

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего образования
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

На правах рукописи

Кочкаров Расул Ахматович

МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕКОНФИГУРИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ СЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Научный консультант

Тимошенко Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор

Москва – 2026

Диссертация представлена к публичному рассмотрению и защите в порядке, установленном ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» в соответствии с предоставленным правом самостоятельно присуждать ученые степени кандидата наук, ученые степени доктора наук согласно положениям пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Публичное рассмотрение и защита диссертации состоятся 15 мая 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Финансового университета Д 505.001.126 по адресу: Москва, Ленинградский проспект, д. 51, корп. 1, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в диссертационном зале Библиотечно-информационного комплекса ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» по адресу: 125167, Москва, Ленинградский проспект, д. 49/2, комн. 100 и на официальном сайте Финансового университета в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: www.fa.ru.

Персональный состав диссертационного совета:

председатель – Шевцов В.А., д.техн.н., профессор;
заместитель председателя – Рябов П.Е., д.физ.-мат.н., доцент;
ученый секретарь – Прокопчина С.В., д.техн.н., профессор;

члены диссертационного совета:

Кочкаров А.А., д.техн.н., доцент;
Судаков В.А., д.техн.н., доцент;
Тимошенко А.В., д.техн.н., профессор;
Фархадов М.П., д.техн.н., с.н.с.

Автореферат диссертации разослан 16 февраля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Финансового университета Д 505.001.126

С.В. Прокопчина

I Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В течение последних лет во многих областях возросла роль и значение систем мониторинга как в информационно-управляющих системах различного технического, так и социально-экономического назначения. Мониторинг как одна из основных функций сложных систем существенно трансформировался как на уровне средств мониторинга (датчики, приборы контроля и другие), сетей связи (широкополосная связь, беспроводные сети связи, скоростная передача данных и другие), так и на уровне математического и программного обеспечения.

В связи с увеличением масштабов – количества средств мониторинга к каждой из задач мониторинга добавляются требования к вычислениям. При наличии тысяч, сотен или даже десятков элементов в системе мониторинга появляются сложные, труднорешаемые или неразрешимые за полиномиальное время задачи. Для ряда задач даже для малого количества элементов практически невозможно найти решение за приемлемое время.

Ситуация кардинально усложняется при возложении на систему задач функционирования в условиях интенсивных дестабилизирующих факторов естественного (климатические аномалии, стихийные бедствия) и искусственного характера (техногенные инциденты, целенаправленные воздействия). В этих условиях для сохранения ключевых свойств – устойчивости (способности выполнять задачу при выходе элементов из строя) и целостности (сохранения доступности средств мониторинга) – система должна обладать способностью к адаптации.

В рамках диссертации рассматриваются структурно-динамические сетевые системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности (далее – СДСС НПМ БР), под которыми понимается система с изменяемой во времени сетевой структурой, при этом отдельным компонентам или подсистемам соответствуют части ее сети – подсети.

Основным механизмом адаптации является динамическое реконфигурирование – оперативное изменение структуры и направлений информационного обмена в ответ на выход характеристик за допустимые пределы. Именно реконфигурирование становится ключевым процессом, обеспечивающим устойчивость, целостность и непрерывность функционирования СДСС НПМ БР. Однако в настоящее время решение этой задачи наталкивается на принципиальные ограничения. Классические оптимизационные подходы и алгоритмы, применяемые к системам большой

размерности с динамической топологией, обладают неприемлемо высокой вычислительной сложностью. В частности, задача коммивояжера в системе с 50 элементами при использовании переборного алгоритма, потребует исполнения 2^{50} операций, что составляет более одного квадриллиона операций. Это делает невозможным оперативное принятие решений в реальном времени, особенно в критических условиях деструктивных воздействий, когда задержка напрямую ведет к потере управляемости и функциональности.

Данные обстоятельства отражают наличие **противоречия в практике** между необходимостью поддержки на заданном уровне структурно-функционального состояния структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности и недостаточной оперативностью реконфигурирования системы в условиях деструктивных воздействий при возникновении аномальной вычислительной сложности.

Степень разработанности темы исследования. Предложенный метод реконфигурирования структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности основан на анализе значительного количества трудов, посвященных графовым моделям пространственно-распределенных систем мониторинга, многокритериальной оптимизации и управлению сетевыми системами.

