

# СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ КАТАСТРОФОУСТОЙЧИВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

ПАВЛОВ А.Н., СОКОЛОВ Б.В.

---

УДК 519.711.2

*Павлов А.Н., Соколов Б.В. Структурный анализ катастрофоустойчивой информационной системы.*

**Аннотация.** Предлагается комплексный подход к моделированию, оцениванию и анализу сценариев деградации и восстановления структурных состояний катастрофоустойчивой информационной системы (КАИС). Разработано модельно-алгоритмическое обеспечение решения задач определения и реконфигурации структурных состояний КАИС, оценивания и анализа топологии структурных состояний с позиции вероятностного и нечетко-возможностного подходов.

**Ключевые слова:** катастрофоустойчивая информационная система, структурный анализ, многокритериальный полимодельный подход.

*Pavlov A.N., Sokolov B.V. Structural analysis of disaster-tolerance information system.*

**Abstract.** The article is devoted to the complex approach to modeling, estimating and analysis of the scenarios of degradations and recovering the structured conditions of the disaster tolerance information systems (DTIS). Model-algorithmic supply for the decision of the determination and reconfiguration of the structural conditions DTIS, estimating and analysis of topology of structural conditions using probability and fuzzy-probability approaches have been designed.

**Keywords:** disaster tolerance information systems, structural analysis, multicriterion poli-model approach.

---

Анализ существующих и прогнозируемых кризисных и чрезвычайных ситуаций, повсеместно возникающих в настоящее время в различных предметных областях (особенно после известных событий 11 сентября 2001 года в США, веерных отключений систем электроснабжения в США, Европе, РФ и т. п.), показывает, что они перестают быть отраслевыми, а перерастают в аварии и катастрофы, имеющие уже межотраслевой характер. В этих условиях исследовать и решать задачи повышения *катастрофоустойчивости* как бизнес-процессов, так и информационных систем (ИС), обеспечивающих их выполнение, а также создания соответствующих катастрофоустойчивых ИС, необходимо уже в рамках междисциплинарного подхода, интерпретируя их как задачи управления структурной динамикой (УСД) указанными процессами и системами [1].

Особую опасность для современных катастрофоустойчивых ИС представляют причины, которые приводят к возникновению кризисных ситуаций, аварий и катастроф, имеющих природно-экологические, технико-производственные или антропогенно-социальные причины

[2]. При этом спектр угроз экономической, физической и информационной безопасности, а также перечень уязвимостей аппаратно-программной и информационной инфраструктур ИС постоянно растет [2–4].

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 бизнес-процессов (БП) и повышение катастрофоустойчивости соответствующих производственных систем (бизнес-систем (БС)), входящих в состав современных предприятий (в том числе и виртуальных предприятий (ВП)) является одним из важнейших стратегических направлений развития экономики. Это обусловлено необходимостью сохранять устойчивость и стабильность функционирования КАИС в различных условиях неблагоприятного воздействия внешних и внутренних факторов техногенного и/или природного характера. При этом под катастрофоустойчивостью ИС следует понимать способность компьютерного комплекса, состоящего из нескольких систем, сохранять критически важные данные и продолжать выполнять свои функции после массового (возможно, целенаправленного) уничтожения его компонентов в результате различных катаклизмов как природного характера, так и инспирированных человеком.

Необходимо подчеркнуть разницу между понятием “отказоустойчивость” и “катастрофоустойчивость” [2–6]. 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.

В понятии «катастрофоустойчивость» главное — сохранение данных и продолжение работы (обеспечение непрерывности выполнения бизнес-процессов) в условиях массовых и, возможно, последовательных отказов систем и связанных между собой подсистем. В качестве основного показателя в этом случае используется *показатель доступности* КАИС, который характеризует степень возможности получения требуемых данных и осуществления взаимодействия с заданными приложениями в приемлемые сроки и с необходимым уровнем произ-

водительности. В данном контексте составляющими показателя доступности КАИС являются показатели надежности аппаратно-программных средств КАИС, а также показатель производительности данной системы, представляющей собой отношение времени отклика информационной системы к ее пропускной способности.

Приведенному ранее определению катастрофоустойчивости точно соответствует англоязычный термин «Disaster Tolerance» (DT), однако в общем случае термин «Disaster Recovery» (DR) (дословно — «восстановление после катастрофы») можно также переводить как «катастрофоустойчивость». *Первое отличие* DR от DT состоит в том, что DR концентрирует внимание на сохранности данных (при строго контролируемых потерях, если они неизбежны), а средства для продолжения полноценной работы во многих случаях предполагаются внешними по отношению к собственно катастрофоустойчивой части комплекса. Технология обработки отказов в этом случае требует учета взаимосвязанности подсистем и способности систем специфически реагировать на каждый вариант последовательности развития событий (так называемый сценарий катастрофы) с целью обеспечения максимально возможной сохранности защищаемых данных. *Второе отличие* кроется в распределении возможностей отказов по подсистемам. В отказоустойчивых системах предполагается (хотя в большинстве случаев и неявно), что каналы связи между активными компонентами (например, медные или оптические кабели) гораздо надежнее самих активных компонентов, поскольку протяженность этих каналов ограничена и вероятность их повреждения в большинстве случаев относительно невелика. В территориально распределенных катастрофоустойчивых системах возможность потери связи для каждого отдельного канала сравнима с вероятностью выхода из строя одного из активных компонентов. Это обстоятельство требует уделять повышенное внимание каналам связи и проблеме восстановления работоспособности после потери связи при проектировании и эксплуатации катастрофоустойчивой системы, причем сценарии обработки отказов и настройка всегда пишутся «по месту» — с учетом конкретных требований, как к комплексу в целом, так и к каждой площадке, принимая во внимание различные вероятности ожидаемых катастрофических событий. Поэтому просто «растянутая» в пространстве традиционная отказоустойчивая система без принятия дополнительных мер все же не может быть по-настоящему катастрофоустойчивой и в большинстве случаев не способна автоматически восстановить полную функциональность.

Следует подчеркнуть, что создание КАИС ведется из предположения, что катастрофа в отличие от отказа (события возможного, прогнозируемого, вероятного) — это событие возможное, но невероятное, либо вероятность которого мала и не может быть обоснованно оценена в процессе проектирования. В противном случае речь шла бы не о катастрофе, а об условиях функционирования [3–4]. Тогда основные элементы и подсистемы КАИС должны были бы создаваться исходя, например, из требований отказоустойчивого функционирования в условиях воздействия огнем, в водной или химической агрессивной среде, в условиях поражения оружием (различных типов). Понятно, что стоимость таких систем была бы существенно выше по сравнению с ИС, которые ориентированы на нормальное функционирование. Таким образом, в реальности, как составные элементы, так и в целом КАИС не гарантируют в полном объеме выполнение всех целевых, обеспечивающих и вспомогательных задач в условиях возникновения нерасчетных нештатных ситуаций, аварий и катастроф. Вместе с тем, необходимо отметить, что в оборонной сфере и сфере государственной безопасности как в нашей стране, так и за рубежом во второй половине XX века были сделаны отдельные катастрофоустойчивые системы, которые были ориентированы на функционирование в особо сложных условиях, вызванных, например, последствиями ракетно-ядерной войны.

