ, 2011. – С. 284–287
149. 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

150. 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
151. Павлов, А. Н. Структурная реконфигурации сложных объектов / А. Н. Павлов, В. А. Зеленцов, А. Ю. Кулаков // Надежность и качество: труды международного симпозиума (РФ, Пенза, 21–31 мая 2012 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – т. 1. – С. 146–148
152. Павлов, А. Н., Кокорин С.В., Соколов Б.В. Концептуальная модель и методологические основы реконфигурации информационно-вычислительной системы / А. Н. Павлов // 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
153. Павлов, А. Н. Способ формализованного описания и анализа структур сложных объектов / А. Н. Павлов, А. Ю.Кулаков, А. В. Войтович // Информационные технологии в управлении: материалы конференции ИТУ–2012. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2012. – С. 317–320
154. Павлов, А. Н. Направления решения проблемы планирования структурно–функциональной реконфигурации сложных объектов / А. Н. Павлов, А. Ю. Кулаков, А. В. Войтович, Д. А. Павлов // Региональная информатика – 2012: труды XIII Санкт–Петербургской международной конференции РИ–2012 (РФ, г. Санкт–Петербург, 24 – 26 октября 2012 г.). – СПб.: СПОИСУ, 2012. – С. 48
155. Павлов, А. Н. Многокритериальный анализ критичности отказов функциональных элементов общесудовых систем и канализации электроэнергии судна / А. Н. Павлов, А. Ю. Кулаков, Д. А. Павлов // Современные технологии автоматизации процессов борьбы за живучесть: материалы пер-

- вой научно–практической конференции АПБЖ–2012 (РФ, Санкт-Петербург, 6 декабря 2012 г.). – СПб.: ОАО «Концерн «НПО «Аврора», 2012. – С. 72–73
156. 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
157. 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.
158. 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
159. Павлов, А. Н. Об оценках структурной устойчивости монотонной системы / А. Н. Павлов, А. В. Панькин, А. Ю. Кулаков // Кибернетика и высокие технологии XXI века: тез. докладов XIII Международной научно–технической конференции (РФ, Воронеж, 15–17 мая 2012 г.). – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 2012. – С. 22–31
160. Павлов, А. Н. Применение методов кластерного анализа для обнаружения вторжений в компьютерные системы / А. Н. Павлов, В. В. Платонов // Информационная безопасность регионов России: сборник трудов III Санкт–Петербургской межрегиональной конференции ИБРР–2003. – СПб.: СПбГПУ, 2003. – С. 72–73
161. Павлов, А. Н. Алгоритм поиска равнооптимальных планов применения мобильных средств управления космическими аппаратами / А. Н. Павлов, М. Ю. Скопин // Сборник трудов третьей военно–научной конференции Космических войск. – СПб.: МО РФ, 2007

162. Павлов, А. Н. Структурный анализ катастрофоустойчивой информационной системы / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов // Труды СПИИРАН. – 2009. – Выпуск № 8. – С. 128–151
163. 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
164. 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
165. 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
166. 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
167. 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

168. 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
169. 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
170. 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
171. 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
172. Павлов, А. Н. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учебное пособие / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб.: ГУАП, 2006. – 72 с.
173. Павлов, А. Н. Системный анализ организационных структур управления: учебное пособие / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб.: ГУАП, 2006. – 40 с.
174. 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 «Имитационное 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
175. Павлов, А. Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов / А. Н. Павлов // Труды СПИИРАН. – 2013. – Выпуск № 5. – С. 143–168
176. Павлов, А. Н. Функциональная реконфигурация чувствительных элементов системы управления движением космического аппарата / А. Н. Павлов, А. Ю. Кулаков, Д. А. Павлов // Труды СПИИРАН. – 2013. – Выпуск № 5. – С. 169–181
177. Павлов, А. Н. Подход к прогнозированию структурной устойчивости сложных объектов / А.Н. Павлов, Д.А. Павлов // Т-Сотт - Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Выпуск № 6. – С. 65-67
178. 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.
179. Павлов, А. Н. Методика многокритериального оценивания интегральных вкладов элементов и подсистем наземной и орбитальной группировок АСУ КА наблюдения в показатель надежности ее функционирования / А.Н. Павлов, К.Л. Григорьев, В.А. Воротягин, Д.А. Павлов // Всероссийская научно-техническая конференция «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения», 29-30 октября 2013 г., Санкт-Петербург: Труды конференции / Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского – СПб, 2013, С. 78-85
180. Панкратова, Н. Д. Концептуальные основы системного анализа рисков в динамике управления безопасностью сложных систем. Ч.1. Основные утверждения и обоснование подхода / Н. Д. Панкратова, Б. Н. Курилин // Проблемы управления и информатики. – 2000. – №6. – С. 110–130