Теория и методология мониторинга, инфраструктуры пространственных данных исследована в работах Р.Н. Акиншина, В.А. Владимирова, Ю.Д. Зраенко, Т.В. Корнеева, В.В. Кульбы, Г.Г. Малинецкого, М.Д. Месаровича, Е.А. Микрина, М.Ю. Охтилева, Б.В. Соколова, Д.С. Сомова, В.М. Шарапова, Р.М. Юсупова.

Развитие инфраструктуры пространственных данных и геоинформационных систем разрабатывалось в трудах А.В. Вицентия, О.И. Золотова, Е.Б. Кудашева, Н.Г. Маркова, Г.С. Розенберга, Д.С. Тряпкина, А.Н. Филонова, В.К. Шитикова, Ю.И. Шокиной, С.А. Ямашкина.

Моделирование, анализ и проектирование пространственно-распределенных систем мониторинга и сенсорных сетей обстоятельно исследовалось в работах В.Е. Антсиперова, И.Б. Архимандритова, E. Bartocci, Н.П. Будко, М. Васильченко, V. Goncharenko, D.F. Gordon, H. Gerritsen, C.S. Jensen, А. Завьялова, С.Н. Замуруева, А.В. Зюзина, Э.А. Кирсанова, Д.А. Клетскова, М.В. Кныша, А.А. Кочкарова, M. Loreti, H. Lu, В.А. Ненашева, L. Nenzi, D.S. Necsulescu, З.Х. Павловой, С.В. Петренко, А.И. Полубехина, С.Н. Разинькова, А.А. Сенцова, G. Simons, А.А. Сироты, J.A. Stanković, Д.Р. Струкова, А.В. Тимошенко, D. Uciński, А.А. Чепиги, Е.А. Чернецовой.

Сложные сети, многоуровневые иерархические системы, крупномасштабные системы обладают свойствами самоподобия (фрактальности), но эти свойства проявляются и усиливаются в больших масштабах. Поэтому для моделирования применяются большие предфрактальные графы – предфрактальные графы большой размерности. В работах S.N. Dorogovtsev, J.F.F. Mendes, M. Newman, A.L. Barabasi, D.J. Watts предлагается исследование структуры и динамики сложных сетей. В классической работе M.D. Mesarovic, D. Masco, Y. Takahara предлагается теория многоуровневых иерархических систем. Также, теоретические основы и алгоритмы теории графов, сетей и анализа сложных систем изучали A. Abdelkader, A.V. Aho, R.K. Ahuja, R. Albert, J.A. Bondy, S.P. Borgatti, U. Brandes, M.H. van Emden, D. Watts, M. Welling, В.Г. Визинг, В.В. Воеводин, Э.И. Воробьев, J. Gao, J. Gilmer, S.K. Graves, M. Gromov, В.А. Емеличев, Я.М. Ерусалимский, L.A. Zadeh, J. Yellen, A. Kamień, D. Kempe, J. Kepner, T.N. Kipf, A. Clauset, T. Cormen, D. Koutra, А.Е. Кучерявый, J. Leskovec, Z. Li, B. Mandelbrot, А.Н. Назаров, A. Neumaier, J.B. Orlin, C. Papadimitriou, В.А. Перепелица, P. Sanders, И.В. Сергиенко, U.M. Spears, S. Strogatz, F. Harary, S. Shen-Orr, P. Erdős.

Проблемы многокритериальной оптимизации, нечетких и интервальных методов в управлении и принятии решений рассматривались в работах E. Walter, V.G. Vizing, И.В. Дорожко, L.A. Zadeh, A. Kaufmann, M. Kiefer, V. Kreinovich, В.А. Малышева, А.С. Немировского, В.Д. Ногина, A. Neumaier, С.А. Орловского, Н.А. Осипова, Ф.Ф. Пащенко, В.В. Подиновского, В.С. Прокофьева, А.В. Пролубникова, А.А. Сироты, S. Ferson, E. Hansen.

Вопросы сетевой и структурной устойчивости, реконфигурации и безопасности сложных систем исследованы в работах K. Asdre, L. Babai, А.С. Багдасаряна, М.Т. Балдычева, В.А. Бондаренко, В.В. Бородина, Н.В. Бочарова, В.В. Воеводина, F. Gavril, M.R. Garey, А.А. Горбачева, S. Dantas, D.S. Johnson, N.S. Dimitrova, Д.О. Есикова, П.В. Закалкина, В.А. Захарова, G. Caldarelli, А.В. Касаркина, А.А. Кочкарова, С.И. Макаренко, И.Я. Машталера, E. Mineka, Р.Л. Михайлова, Д.А. Москвина, С.В. Прокопчиной, А.В. Пролубникова, S. Svirin, С.П. Соколовского, Д.А. Тавалинского, А.В. Тимошенко, В.А. Шевцова, А.Н. Щегряева.