Таким образом, свойство катастрофоустойчивости ИС целенаправленно формируется (возникает) в этом случае в процессе ее функционирования и характеризуется соответствующей системой показателей. В частности, может быть предложен следующий перечень основных показателей качества функционирования КАИС: *показатели доступности КАИС (суммарное время простоев ИС по любым причинам), показатели, оценивающие риски возникновения и развития аварий и катастроф, показатели, оценивающие последствия аварий и катастроф для конкретных бизнес-процессов (продолжительность, масштаб и объем ущерба), показатели, оценивающие общие затраты времени и полноту выполненных операций, связанных с восстановлением работоспособности КАИС, показатели, оценивающие, капитальные и эксплуатационные затраты на обеспечение требуемого уровня катастрофоустойчивости, затраты других видов ресурсов, показатели, оценивающие, степень критичности операций, выполняемых в ИС, значимость ресурсов и информации, используемой для обеспечения требуемого уровня катастрофоустойчивости.*

В целом, устойчивость к катастрофам требует *не только сохранности критически важных данных, но и обеспечения непрерывного (или прерываемого на некоторое время) функционирования ИС*, а в случае невозможности реализации такого режима, в рамках КАИС должно быть обеспечено с максимально короткими сроками восстановление ее работоспособности. В этих условиях целесообразно эффективность применения КАИС оценивать не только показателем доступности, но и *показателями функциональной устойчивости*. Попутно можно отметить, что при отсутствии катастроф концепция обеспечения доступности к данным будет ориентирована на поиск технологий, обеспечивающих минимизацию потерь от плановых простоев [1, 2–4].

Исходя из вышеизложенного свойство катастрофоустойчивости ИС формируется на основе целенаправленной организационно-технической, модельно-алгоритмической, информационно-правовой и другой деятельности людей, направленной на непрерывное сохранение, реализацию и восстановление присутствующих (заложенных на этапе проектирования) ИС возможностей в условиях массового (возможно, целенаправленного) уничтожения ее компонентов в результате различных катаклизмов как природного характера, так и инспирированных человеком.

В целом все решения по обеспечению восстановления и непрерывности функционирования любой ИС при наступлении катастрофы отличаются одним принципиальным параметром — временем восстановления функционирования (ВВФ, RTO — Recovery Time Objective), затрачиваемым с момента наступления катастрофы до перевода ИС в полностью рабочее состояние. Наряду с RTO, важнейшим понятием, определяющим требования к уровню непрерывности соответствующих бизнес-процессов, является понятие RPO (Recovery Point Objective — целевая точка восстановления, см. рис. 1) — согласованный с бизнесом интервал времени, предшествующий аварии, в течении которого допускается потеря данных. Иными словами, этот параметр показывает, насколько состояние системы и данных может откатиться назад при чрезвычайной ситуации (ЧС) [2–5].

В соответствии с работами [2–5], определение необходимого уровня восстановления ИС проводится посредством построения матрицы соответствия (см. табл.) уровней катастрофоустойчивости БП и реализующих данные бизнес-процессы приложений.



Рис. 1. Графическая иллюстрация целевой точки восстановления и целевого времени восстановления.

Табл. Матрица соответствия уровня катастрофоустойчивости бизнес-процессов

	Приложение 1	Приложение 2...	Приложение n	
Бизнес-процесс 1	Уровень 6	Уровень 4	Уровень 3	Уровень 6
Бизнес-процесс 2	Уровень 4	Уровень 3	Уровень 5	Уровень 5
Бизнес-процесс n	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4	Уровень 4
	<b>Уровень 6</b>	<b>Уровень 4</b>	<b>Уровень 5</b>	

Таким образом, решая на современном этапе задачи создания и применения корпоративных ИС, необходимо их, во-первых, рассматривать в более общем контексте задач структурно-функционального синтеза катастрофоустойчивых автоматизированных и информационных систем (АС и ИС), и, во-вторых, при решении указанных задач в качестве основных показателей, оценивающих результативность применения соответствующих систем защиты информации (СЗИ), следует использовать показатели, характеризующие эффективность реализации целевых процессов (в сфере экономики — бизнес-процессов), и показатели, характеризующие функциональную устойчивость указанных процессов [1, 7–11].

Существующие зарубежные и отечественные инструментальные средства обеспечения планирования непрерывности бизнеса (Business Continuity Planning) позволяют использовать универсальные архитектуры баз данных для упрощения процедур анализа риска и развития планов по восстановлению и непрерывности бизнеса, упростить процессы поддержки текущих планов непрерывности бизнеса, синхронизировать и поддерживать актуальную информацию, используя интерфейсы других приложений, корректировать управление компанией с учетом планов непрерывности бизнеса. Вместе с тем, они не обеспечи-

вают проведения комплексной автоматизации процессов управления структурной динамикой ИС в целях повышения их безопасности, слабо адаптируются к ситуациям, при которых возможно появление нерасчетных нештатных ситуаций, не ориентированы на упреждающие действия. Для компенсации негативных последствий указанных ситуаций требуется уже разработка не только методов, моделей и алгоритмов создания и применения адаптивных КАИС, но и переход на технологии управляемой самоорганизации указанных ИС [1, 13–16].

Предварительный анализ проблем и задач, которые необходимо решать на различных этапах жизненного цикла КАИС и существующих теоретических методов и подходов их решения показывает, что в рамках ранее разработанных теорий и методологий управления сложными системами эти вопросы, как отдельный предмет исследования, 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 [2–6]:

- 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 *принципиально новых, специальных принципов и методов* мониторинга, анализа и прогнозирования

ния ситуаций, разработки вариантов управляющих решений, процедур их выбора и реализации.