181. Пападимитриу, Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – М.: Мир, 1984. – 512 с. 34–1
182. 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.
183. 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.
184. 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.
185. Петренко, С. А. Управление информационными рисками / С. А. Петренко. – М.: Компания АйТи; ДМК Пресс, 2004. – 384 с.
186. Петренко, С. А. Политики информационной безопасности / С. А. Петренко, В. А. Курбатов. – М.: Компания АйТи, 2006. – 400 с.
187. Подиновский, В. В. Математическая теория выработки решений в сложных ситуациях / В. В. Подиновский. – М.: МО СССР, 1981. – 212 с.
188. Подиновский, В. В. Оптимизация по последовательно применяемым критериям / В. В. Подиновский, В. М. Гаврилов. – М.: Советское радио, 1975. – 192 с.
189. Подиновский, В. В. Парето–оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 254 с.
190. Подлесный, Н. И. Специальные методы идентификации, проектирования и живучесть систем управления / Н. И. Подлесный, А. А. Рассоха, С. П. Левков. – К.: Выща школа, 1990. – 446 с.
191. Половко, А. М. Основы теории надёжности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – СПб.: БХВ–Петербург, 2008. – 704 с.
192. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкредидзе, Е. Ф. Мищенко. – М.: Физматгиз, 1961. – 391 с.

193. Применение общего логико–вероятностного метода для анализа технических, военных организационно–функциональных систем и вооруженного противоборства: монография, научное издание / В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свирин, И. А. Гладкова; под ред. А. С. Можаяева. – СПб.: СПб–региональное отделение РАЕН, 2011. – 416 с.
194. Программный комплекс решения задач анализа и оценивания структурной надежности катастрофоустойчивых информационных систем на основе логико–вероятностного и нечетко–возможностного методов: отчет о НИР Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект №О–2.3/03) / Р. М. Юсупов, Б. В. Соколов, М. Ю. Охтилев, А. Н. Павлов и др. – СПб.: СПИИРАН, 2009. – 108 с.
195. Пытьев, Ю. П. Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение / Ю. П. Пытьев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 464 с.
196. Разработка комбинированных методов и алгоритмов адаптивного планирования и управления модернизацией и функционированием катастрофоустойчивых информационных систем: отчет о НИР Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект №О–2.3/03) / Р. М. Юсупов, Б. В. Соколов, М. Ю. Охтилев, А. Н. Павлов и др. – СПб.: СПИИРАН, 2008. – 108 с.
197. Разработка методов и алгоритмов моделирования жизненных циклов мобильных информационных технологий: отчет о НИР Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект №О–2.3/03) / Р. М. Юсупов, Б. В. Соколов, М. Ю. Охтилев, А. Н. Павлов и др. – СПб.: СПИИРАН, 2010. – 126 с.
198. Разработка методов и алгоритмов моделирования жизненных циклов мобильных информационных технологий: отчет о НИР Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект №О–2.3/03) / Р. М. Юсупов, Б. В. Соколов, М. Ю. Охтилев, А. Н. Павлов и др. – СПб.: СПИИРАН, 2011. – 111 с.