Несмотря на самостоятельность класса предфрактальных и фрактальных графов вся терминология, описания и методы соответствуют методологии и канонам теории графов. Все разработки в диссертации опираются на труды ученых, ставших уже классиками, среди них – Р. Басакер, К. Берж, М. Гэри, Д. Джонсон, Р. Дистель, А.А. Зыков, Н. Кристофидес, О. Оре, Т. Саати, М. Свами, У. Татт, К. Тхуласираман, Р. Уилсон, Ф. Харари, а также на труды представителей современных научных школ

по дискретной математике и математической кибернетике – В.Б. Алексеев, С.Н. Васильев, О.М. Касим-Заде, А.Н. Каркищенко, С.А. Малюгин, А.А. Сапоженко, В.А. Соколов и теории графов – Л.Г. Афраймович, В.А. Бондаренко, В.Л. Дольников, А.М. Кочкаров, А.А. Евдокимов, М.А. Иорданский, А.М. Райгородский, М.Х. Прилуцкий и др.

Постановки многокритериальных задач на предфрактальных графах, предложенные в диссертации, соответствуют принятым в теории оптимизации подходу к описанию и опираются на работы Ф.Т. Алескерова, В.Д. Барыкина, В.П. Бермана, М.Г. Гафта, В.А. Емеличева, Р.Л. Кини, В.Д. Ногина, В.М. Озерной, В.А. Перепелицы, В.В. Подиновского, И.В. Сергиенко и др. В частности, В.А. Емеличев и В.А. Перепелица показали, что известные массовые задачи в многокритериальной постановке с двумя весовыми и одним топологическим критериями являются труднорешаемыми.

Исследования в области арифметики нечетких чисел рассмотрены в работах таких известных авторов как Г. Алефельд, Б.С. Добронев, Л.В. Марченко, Л.А. Калмыков, Т.И. Назаренко, Ю. Херцбергер, С.П. Шарый, Ю.И. Шокин (по интервальному исчислению); Л. Заде, А. Кофман (арифметика нечетких множеств); М.Дж. Кендалл, А. Стьюарт (обработка временных рядов). При этом в научных исследованиях уделяется внимание только частным постановкам с ограниченным количеством весов: Р. Hansen исследует двухкритериальную задачу поиска кратчайшего пути; Н.W. Coley, J.D. Moon – задачу поиска путей в сетях с векторными весами; L. Galand, A. Ismaili, P. Perny, O. Spanjaard – многокритериальную задачу двунаправленного поиска на основе предпочтений и др.

В диссертации также исследуются известные NP-полные задачи, которые формулируются в постановках M.R. Garey, D.S. Johnson в теоретико-графовой терминологии F. Nagary, и предлагаются условия разрешимости для некоторых подзадач. В современной литературе можно выделить следующие работы: A. Karcı предлагает вычислять эффективность и неэффективность всех узлов графа для разработки методов решения NP-полных и NP-трудных задач; A.V. Kasarkin, I.I. Levin, D.A. Sorokin предлагают параллельный итерационный алгоритм решения задачи создания параллельно-конвейерных программ реконфигурируемых вычислительных систем; J.-H. Nuh, J. Hwa, Y.-S. Seo используют генетический алгоритм для декомпозиции иерархических подсистем крупномасштабных программных систем. В этих работах исследуются преимущественно отдельные NP задачи, но не предлагаются общие подходы решения всего класса или подкласса задач.

Для решения исследуемых задач в диссертации разработаны параллельные алгоритмы, основанные на свойствах предфрактальных графов. Серия алгоритмов представляет собой основу для формирования общего подхода к разработке параллельных алгоритмов на предфрактальных графах. Для разработки параллельных алгоритмов использовалась структурная параллелизация. Классификация, описание и методы построения параллельных алгоритмов основаны на работах известных ученых – А.С. Антонова, В.В. Воеводина, Г.И. Марчука, Г.Р. Эндрюса и др.