Так, например, анализ показывает, что принципы и методы традиционных диагностических систем концептуально являются констатирующими отказы, неисправности, дефекты и ориентированы на диагностику штатного режима. При этом не принимается во внимание ряд важнейших свойств динамики функционирования сложных объектов в условиях нештатных и критических ситуаций. В частности, не учитывается специфика их вероятностных свойств, возможность внезапного появления динамического хаоса в виде неупорядоченных процессов в детерминированных системах, «тонкая» структура механизмов старения и разрушения материалов и конструкций, а также ряд других практически важных свойств динамики нештатных и критических ситуаций. Недостатки существующих подходов к организации процессов управления КАИС в случае деградации ее основных подсистем можно проиллюстрировать на примере одной из принятых схем реконфигурации структур данных систем.

Стандартная технология реконфигурации КАИС при отказе одного из её ресурсов включает в себя следующие основные шаги [1, 6].

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

Шаг 2. Исключение отказавшего ресурса из конфигурации КАИС, 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 задача, которая при передаче на другие ресурсы начинает конфликтовать с задачами, закреплёнными за данным ресурсом, то в зависимости от дисциплины обслуживания происходит прерывание выполнения менее приоритетных задач, либо просто снятие с решения.

Описанная технология в большинстве существующих КАИС реализована на микро уровне (на уровне элементов и блоков КАИС) с использованием соответствующих аппаратно-программных средств.

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

В реальных ситуациях отказ одного вида ресурса может вести к отказу или снижению эффективности функционирования других видов ресурсов. При этом замена отказавшего ресурса требует формирования принципиально новых работоспособных конфигураций КАИС.

В качестве промежуточных выводов можно отметить следующие положения:

- во-первых, применительно к современным КАИС реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления структурами КАИС для компенсации отказов, но и как технологию управления, направленную на повышение эффективности функционирования КАИС;

- и, во-вторых, для реализации указанной концепции реконфигурации КАИС необходимо разработать такие средства формализации, которые позволили бы на конструктивной основе связывать процессы реконфигурации КАИС с процессами её использования на различных этапах жизненного цикла.

В связи со сказанным при создании перспективных катастрофически устойчивых ИС целесообразно осуществить переход от узкой (традиционной) интерпретации процессов реконфигурации рассматриваемых систем к их широкой интерпретации в рамках развиваемой новой прикладной теории управления структурной динамикой КАИС [1].

Вместе с тем, при решении задач обеспечения функциональной устойчивости информационно-вычислительных и управляющих систем, обеспечения целостности и управляемости информационных 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. [1].

Потребности в решении перечисленных проблем чрезвычайно велики, т. к. от этого сегодня во многом зависит способность в предотвращении и локализации различных критических ситуаций. Общесис-

темный анализ существующих подходов к решению этих и других проблем, показывает, что в настоящее время уже сформировались необходимые условия для разработки *нового междисциплинарного научного направления — теории управления сложными организационными и организационно-техническими системами (в том числе, и КАИС) в кризисных ситуациях*, предметом исследований которой являются объекты и процессы, характеризуемые перечисленными выше особенностями.

В настоящее время существует несколько теоретических подходов к решению задач полимодельного многокритериального структурно-функционального синтеза облика КАИС. Среди данных подходов можно выделить три, которые являются в настоящее время наиболее перспективными [7, 9–18].

Вариант I. Постановка и решение задачи однокритериальной оптимизации показателя эффективности (ПЭ) КАИС на аналитической модели большой размерности как задачи выбора, осуществляемого путем формальной декомпозиции и проведения оптимизации на частных моделях по частным ПЭ (в том числе, и показателя функциональной устойчивости) с использованием того или иного правила согласования, обеспечивающего сходимость процесса оптимизации к решению исходной задачи. В работах [1, 7–9] описаны методы и алгоритмы решения указанного класса задач.

Вариант II. Постановка задачи однокритериальной оптимизации ПЭ КАИС на имитационной модели большой размерности как задачи выбора, осуществляемого путем неформальной декомпозиции исходной задачи, построения совокупности аналитических моделей, отражающих различные стороны функционирования системы и имеющих приемлемую размерность, согласования аналитических моделей по принципу Парето и проведения имитационных экспериментов с паретовскими альтернативами с целью поиска точки, доставляющей экстремум исходному показателю эффективности системы.

Вариант III. Постановка задачи многокритериальной оптимизации на комплексе моделей как задачи выбора со многими отношениями предпочтения, осуществляемого путем задания множества Парето с помощью основополагающей многокритериальной модели, сужения этого множества на основе машинного анализа его свойств и введения соответствующей информации в ходе интерактивной процедуры, выполняемой ЛПП, лицом, обосновывающим решения (ЛОР) с ЭВМ, а также на основе привлечения дополнительных математических

моделей, обеспечивающих последующее уточнение и сужение множества Парето вплоть до принятия единственного решения.

Анализ постановки задачи многоструктурного синтеза облика КАИС показывает, что для ее решения необходимо, во-первых, разработать различные технологии (процедуры) согласования (координации) разрабатываемых частных моделей и, во-вторых, обосновать и найти результирующие правила выбора (результирующие отношения предпочтения) при многокритериальной оптимизации на указанных моделях.

Таким образом, в настоящее время весьма актуальной становится разработка методологических и методических основ комплексной автоматизации процессов адаптивного развития КАИС, базирующихся на результатах современной теории управляемой самоорганизации сложных организационно-технических систем, включающих в себя комбинированные модели, методы и алгоритмы анализа и управления структурной динамикой перечисленных ИС в условиях неполноты, неопределенности, неточности и противоречивости информации о складывающейся обстановке и при наличии неустраняемого порогового ограничения времени на цикл формирования и реализации решений по предотвращению возможных критических, чрезвычайных и аварийных ситуаций.

К настоящему времени разработана многофазная, многоэтапная обобщенная процедура решения как задач оценивания и синтеза эффективных вариантов облика КАИС, так и одновременно задач выбора оптимальных программ создания, внедрения, эксплуатации и развития указанных систем [1, 9–12, 17–18]. Как уже упоминалось ранее в данной статье, результаты решения перечисленных задач могут рассматриваться в качестве эталонов, относительно которых можно, уже применяя те или иные эвристики, проводить окончательное оценивание эффективности создаваемых (существующих) средств и методов создания и применения рассматриваемого класса ИС.

При описании предлагаемой обобщенной процедуры будем исходить из наиболее общего сценария изменения внутренней и внешней обстановок, в рамках которых происходит создание и функционирование КАИС. Пусть из-за воздействия возмущающих факторов (объективных, субъективных, внутренних, внешних), оказывающих влияние на данную ИС, возникает необходимость в решении следующих двух групп задач. Во-первых, требуется найти новое многоструктурное макросостояние самой КАИС (например, облик новой КАИС), обеспечивающее эффективное её функционирование в складывающейся об-

становке. И, во-вторых, необходимо найти такие программы управления структурной динамикой КАИС, при которых обеспечивался бы как переход из заданного в синтезируемое многоструктурное макросостояние КАИС, так и устойчивое управление функционированием КАИС в промежуточных многоструктурных макросостояниях.