199. Разработка методологических основ комплексного моделирования жизненных циклов мобильных информационных технологий: отчет о НИР Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект №О–2.3/03) / Р. М. Юсупов, Б. В. Соколов, М. Ю. Охтилев, А. Н. Павлов и др. – СПб.: СПИИРАН, 2007. – 63 с.
200. Райншке, К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райншке, И. А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с. 2–2 22–В
201. Растригин, Л. А. Адаптация сложных систем / Л. А. Растригин. – Рига: Зинанте, 1981. – 375 с.
202. Растригин, Л. А. В мире случайных событий / Л. А. Растригин. – Рига: Издательство Академии наук Латвийской ССР, 1963. — 80 с.
203. Растригин, Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растригин. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.
204. Резников, Б. А. Анализ и оптимизация сложных систем. Планирование и управление в АСУ / Б. А. Резников. – Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1981. – 148 с.
205. Резников, Б. А. Методы и алгоритмы оптимизации на дискретных моделях сложных систем / Б. А. Резников. – Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1983. – 250 с.
206. Резников, Б. А. Системный анализ и методы системотехники: Методология системных исследований. Моделирование сложных систем: учебник / Б. А. Резников. – Л.: МО СССР, 1990. – 522 с.
207. Робертс, Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Ф. С. Робертс. – М.: Наука, 1986. – 497 с.
208. Родичев, Ю. Информационная безопасность: Нормативно–правовые аспекты / Ю. Родичев. – СПб.: Питер, 2008. – 272 с.
209. Ростовцев, Ю. Г. Основы построения автоматизированных систем сбора и обработки информации: учебник / Ю. Г. Ростовцев. – СПб.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1992. – 717 с.

210. Рябинин, И. А. Надёжность и безопасность сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
211. Рябинин, И. А. Надёжность технических систем. Принципы и анализ / И. А. Рябинин. – М.: Мир, 1976. – 532 с.
212. Рябинин, И. А. Логико–вероятностные методы исследования надёжности структурно–сложных систем / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 166 с.
213. Саати, Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т. Саати. – М.: ЛКИ, 2008. – 360 с.
214. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
215. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
216. Северцев, Н. А. Системный анализ теории безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – М.: Изд–во МГУ "ТЕИС", 2009. – 457 с.
217. Силов, В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке / В. Б. Силов. – М.: ИНПРО–РЕС, 1995. – 228 с.
218. Системный анализ и концептуальное моделирование проблемы многокритериального оценивания и анализа рисков при выработке управленческих решений в катастрофоустойчивой информационной системе: отчет о НИР Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.11) / Р. М. Юсупов, Б. В. Соколов, М. Ю. Охтилев, А. Н. Павлов и др. – СПб.: СПИИРАН, 2012. – 96 с.
219. Скурихин, В. И. Адаптивные системы управления машиностроительным производством / В. И. Скурихин, В. А. Забродский, Ю. В. Копейченко. – М.: Машиностроение, 1989. – 207 с.
220. Смирнов, А. В. Интеллектуальная поддержка реинжиниринга конфигураций производственных систем / А. В. Смирнов // Программные продукты и системы. – 1998. – № 3. – С. 10 – 12

221. Смирнов, А. В. Децентрализованная интеллектуальная поддержка принятия решений при управлении чрезвычайными ситуациями / А. В. Смирнов, А. М. Кашевник, Т. В. Левашов, Н. Г. Шилов // Материалы докладов одиннадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (РФ, Дубна, 29 сентября–3 октября 2008 г.). – М.: ЛЕНАНД, 2008. – Т. 2. – С. 253 – 261
222. Смирнов, А. В. Поддержка принятия решений в децентрализованной среде на основе сети Web–сервисов / А. В. Смирнов, Т. В. Левашов, Н. Г. Шилов, А. М. Кашевник // Таврический вестник информатики и математики. – Симферополь: КНЦ НАНУ, 2008. – № 2. – С. 186 – 194
223. Соколов, Б. В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами / Б. В. Соколов. – СПб.: МО, 1992. – 232 с.
224. Соколов, Б. В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов / Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов // Изд. РАН. Теория и системы управления. – 2004. – №6. – С. 5–16
225. Соловьев, А. В. Метод обеспечения отказоустойчивости распределенных систем управления со случайным потоком заявок и статическим распределением задач / А. В. Соловьев, Е. Н. Турута // Управление ресурсами в интегральных сетях. – М.: Наука, 1991. – С. 109–116
226. Соложенцев, Е. Д. Сценарное логико–вероятностное управление риском в бизнесе и технике / Е. Д. Соложенцев. – СПб.: Издательский дом «Бизнес–пресса», 2004. – 432 с.
227. Спесивцев, А. В. Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации / А. В. Спесивцев. – СПб: Изд–во Политехн. ун–та, 2004. – 238 с.
228. Табак, Д. Оптимальное управление и математическое программирование / Д. Табак, Б. Куо. – М.: Наука, 1975. – 280 с.
229. Тарасов, А. А. Методы функциональной реконфигурации отказоустойчивых систем / А. А. Тарасов // Надежность. –2002. – № 2. – С. 29–35