Несмотря на глубокую проработку многих положений, в них недостаточно рассмотрены вопросы:

- роста размерности графовых структур и высокой динамичности их топологии, приводящие к увеличению времени реконфигурации СДСС НПМ БР без специальных методов редукции и приближенного моделирования;
- расширения набора деструктивных воздействий, меняющих структурно-функциональное состояние системы;
- ограничений известных моделей, численных методов и алгоритмов при работе с большими графами, не позволяющих использовать их в задачах адаптивного управления СДСС НПМ БР при быстро меняющихся условиях;
- адаптации больших предфрактальных графов для их применения с многими нечеткими весами, в том числе для решения массовых многокритериальных задач.

Кроме того, недостаточно уделено внимания параллельным алгоритмам, основанным на свойствах предфрактальных графов.

В связи с этим было выявлено **противоречие в науке** между необходимостью развития научно-методического инструментария оптимизации СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий и отсутствием метода реконфигурирования СДСС НПМ БР с сохранением ее структурно-функциональных характеристик в заданных пределах.

Цель и задачи исследования. Выявленное практическое противоречие определяет цель диссертационного исследования – повышение оперативности принятия решений о реконфигурировании структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности с сохранением ее структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий.

В соответствии с поставленной целью в диссертационном исследовании решаются следующие задачи:

- разработать теоретико-графовую модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности;

- разработать комплексный показатель оценки состояния структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности;

- разработать метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий;

- разработать программно-алгоритмический комплекс реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при возникновении аномальных вычислительных сложностей.

Объектом исследования в работе является структурно-динамическая сетевая система непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.

Предметом исследования выступают методы реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.

На основании вышеизложенного и в соответствии с поставленной целью, **научная проблема** заключается в отсутствии методов реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности для повышения оперативности принятия оптимальных решений о реконфигурации сети с сохранением ее структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий.

Область исследования диссертации соответствует п. 6. «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей (технические науки)»; п. 7. «Качественные или аналитические методы исследования математических моделей (технические науки)»; п. 9. «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки)» Паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Научная новизна исследования. В диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной и формирующие метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности:

1) Теоретико-графовая модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, *отличающаяся* от известных моделей информационного взаимодействия в сети передачи данных пространственно-распределенной системы непрерывного мониторинга и моделей в системах связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий *тем, что* по результатам формализации деструктивных воздействий на процесс непрерывного пространственного мониторинга большой размерности с применением многовзвешенного предфрактального динамического графа сформирована сложная иерархическая и самоподобная структура системы, определена зависимость структурных (динамическая структура, количество средств мониторинга, коэффициенты связности) параметров и количественных параметров (интенсивности трафиков, коэффициенты трафиков, пропускная способность каналов) системы от стохастических изменений деструктивных воздействий различных комбинаций и последовательностей, и за счет формирования на динамическом графе набора недетерминированных весов (интервальных чисел, нечетких множеств, временных рядов) модифицированным методом взвешивания нечеткими числами, *учитывающая* процессы структурного разрушения, и *позволяющая* установить зависимости основных параметров системы при условии влияния деструктивных воздействий различной природы для оперативных реконфигураций всей структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.

2) Новый комплексный показатель оценки состояния структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности – агрегированный топологический индекс, *отличающийся* от известных тем, что в формализованном виде *учитывает* влияние деструктивных воздействий на систему посредством объединения структурно-топологических характеристик, сведенных в единое нормированное пространство, при этом в качестве весовых коэффициентов метрик используется их чувствительность относительно заданных на систему требований, количественно отражающая изменение значения метрики в процессе реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, *что позволяет* оценивать текущее состояние системы и принимать решения об оперативном ее реконфигурировании для обеспечения структурно-функциональной устойчивости.

3) Метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, *отличающийся* от известных метода управления и формирования адаптивных сетей связи и метода многоагентного построения и управления самоорганизующейся сетью передачи

данных наземно-воздушной системы мониторинга: **построением** начального графа конфигурации в соответствии с заданными требованиями и **применением** теоретико-графовой модели, учитывающей иерархические уровни на предфрактальных графах, а также механизм порождения последовательности конфигураций; **формированием** агрегированного топологического индекса текущего графа конфигурации, включающим его структурно-функциональные характеристики; **реконфигурированием** графа конфигурации для обеспечения требуемых значений агрегированного топологического индекса и штатного функционирования системы в условиях деструктивных воздействий, включающим в себя операцию воздействия (деструктивного, управляющего) на граф конфигурации и его влияние на агрегированный топологический индекс, процедуру и описание операции реконфигурирования и операцию распределенного параллельного реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий; **многокритериальной оптимизацией** графа конфигурации при возникновении аномальных вычислительных сложностей, посредством классификации многокритериальных задач на многовзвешенных предфрактальных графах с действительными и нечеткими числами, частной методики решения многокритериальных задач класса предфрактальных графов большой размерности, частной методики противодействия аномальной вычислительной сложности оптимизации, в том числе выделены условия, при которых возможно выделить решения для ряда NP-полных задач на предфрактальных графах; **что позволяет** сохранять структурно-функциональные характеристики структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в соответствии с агрегированным топологическим индексом на заданном уровне при изменении ее состава и структуры.