Предлагается следующий вариант решения перечисленных групп задач, включающий в себя две основные фазы [1].

На первой фазе должно осуществляться формирование (генерирование) допустимых вариантов многоструктурных макро состояний КАИС или, говоря другими словами, структурно-функциональный синтез нового облика этих систем, соответствующего складывающейся (прогнозируемой) обстановке.

На второй фазе проводится выбор конкретного варианта многоструктурного макросостояния КАИС с одновременным синтезом (построением) адаптивных планов (программ) управления переходом КАИС из текущего в требуемое (выбранное) многоструктурное макросостояние. При этом рассматриваемые планы должны обеспечивать такое эволюционное развитие КАИС, при котором наряду с реализацией программ перехода из соответствующих макросостояний предусматривается одновременно и реализация программ устойчивого управления КАИС в промежуточных многоструктурных макросостояниях.

Важную роль при организации управления структурной динамикой КАИС в рамках перечисленных фаз отводится задачам расчета и анализа ее показателей и характеристик, кластеризации многоструктурных макросостояний КАИС, динамической реконфигурации структур данной системы. Кратко остановимся на содержании и особенностях решения указанных задач.

**Структурно-топологические свойства и характеристики КАИС.** Анализ показывает, что сетевая структура КАИС может быть сформирована из исходной тривиальной сети с помощью операций подразбиения ее ребер и введения новых ребер, соединяющих либо уже существующие вершины (полюса, внутренние) сети, либо внутренние вершины, вновь образованные, с существующими, либо внутренние вершины, вновь образованные, между собой. Рассмотрим более подробно вопрос о том, как влияет операция введения новых связей и узлов сети на топологические свойства заданного структурного состояния КАИС.

Используем для этого понятие полином отказа [19, 20, 21, 22]

$P(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$  и соответствующую формулу:

$$P(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = \sum_{t=1}^{\nu} (-1)^{t-1} \sum_{i=1}^{C_{\nu}^t} \prod_{q \in V_i(R, t)} Q_q, \quad (1)$$

где  $\nu$  — количество минимальных сечений,  $C_{\nu}^t$  — число сочетаний из  $\nu$  по  $t$ ,  $V_i(R, t)$  — подмножество номеров элементов КАИС из  $\{1, 2, \dots, n\}$ , получающихся при  $i$ -ом варианте объединения элементов различных  $t$  минимальных сечений из множества всех минимальных сечений отказов  $R$ ,  $Q_q$  — величина отказа  $q$ -го элемента. Можно показать, что в условиях однородной сетевой структуры  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = Q$  полином отказа преобразуется в полином  $P(Q)$  от одной переменной. Каждому структурному состоянию КАИС в этом случае будет соответствовать свой полином  $P(Q)$  или для компактности записи вектор  $\vec{\chi} = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ , состоящий из коэффициентов полинома отказа структуры, который будем называть *геномом сетевой структуры*, отвечающим за свойства рассматриваемой сети.

Сеть, состоящая из  $n$  параллельных ребер, соединяющих полюса  $\{v^+, v^-\}$ , обозначим через  $\Gamma_n^p(v^+, v^-)$ . Сеть  $\Gamma_n^p(v^+, v^-)$  получается суперпозицией простейших неразложимых сетей  $\Gamma_2^p$ . Сеть, состоящая из  $n$  последовательных ребер (цепь), соединяющих полюса  $\{v^+, v^-\}$ , обозначим через  $\Gamma_n^s(v^+, v^-)$ . Сеть  $\Gamma_n^s(v^+, v^-)$  получается суперпозицией простейших неразложимых сетей  $\Gamma_2^s$ . Сеть, которая может быть получена суперпозицией простейших неразложимых сетей  $\Gamma_2^p$  и  $\Gamma_2^s$ , называется  $\pi$ -сетью [25]. Нетривиальная неразложимая сеть, отличная от  $\Gamma_2^p(v^+, v^-)$  и  $\Gamma_2^s(v^+, v^-)$ , называется Н-сетью [25].

Согласно [22, 23] и проведенными авторами исследований по виду генома  $\vec{\chi} = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$  можно провести анализ отдельных свойств структурного состояния КАИС, используя следующие правила:

- сумма коэффициентов полинома  $P(Q)$  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 ( $n$  — длина генома);

– число чередований знаков «+» и «-» в полиноме больше или равно количеству внутренних вершин сетевой структуры (число чередований знаков в геноме);

– если старшая компонента генома  $|\chi_n| = 1$ , то сетевая структура КАИС является  $\pi$ -сетью;

– если старшая компонента генома  $|\chi_n| > 1$ , то сетевая структура КАИС является H-сетью.

Для исследования топологических свойств структурного состояния КАИС введем в рассмотрение интегральные показатели отказа однородной и неоднородной структуры с использованием вероятностного и нечетко-возможностного подходов [17, 20, 22]

$$F_{\text{однор}} = \int_0^1 P(Q) dQ, \quad F_{\text{неоднор}} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 P(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) dQ_1 dQ_2 \dots dQ_n,$$

$$F_{\text{возм}} = \int_{[0,1]} P(\mu) \circ G = \sup_{\alpha \in [0,1]} \min\{\alpha, G(H_\alpha)\},$$

где  $H_\alpha = \{\mu \in [0,1] : T(\mu) \geq \alpha\}$ ,  $G(H_\alpha) = \max_{T(\mu) \geq \alpha} \{1 - \mu\}$ .

Для вычисления интегральных показателей можно воспользоваться геномами структур, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$F_{\tilde{i}\tilde{a}\tilde{i}\tilde{a}\tilde{i}\tilde{a}}(\tilde{\chi}) = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)^T \cdot \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1}\right) \quad (2)$$

$$F_{\tilde{i}\tilde{a}\tilde{i}\tilde{a}\tilde{i}\tilde{a}}(\tilde{\chi}) = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)^T \cdot \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right) \quad (3)$$

$$F_{\hat{a}i\hat{c}i}(\vec{\chi}) = \mu^*, \text{ где } (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)^T \cdot (\mu^*, \mu^{*2}, \dots, \mu^{*n}) = 1 - \mu^* \quad (4)$$

Результаты исследований, связанных с анализом изменения значений интегральных показателей для  $\pi$ -сетей (рис. 2) и H-сетей (рис. 3) представлены соответственно на рис. 4 и рис. 5.