230. Тарасов, А. А. Проблема обеспечения гарантоспособности информационных систем и пути ее решения / А. А. Тарасов // Системы безопасности, связи и телекоммуникаций. – 2000. – № 32. – С. 78–80
231. Тарасов, А. А. Управление функциональной реконфигурацией отказоустойчивых систем / А. А. Тарасов // Информационные технологии. – 2000. – № 8. – С. 11–15
232. Тарасов, А. А. Функциональная устойчивость компьютерных систем как фактор обеспечения их информационной безопасности / А. А. Тарасов // Информационная безопасность России в условиях глобального информационного общества: материалы 3–й Всероссийской конференции (РФ, Москва, 7-8 февраля 2002 г.). – М., 2002. – С. 193–200
233. Тарасов, В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика / В. Б. Тарасов. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
234. Теория и применение случайного поиска / под общей ред. Л. А. Растригина. – Рига: Зинатне, 1969. – 305 с.
235. Технология системного моделирования / Е. Ф. Аврамчук, А. А. Вавилов, С. В. Емельянов и др.; под общ. ред. С. В. Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988. – 520 с.
236. Трахтенброт, Б. А., Барздинь Я.М. Конечные автоматы (поведение и синтез) / Б. А. Трахтенброт, Я. М. Барздинь. – М.: Наука, 1970. – 400 с.
237. Турута, Е. Н. Конспект лекций по дисциплине: «Распределенные вычислительные системы и сетевые технологии» - раздел «Отказоустойчивость распределенных вычислительных систем» / Е. Н. Турута. – М.: МТУСИ, 2001. – 24 с.
238. Турута, Е. Н. К вопросу о построении отказоустойчивых распределенных управляющих систем / Е. Н. Турута // Распределенные системы передачи и обработки информации. – М.: Наука, 1985.
239. Турута, Е. Н. Обеспечение отказоустойчивости многопроцессорных систем путём перераспределения задач отказавших модулей / Е. Н. Турута //

- Системы управления информационных сетей. – М.: Наука, 1983. – С. 183–198
240. Турута, Е. Н. Обеспечение отказоустойчивости управляющих много-микропроцессорных систем путем перераспределения задач отказавших модулей / Е. Н. Турута // Системы управления информационных сетей. – М.: Наука, 1983. – С. 187–198
241. Турута, Е. Н. Организация распределения задач в вычислительных системах, обеспечивающая их отказоустойчивость / Е. Н. Турута // Автоматика и вычислительная техника. – 1985. – № 1. – С. 5–14
242. Турута, Е. Н. Отказоустойчивое размещение функций в распределенной информационно–вычислительной системе / Е. Н. Турута // Информационные сети и системы: тез. докладов 2–ой конференция КИСС–93 (РФ, С.–Петербург, 18-20 ноября 1993 г.). – СПб.: СПбГУТ, 1993. – С. 90–91
243. Турута, Е. Н. Распределение задач с целью обеспечения отказоустойчивости многопроцессорных вычислительных систем / Е. Н. Турута, Ч. И. Аскеров, Л. А. Фургина // Сетевые протоколы и управление в распределенных вычислительных системах. – М.: Наука, 1986. – С. 168–174
244. Уткин, Л. В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации / Л. В. Уткин. – СПб.: Наука, 2007. – 404 с.
245. Ушаков, И. А. Построение высоконадежных систем / И. А. Ушаков. – М.: Знание, 1974. – 64 с.
246. Ушаков, И. А. Курс теории надежности систем: учеб. пособие для вузов / И. А. Ушаков. – М.: Дрофа, 2008. – 240 с.
247. Федулов, А. С. Нечеткие реляционные когнитивные карты / А. С. Федулов // Теория и системы управления. – 2005. – № 1. – С. 120–132
248. Фингар, П. Dot.Cloud: облачные вычисления – бизнес–платформа XXI века / П. Фингар. – М.: Акварариновая Книга, 2011. – 256 с. 25–2 17–4
249. Флеминг, У. Оптимальное управление детерминированными и стохастическими системами / У. Флеминг, Р. Ришел. – М.: Мир, 1978. – 318 с.