4) Программно-алгоритмический комплекс реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при возникновении аномальных вычислительных сложностей, **отличающийся** от известных комплекса многокритериального планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов и комплекса управления информационным взаимодействием между элементами пространственно-распределенной системы непрерывного мониторинга с динамической структурой **тем, что** состав блоков реконфигурирования и оптимизации дополнен алгоритмами выделения остовного леса минимального веса, размещения кратных центра и медианы на интервально-взвешенном графе по результатам определения вершины графа конфигурации с наименьшим передаточным числом, при этом оптимизация графа конфигурации при возникновении аномальных

вычислительных сложностей производится по результатам оценки ускорения алгоритмов с учетом появления недетерминированных значений весов графа конфигурации, **что позволяет** сократить время реконфигурирования в диапазоне от 10 до 20% в условиях деструктивных воздействий при аномальной вычислительной сложности.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования выступают модели, методы и алгоритмы, которые изложены в трудах отечественных и зарубежных ученых, связанных с развитием методов оптимизации и реконфигурирования структурно-динамических сетевых систем, оценки их характеристик. В работе использованы теоретические и экспериментальные методов исследования:

– теоретические – анализ предметной области, системный анализ для декомпозиции предмета исследования и постановки научной проблемы, методы анализа иерархий, теории нечетких множеств, теория и методы системного анализа, математического моделирования и оптимизации, математическая теория систем, теория принятия решений, теория графов, численные методы, теория управления, методы теории алгоритмов, параллельной арифметики, интервального исчисления, дискретной математики, теории оптимизации, исследования операций при решении частных научных задач;

– экспериментальные – моделирование процесса реконфигурирования СДСС НПМ БР и анализ полученных экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1) Теоретико-графовая модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, **позволяющая** в условиях деструктивных воздействий описать пространство эффективных состояний системы для ее оперативных реконфигураций с меньшей вычислительной сложностью на 10% и более (С. 72-115).

2) Агрегированный топологический индекс комплексной оценки состояния структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, **характеризующий** текущее комплексное состояние системы и **позволяющий** принимать решения об оперативном реконфигурировании для обеспечения ее структурно-функциональной устойчивости (С. 116-167).

3) Метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, *позволяющий* сохранять структурно-функциональные характеристики системы в соответствии с агрегированным топологическим индексом на заданном уровне в пределах расхождения 10%, *обладающий* оперативностью принятия решений, превышающей известные методы в несколько раз (С. 168-264).

4) Программно-алгоритмический комплекс реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при возникновении аномальных вычислительных сложностей, *содержащий* блоки реконфигурирования и оптимизации и *дополненные* алгоритмами выделения остовного леса минимального веса, размещения кратных центра и медианы на интервально-взвешенном графе конфигурации, *позволяющий* сократить время реконфигурирования в диапазоне от 10 до 20% (С. 265-306).

Теоретическая значимость работы заключается в дальнейшем развитии методов оптимизации и реконфигурации структурно-динамических сетевых системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий в части методов многокритериальной оптимизации графов большой размерности с фрактальными свойствами, взвешенных многими недетерминированными весами; в развитии алгоритмической базы решения модельных многокритериальных задач; в расширение применения параллельных алгоритмов на графах.

Практическая значимость работы определяется тем, что:

1) разработанный метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности позволяет контролировать состояние системы в соответствии с заданным диапазоном агрегированного топологического индекса в условиях дестабилизирующих воздействий и повысить оперативность и эффективность управляющих действий по ее реконфигурации;

2) разработанные параллельные алгоритмы позволяют сформировать общий подход к разработке параллельных алгоритмов на предфрактальных графах для снижения вычислительной сложности решаемых системой мониторинга задач;

3) предложенные в диссертации классы полиномиальных задач на предфрактальных графах и построение алгоритмов их решения обеспечивают формирование шаблонов для выделения классов полиномиальных задач и алгоритмов на СДСС НПМ БР.