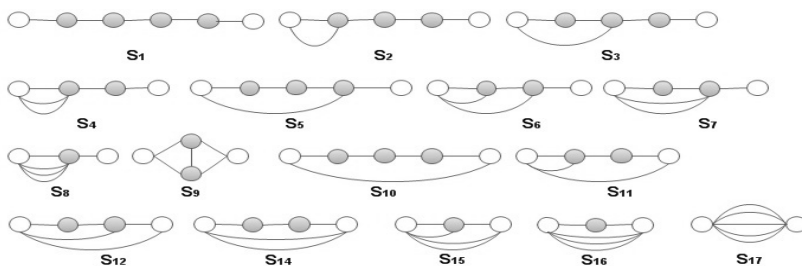


Рис. 2.  $\pi$ -сети и  $S_9$ -простейшая  $\hat{I}$ -сеть.

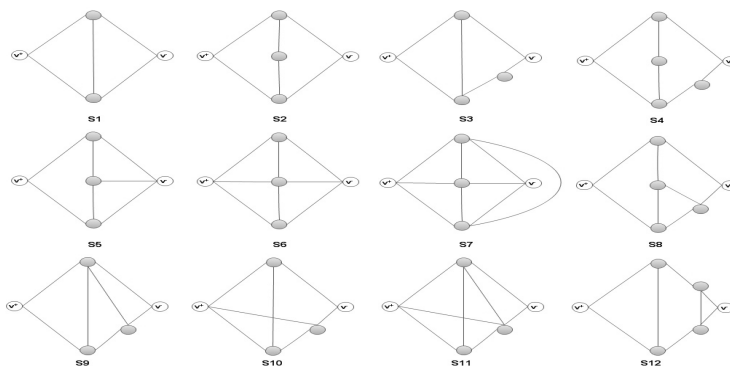


Рис.3. H-сети.

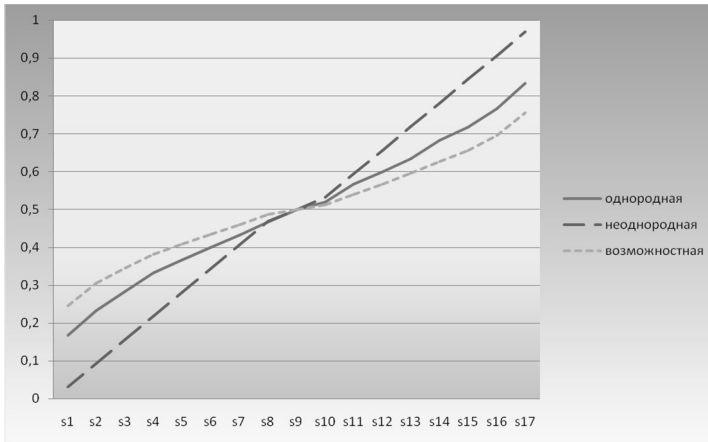


Рис. 4. Сравнение значений интегральных показателей  $\pi$ -сетей.

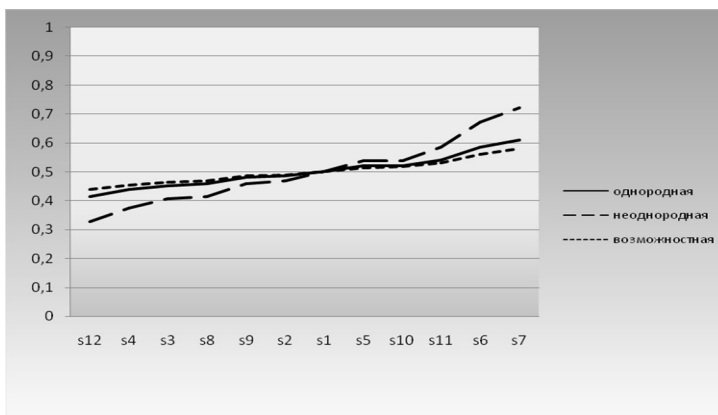


Рис. 5. Сравнение значений интегральных показателей H-сетей.

Полученные результаты позволяют провести сравнительный анализ топологии структур КАИС. Так, например, для рассматриваемых  $\pi$ -сетей можно выявить следующие закономерности:

– если все последовательные связи дублируются параллельной дугой, то показатель возможности принимает наибольшее значение  $F_{возм} \geq F_{однор} \geq F_{неоднор}$ ;



– при приближении рассматриваемых  $\pi$ -сетей к своим предельным состояниям  $\Gamma_n^S(v^+, v^-)$  и  $\Gamma_n^D(v^+, v^-)$  наблюдается большее расхождение значений рассматриваемых показателей.

Для  $H$ -сетей — вычисленные значения интегральных показателей можно использовать при анализе наличия связей между различными типами (слабыми, сильными, эквивалентными, минимальными, разделяющими и полюсными) вершин структуры.

**Построение кластеров структурных состояний КАИС.** Реконфигурация КАИС — это процесс изменения структуры КАИС в целях сохранения, восстановления (повышения) уровня работоспособности КАИС, либо обеспечения минимального снижения уровня эффективности применения КАИС при деградации её функций.

Одной из важнейших прикладных задач, возникающих в этом контексте, является задача предварительной кластеризации возможных многоструктурных состояний КАИС и выделение типовых (эталонных) структур кластеров. Решение предлагаемых задач позволяет повысить оперативность оценивания структурного состояния КАИС и его соотнесения с выделенным предварительно классом многоструктурных макросостояний.

Формально постановка задачи кластеризации множества многоструктурных состояний КАИС сводится к следующему: известно множество многоструктурных состояний  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ , каждое многоструктурное состояние характеризуется конечной совокупностью показателей (признаков)  $\vec{F} = (F_1, F_2, \dots, F_m)$ , с помощью которых оцениваются различные аспекты функционирования КАИС (например: показатели доступности КАИС, показатели рисков возникновения и развития аварий и катастроф, показатели последствий аварий и катастроф, показатели общих затраты времени и полноту выполненных операций по восстановлению работоспособности КАИС и т. п.). Причем с помощью данных показателей можно оценить различные (техническую, топологическую, технологическую и др.) структуры КАИС. Для классификации многоструктурных состояний  $S$  введем различные меры сходства и включения, порождающие отношения на исследуемом множестве. Под мерой сходства будем понимать неотрицательную вещественную функцию  $C(S_l, S_k)$ , обладающую следующими свойствами:

$$0 \leq C(S_l, S_k) \leq 1, \quad C(S_l, S_k) = 1, \text{ если } l = k, \quad C(S_l, S_k) = C(S_k, S_l). \quad (5)$$

Свойствами (5) обладает, в частности, континуум эквивалентных

мер [23, 24], представляемых формулой

$$C(S_l, S_k) = \frac{2\mu(S_l \cap S_k)}{(1 + \lambda)[\mu(S_l) + \mu(S_k)] - 2\lambda\mu(S_l \cap S_k)}, \quad (6)$$

где  $-1 \leq \lambda < \infty$ ;  $\mu(S_l)$  — мощность множества признаков, удовлетворяющих  $S_l$  структуре.