250. Форрестер, Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М.: Наука, 1978. – 168 с.
251. Хенли, Э. Дж. Надёжность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли., Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
252. Хоар, Ч. Взаимодействующие последовательные процессы / Ч. Хоар. – М.: Мир, 1989. – 264 с.
253. Цвиркун, А. Д. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем: Синтез и планирование развития / А. Д. Цвиркун, В. И. Акинфиев. – М.: Наука, 1993. – 157 с.
254. Цвиркун, А. Д. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем: Оптимизационно–имитационный подход / А. Д. Цвиркун, В. И. Акинфиев, В. А. Филимонов. – М.: Наука, 1985. – 176 с.
255. Цвиркун, А. Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А. Д. Цвиркун. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
256. Цурков, В. И. Декомпозиция в задачах большой размерности / В. И. Цурков. – М.: Наука, 1981. – 352 с.
257. Черноруцкий, И. Г. Методы оптимизации. Компьютерные технологии / И. Г. Черноруцкий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 384 с.
258. Шаньгин, В. Ф. Защита компьютерной информации. Эффективные методы и средства / В. Ф. Шаньгин. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 544 с.
259. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
260. Шестопалов, М.Ю. Системы отказоустойчивого управления технологическими процессами / М.Ю. Шестопалов. - СПб.: Издательство «Элмор», 2013. – 308 с.
261. Шубинский, И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. – Ульяновск, 2012. - 296 с.
262. Шубинский, И. Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. – Ульяновск, 2012. - 216 с.

263. Юдин, Д. Б. Задачи и методы стохастического программирования / Д. Б. Юдин. – М.: Сов. радио, 1979. – 392 с.
264. Юдин, Д. Б. Новые направления в линейном программировании / Д. Б. Юдин, Е. Г. Гольштейн. – М.: Сов. радио, 1966. – 524 с.
265. Юсупов, Р. М. Наука и национальная безопасность / Р. М. Юсупов. – СПб.: Наука, 2006. – 290 с.
266. Яблонский, С. В. Введение в дискретную математику / С. В. Яблонский. – М.: Наука, 1986. – 384 с.
267. Ярушкина, Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем.: учебное пособие / Н. Г. Ярушкина. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
268. Ackoff, R.L. The Art of Problem Solving / R.L. Ackoff. // Wiley-Interscience. – New York, 1978.
269. Astrom, K. J. Introduction to Stochastic Control Theory / K. J. Astrom. – New York: Academic Press, 1970. – 299 p.
270. Barlow, R. E. System Efficiency and Reliability / R. E. Barlow, L. G. Hunter. // Technometrics. – 1960. – V. 2. – № 1.
271. Barron, R. L. Alternative Strategies for Reconfigurable Flight Control / R. L. Barron // Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conf., New Jersey, USA. – 1984. – P. 1313–1320.
272. Briley, B. A New Approach to Switching Network Synthesis / B. Briley // International Conference on Communications Technology, Shanghai, PRC. – 1994.
273. Briley, B. Reliability Polynomial Forensics / B. Briley // Motorola GSG Technology Journal. – 2005.
274. Evgenev, G. B. Multiagent methodology for computer aided design and integrated manufacturing / G. B. Evgenev // Globalization of Manufacturing in the Digital Communications of the 21–st Century: Innovation, Agility and the Virtual Enterprise. Proceedings of Tenth International IFIP WG5.2/5.3 Conference PROLAMAT–98, Trento, ITALY. – Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. – pp. 591–602