В [23, 24] приведены различные меры сходства структур, предназначенные для обработки качественных и количественных признаков.

При этом,

$$\mu(S_l) = \sum_{j=1}^m F_{lj}, \quad \mu(S_l \cap S_k) = \sum_{j=1}^m \min\{F_{lj}, F_{kj}\},$$

$$\mu(S_l \cup S_k) = \sum_{j=1}^m \max\{F_{lj}, F_{kj}\}.$$

Если сравнение структур осуществляется по качественным признакам, то  $F_{lj} \in \{0, 1\}$ , в случае количественных признаков —  $F_{lj}$  принимают значения либо в установленной ранговой шкале, либо в интервале  $[0, 1]$ .

В отличие от мер сходства мера включения отражает различную степень включения одной структуры в другую по сравниваемым признакам и позволяет определить, какая структура более оригинальна, а какая — более типична (эталон) среди множества  $S$ . Меры включения структуры  $S_l$  в структуру  $S_k$  и наоборот можно задать следующим образом:

$$V(S_l, S_k) = \frac{\mu(S_l \cap S_k)}{\mu(S_k)}, \quad V(S_k, S_l) = \frac{\mu(S_l \cap S_k)}{\mu(S_l)}. \quad (7)$$

Если  $V(S_l, S_k) > V(S_k, S_l)$ , то  $S_l$  структура более оригинальна, а  $S_k$  более типовая структура.

С использованием мер сходства можно построить отношение иерархии, которое позволит выделить кластеры эквивалентных структур из исследуемого множества  $S$ . После чего для каждого кластера структур на основе мер включения можно определить наиболее типовой элемент.

Отношение иерархии или иерархическое разбиение структур определяется следующим образом [18]: иерархическое разбиение (отношение иерархии) множества  $S$  есть множество разбиений

$\Theta = \{R_{\alpha}, \alpha = 0, 1, 2, \dots\}$ , удовлетворяющее следующему условию

вложенности разбиений:  $\forall R_{\alpha_1}, R_{\alpha_2}$ , если  $\alpha_1 < \alpha_2$ , то

$\forall H_q \in R_{\alpha_1} \exists H_p \in R_{\alpha_2} : H_q \subset H_p$  и  $\forall H_r \in R_{\alpha_2} \setminus \{H_p\} H_q \cap H_r = \emptyset$ .

Так, например, в иерархическое разбиение входят разбиения, характеризующие предельные случаи,  $R_0 = \{H_q | H_q = \{S_q\}, q = 1, 2, \dots, n\}$  и  $R_n = \{H_1 | H_1 = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}\}$ .

При этом если задано разбиение, то структуры, входящие в один и тот же кластер, являются неразличимыми (эквивалентными).

При практической реализации иерархических классификаций строятся дендрограммы, являющиеся графическим способом изображения системы, что делает наглядной структуру иерархического отношения.

Для построения иерархического разбиения множества структур  $S$  могут быть использованы методы сгущения кластеров [24], пересчет значений сходства которых можно осуществлять по следующим формулам:

$$C(H_j, H_l) = \alpha_q C(H_j, H_q) + \alpha_t C(H_j, H_t) + \beta C(H_q, H_t) + \nu [C(H_j, H_q) - C(H_j, H_t)]. \quad (8)$$

Параметры  $\alpha_q, \alpha_t, \beta, \nu$  задают вид метода пересчета меры сходства кластеров: метод минимума, максимума, медианы, центроидный метод, метод Уорда.

Таким образом, обобщенный алгоритм многокритериальной кластеризации включает в себя два этапа. На первом этапе обобщенного алгоритма осуществляется построение дендрограммы, используя которую можно формировать различные разбиения исходного множества  $S$  с требуемой степенью эквивалентности ( $\gamma$ ) входящих в кластеры структур, т. е., варьируя параметр  $\gamma$ , можно получать кластеры различной степени эквивалентности. На втором этапе обобщенного алгоритма для выявления наиболее типовых структур кластера используем меру включения. На основе рассчитанных значений мер включения для структур одного кластера строится матрица размерностью  $p \times p$ , где  $p$  — мощность рассматриваемого кластера. Для данной матрицы находим собственный вектор, соответствующий максимальному собственному числу матрицы. Максимальное значение среди компонент найденного вектора соответствует наиболее типовому (эталонному)

элементу кластера, а минимальное значение — наиболее оригинальной структуре [24].

**Динамическая реконфигурация КАИС.** При исследовании структурной динамики КАИС немаловажным является решение задачи формирования траектории перехода данной системы из заданного начального  $S_0$  в требуемое (выбранное)  $S_f$  структурное состояние, удовлетворяющей некоторым заданным свойствам. Рассмотрим процесс реконфигурации фрагмента технической структуры КАИС (рис.6) при выходе из строя отдельных ее связей.

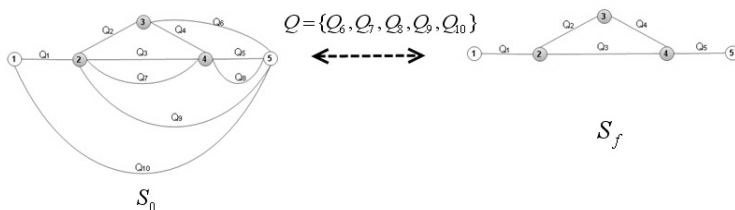


Рис. 6. Исходное и финальное структурное состояние КАИС

Пусть выбранное структурное состояние  $S_f$  КАИС, представленное на рис.6, соответствует некоторому частично работоспособному состоянию указанной системы.

Множество связей, выводимых из начального структурного состояния  $S_0$ , обозначим  $Q = \{Q_6, Q_7, Q_8, Q_9, Q_{10}\}$ . В этом случае начальное структурное состояние  $S_0$  характеризуется геномом  $\vec{\chi}_0 = (0,1,0,0,2,0,-4,-1,5,-2)$ , а структурное состояние  $S_f$  характеризуется геномом  $\vec{\chi}_f = (2,1,-5,4,-1,0,0,0,0,0)$ .

Всевозможные промежуточные структурные состояния КАИС образуют иерархический граф, представленный на рис. 7.

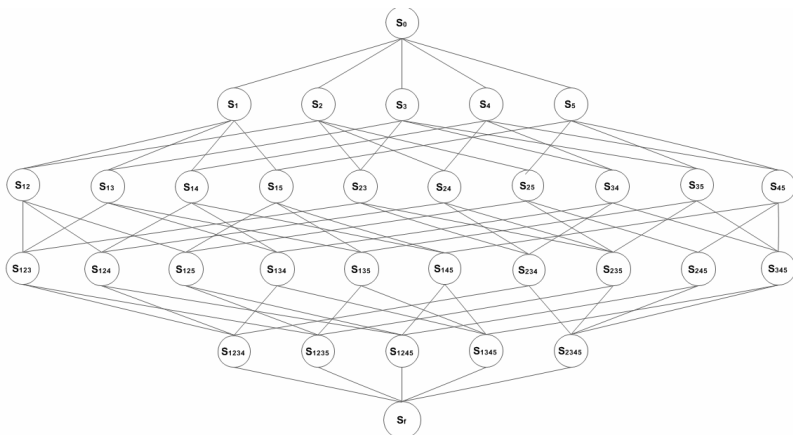


Рис. 7. Дерево возможных сценариев деградации (восстановления) КАИС.

Каждому структурному состоянию  $S_\alpha$ , встречающемуся в сценарии реконфигурации КАИС (на пути из  $S_0$  в  $S_f$ ), можно сопоставить геномом  $\vec{\chi}_\alpha$ .

Состояние  $\vec{\chi}_\alpha$  непосредственно достижимо из состояния  $\vec{\chi}$ , если  $\exists Q_i \in Q$ , удаление которой переводит систему из состояния  $\vec{\chi}$  в состояние  $\vec{\chi}_\alpha$ .

Введем для данного понятия следующее обозначение  $\vec{\chi} \xrightarrow{Q_i} \vec{\chi}_\alpha$ .

Пусть  $X(\vec{\chi})$  множество всех структурных состояний, непосредственно достижимых из состояния  $\vec{\chi}$ .

Тогда один из возможных сценариев деградации структуры из  $S_0$  в  $S_f$  можно описать следующей цепочкой переходов

$$\vec{\chi}_{\alpha_0} \xrightarrow{Q_{i_1}} \vec{\chi}_{\alpha_1} \xrightarrow{Q_{i_2}} \vec{\chi}_{\alpha_2} \xrightarrow{Q_{i_3}} \dots$$

$$\dots \xrightarrow{Q_{i_{k-1}}} \vec{\chi}_{\alpha_{k-1}} \xrightarrow{Q_{i_k}} \vec{\chi}_{\alpha_k},$$

где  $\bar{\chi}_{\alpha_0} = \bar{\chi}_0$ ,  $\bar{\chi}_{\alpha_k} = \bar{\chi}_f$ , множество  $\{Q_{i_1}, Q_{i_2}, \dots, Q_{i_k}\} = Q$ , т.е. множество удаляемых дуг в цепочке перехода является перестановкой дуг множества  $Q$ .

Поставленную в начале данного параграфа задачу построения траектории изменения структурных состояний КАИС целесообразно сформулировать как задачу нахождения оптимальной перестановки удаляемых дуг из множества  $Q$  следующим образом

$$\sum_{j=0}^k F_{над}(\bar{\chi}_{\alpha_j}) \rightarrow \min \begin{matrix} \bar{\chi}_{\alpha_j} \in X(\bar{\chi}_{\alpha_{j-1}}) \\ \bar{\chi}_{\alpha_0} = \bar{\chi}_0, \bar{\chi}_{\alpha_k} = \bar{\chi}_f, P(\bar{\chi}_{\alpha_j}) \leq b \\ \{Q_{i_1}, Q_{i_2}, \dots, Q_{i_k}\} = Q \end{matrix} \quad (9)$$

Другими словами, требуется найти такой сценарий реконфигурации структурных состояний КАИС, при котором суммарный отказ системы в промежуточных структурных состояниях, удовлетворяющих в общем случае некоторому (некоторым) заданному свойству  $P(\bar{\chi}_{\alpha_j}) \leq b$ , на пути из  $S_0$  в  $S_f$  был бы минимальным. Здесь в качестве

показателя  $F_{над}$  могут быть использованы показатели (2), (3), (4).

Для решения оптимизационной задачи (9) можно воспользоваться следующими соображениями. Геном любого структурного состояния КАИС  $\bar{\chi}_{\alpha_j}$  можно представить суммой векторов  $\bar{\chi}_{\alpha_j} = \bar{\chi}_{\alpha_j}^{(-)} + \nabla \bar{\chi}_{\alpha_j}$ . Вектор  $\bar{\chi}_{\alpha_j}^{(-)}$  позволяет рассчитать нижнюю оценку отказа КАИС при надежной работе  $Q_j$  дуги, а вектор  $\nabla \bar{\chi}_{\alpha_j}$  является градиентом роста отказа при удалении этой дуги. Следовательно, значение показателя  $F_{над}(\bar{\chi}_{\alpha_j})$  при различной его интерпретации (пусть  $F_{над} = F_{неоднор}$ ) можно вычислять по формуле (6)

$$\begin{aligned} F_{неоднор}(\bar{\chi}_{\alpha_j}) &= \bar{\chi}_{\alpha_j}^T \cdot \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right) = \\ &= \bar{\chi}_{\alpha_j}^{T(-)} \cdot \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right) + \nabla \bar{\chi}_{\alpha_j}^T \cdot \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда решение задачи (9) можно осуществлять с применением различных методов математического программирования (методов динамического программирования, методов «ветвей и границ», методов стохастического поиска, градиентных методов, генетических алгоритмов и др.). В указанных алгоритмах для расчета различных оценок

множества состояний целесообразно использовать введенные ранее нижние оценки отказа системы и градиенты роста функции отказа.

В результате моделирования и анализа сценариев деградации структурных состояний для рассматриваемого в статье примера, удалось все множество промежуточных структурных состояний (рис. 7) разбить на классы эквивалентных структурных состояний (рис. 8) [18]. Среди кластеров эквивалентных структурных состояний их эталонные структуры выделены темным цветом. На рис. 8 также приведены значения интегрального показателя этих структурных состояний.