275. Ivanov, D. Adaptive Supply Chain Management / D. Ivanov, B. Sokolov. – London: Springer, 2010. – 269 p.
276. Ivanov, D. A. 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
277. 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)
278. 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
279. Kopytov, E.A., Pavlov A.N., Zelentsov V.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. – pp. 4–13
280. Kosko, B. Fuzzy cognitive maps / B. Kosko // Intern. Journal of Man–Machine Studies. – 1986. – Vol. 1. – P. 65–75
281. Mahanian, S. Multiple Mode Failure Detection, Identification and Reconfiguration: the evaluation / S. Mahanian // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf. – 1990. – P. 466–471
282. Napolitano, M. R. An Aircraft Flight Control Reconfiguration Algorithm / M. R. Napolitano, R. L. Swaim // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., Boston, USA. – 1989. – P. 323–332

283. Neustadt, L.W., 1976. Optimization, A Theory of Necessary Conditions / L. W. Neustadt. – Princeton Univ. Press. Princeton, New Jersey, 1976. – 424 p.
284. Newman, M.E.J. The structure and function of complex networks / M. E. J. Newman // SIAM Rev. — 2003. — Vol. 45, pp. 167–256
285. Pavlov, A.N. Conceptual and set–theoretic problem statement of the supply chain controlled reconfiguring / A.N. Pavlov, D.A. Ivanov, B.V. Sokolov // 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
286. Pavlov, A. N. Multi–period optimal inventory–routing planning in multi–stage distribution networks / A.N. Pavlov, D.A. Ivanov, B.V. Sokolov // 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
287. 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
288. Pavlov, A. N. Complex modeling of the structural–functional reconfiguration of supply chain / A.N. Pavlov, B.V. Sokolov, V.A. Zelentsov, A.Yu. Kulakov, D.A. Ivanov // 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, pp. 261–265
289. Rauch, H. E. Intelligent Fault Diagnosis and Control Reconfiguration / H.E. Rauch // IEEE Control Systems Mag. 1994. N 1.
290. Shafer, G. A. Mathematical Theory of Evidence / G.A. Shafer. – Princeton: Princeton Univ. Press, 1976.
291. Structure of Decision. The Cognitive Maps of Political Elites / Ed. by R. Axelrod. — Princeton: Princeton University Press, 1976. – 405 p.

292. Tong, R. M. Linguistic Approach to Decision Making with Fuzzy Sets /R.M. Tong, P.P. Bonnosone // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. – 1981. – Vol. 10, N 1.
293. Tourouta, E. N. The methods for ensuring fault–tolerance of distributed control systems / E.N. Tourouta // IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS' 94). 1994, Helsinki, Finland. Preprints, v. 2, pp.772–777
294. Van der Velde, W. E. Control System Reconfiguration / W.E. Van der Velde // Proc. American Control Conf., 1984, v.3, pp.1741–1745
295. Vassilyev, S. N. Integrated Control Systems with Reconfiguration of Active Plants. Design and Applications / S.N. Vassilyev, S.A. Doganovski et al// Proc. 2nd IFAC Workshop on New Trends in Design of Control Systems. Smolenice: Publ. House “Vydavatel’stvo STU v Bratislave”, 1997.
296. Watts, D. J. Collective dynamics of «smallworld» networks / D.J. Watts, S.H. Strogats // Nature.— 1998.— 393.— pp. 440–442
297. Weiss, J. L. Simulation Results of Automatic Restructurable Flight Control System Concepts / J.L. Weiss, D.P. Looze, J.S. Eterno // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., New York, USA, 1986, pp.190–197