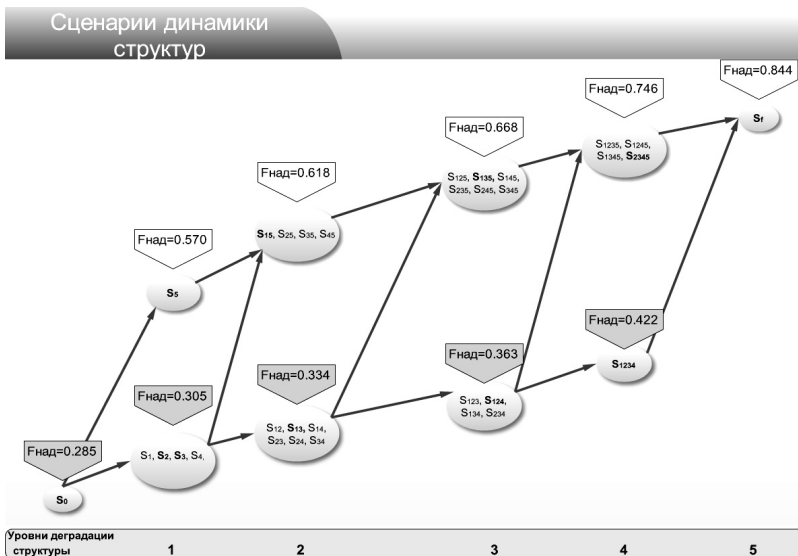


Рис.8. Результаты вычислительных экспериментов

**Заключение.** Предложен подход к решению задачи моделирования, оценивания и анализа сценариев деградации (восстановления) структурных состояний КАИС. Разработан математический аппарат, позволяющий формально описать структурное состояние системы, провести оценивание топологических свойств КАИС с позиции вероятностного и нечетко-возможностного подходов. Исследован вопрос построения сценариев деградации структур, при которых переход из начального структурного состояния в требуемое структурное состояние сопровождался бы пребыванием системы в наиболее надежных состояниях.

Кроме того, к настоящему времени разработано несколько прототипов программного обеспечения решения частных задач структурно-функционального синтеза КАИС, предложена оригинальная управленческая интерпретация данных задач. Кроме того, создан многофункциональный программный комплекс оперативного мониторинга состояний сложных технических систем (СТС), который успешно используется для повышения уровня функциональной устойчивости указанных систем в критических приложениях (атомная энергетика, космонавтика и т. п.) [1, 9–12, 17–18].

**Поддержка исследований.** Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-07-00169, 08-08-00403, 09-07-00066, 08-08-00346), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект №О-2.3/03).

### Литература

1. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
2. *Беленков В.Г., Будзко В.И., Синуцын И.Н.* Катастрофоустойчивость корпоративных информационных систем. Часть 1. М.: ИПИ РАН, 2002.
3. *Белов П.Г.* Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2003.
4. *Будзко В.И., Беленков В.Г., Кейер П.А.* К выбору варианта построения катастрофоустойчивых информационно-телекоммуникационных систем // Системы и средства информатики. М.: Наука. 2003, вып. 13. С. 16–40.
5. *Будзко В.И., Беленков В.Г., Кейер П.А.* Проблемы создания катастрофоустойчивых автоматизированных систем банковских расчетов // Системы и средства информатики. 2002. Вып. 12. М.: Наука. С. 48–57.
6. Введение в теорию живучести вычислительных систем / *Додонов А.Г., Кузнецова М.Г., Горбачик Е.С.: Отв. ред. Гуляев В.А.*: АН УССР. Институт проблем регистрации информации. Киев: Наукова думка, 1990. 184 с.
7. *Балашов Е.П.* Эволюционный синтез систем. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
8. *Башлыков А.А.* Проектирование систем принятия решений в энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1986. 120 с.
9. *Соколов Б.В.* Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. МО СССР, 1992.
10. *Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. 2002. №5. С. 103–117.
11. *Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов. // Изд. РАН. Теория и системы управления, 2004. №6. С. 5–16.
12. *Юсупов Р.М.* Наука и национальная безопасность. СПб.: Наука, 2006. 290 с.
13. *Building an adaptive enterprise. Linking business and IT*, October 2003, Hewlett-Packard.
14. *HP Utility Data Center. Technical White paper*, October 2001.



15. HP virtualization. Computing without boundaries or constraints. Enabling an adaptive enterprise, 2003, Hewlett-Packard.
16. IBM, "Autonomic Computing: IBM's Perspective on the State of Information Technology".
17. Павлов А.Н. Нечетко-возможностный подход к анализу и оцениванию безопасности сложных организационно-технических систем// XI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика-2008 (РИ-2008)», РФ, г. Санкт-Петербург, 22 - 24 октября 2008 г.: Материалы конференции, С. 48-49.
18. Павлов А.Н., Соколов Б.В. Многокритериальная кластеризация структурных состояний катастрофоустойчивых информационных систем// XV Международная конференция "Проблемы управления безопасностью сложных систем", РФ, г. Москва, 17 декабря 2008 г. : Материалы конференции. С. 150–153.
19. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981.
20. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
21. Соложенцев Е.Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2004. 432 с.
22. Bruce E. Briley. A New Approach to Switching Network Synthesis // International Conference on Communications Technology, Shanghai, PRC, 1994.
23. Андреев В.Л. Классификационные построения в экологии и систематике. М.: Наука, 1980. 142 с.
24. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. Учебник. М.: Финансы и статистика, 2004. 464 с.
25. Яблонский С.В. Введение в дискретную математику. М.: Наука, 1986. 384 с.

**Соколов Борис Владимирович** — д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ; заместитель директора по научной работе Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Профессор Соколов Б.В. специалист в области системного анализа и исследования операций. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Данная прикладная теория имеет междисциплинарный характер и базируется на результатах, полученных в таких областях научных знаний, как классическая теория управления, исследование операций, искусственный интеллект, теория систем и системный анализ. Автор более 180 научных трудов, в том числе 1 монографии и 3 учебников. sokol@iias.spb.su; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-0103, факс +7(812)328-4450.

**Sokolov Boris Vladimirovich** — Dr.Sci., Prof., honored scientist of Russia; Deputy-Director for Research, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Prof. Sokolov B.V. is a specialist in the field of systems analysis and operations research. Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. This applied theory has interdisciplinary character and is based on results obtained in classical control theory, operations research, artificial intelligence, theory of systems and systems analysis. The number of publications — more than 180 scientific studies, including 1 monograph and 3 textbook. sokol@iias.spb.su; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-0103, fax +7(812)328-4450.

**Павлов Александр Николаевич** — к.т.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Специалист в области системного анализа и принятия решений в условиях существенной неопределенности. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Автор более 70 научных трудов. [pavlov62@list.ru](mailto:pavlov62@list.ru); СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-0103, факс +7(812)328-4450.

**Pavlov Alexander Nikolaevich** — PhD., associate professor; senior researcher, Laboratory for Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Specialist in the field of systems analysis and operations research by conditions of substantial uncertainty. Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — more than 70. [pavlov62@list.ru](mailto:pavlov62@list.ru); SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-0103, fax +7(812)328-4450.