Прикладные исследования проводились на программно-алгоритмическом комплексе реконфигурирования СДСС НПМ БР. По результатам диссертационного исследования зарегистрированы программы для ЭВМ в 2025 г.: «Вычисление агрегированного топологического индекса на предфрактальных графах большой размерности»; «Программный комплекс конструирования и оперативного реконфигурирования структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности».

Степень достоверности, апробация и внедрение результатов исследования. Степень достоверности результатов исследования подтверждается:

- корректным применением методов системного анализа при декомпозиции предмета исследования и постановке научной проблемы; использованием метода анализа иерархий, теории нечетких множеств, теория и методы системного анализа, математического моделирования и оптимизации, математическая теория систем, теория принятия решений, теория графов, численные методы, теория управления, методы теории алгоритмов, параллельной арифметики, интервального исчисления, дискретной математики, теории оптимизации, исследования операций при решении частных научных задач;

- проведенными в достаточном объеме вычислительными экспериментами и практической реализацией и апробацией разработанной теоретико-графовой модели структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, численных методов и комплекса программ;

- сравнительным анализом результатов моделирования с экспериментальными данными;

- публикацией основных результатов исследований в научной печати, их положительной апробацией на научных конференциях и практической апробацией основных положений в опытно-конструкторских работах.

Основные положения и результаты работы представлены и получили одобрение на различных научных мероприятиях, в том числе: на Первой международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» (г. Переславль-Залесский, Институт системного анализа РАН, 12-16 сентября 2005 г.); на IX Международной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки» (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 23-27 октября 2006 г.); на Международной конференции «Проблемы функционирования информационных сетей» (г. Новосибирск, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 31 июля - 3 августа

2006 г.); на Международной междисциплинарной научной конференции «Идеи синергетики в естественных науках» (г. Тверь, Тверской государственный университет, 19-21 апреля 2007 г.); на VII Международной конференции «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» (Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 13-14 ноября 2007 г.); на Международной научной конференции «Перспектива» (г. Нальчик, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 24-28 апреля 2008 г.); на III Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (г. Таганрог, Южный федеральный университет, 24-28 марта 2008 г.); на V Международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» (Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 26-28 октября 2010 г.); на XIX Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (Москва, Российский государственный гуманитарный университет, 21 декабря 2011 г.); на IV Международной конференции «Нелокальные краевые задачи и родственные проблемы математической биологии, информатики и физики» (г. Нальчик, Кабардино-Балкарский научный центр НИИ Прикладной математики и автоматизации РАН, 4-8 декабря 2013 г.); на I Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах» (г. Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет, 20-24 октября 2014 г.); на II Всероссийской научно-технической конференции молодых конструкторов и инженеров «Минцевские чтения» (Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 26 ноября 2015 г.); на IV Всероссийской научно-технической конференции «РТИ Системы ВКО-2016» (Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-3 июня 2016 г.); на IV Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики» (г. Нальчик, Федеральный научный центр Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, 22-26 мая 2018 г.); на III Международной научно-технической конференции «The 2019 Symposium On Cybersecurity Of The Digital Economy» (г. Казань, Университет Иннополис, 22-24 мая 2019 г.); на V Всероссийской научно-практической конференции «Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления» (Москва, Экспертно-аналитический центр, 27 декабря 2019 г.); на XII Международной научно-практической конференции «Современная математика и концепция инновационного математического образования» (Москва, Финансовый университет, 11 июня 2025 г.); на XVIII Международной конференции «Управление

развитием крупномасштабных систем» (Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 24-26 сентября 2025 г.).

Отдельные положения диссертационного исследования получены в рамках выполнения следующих научно-исследовательских работ Финансового университета: «Развитие методологии и инструментальной поддержки программно-целевого управления» в 2010 г. в части исследования целевых программ, разработки методики обработки деревьев программ, постановки и решения задачи о назначениях на двудольном графе; «Исследование целесообразности и экономической эффективности открытого распространения части продуктов разработчиками программного обеспечения» в 2013 г. в части исследования рынка программных продуктов и формализации процедуры распространения программного обеспечения в виде графовой схемы; «Разработка аналитического инструментария оценки эффективности российского импорта товаров и услуг и разработка системы индикаторов эффективности импортозамещения» в 2016 г. в части построения сбалансированного дерева индикаторов эффективности; «Разработка учетно-контрольной системы реализации инвестиционных проектов с государственным участием» в 2016 г. в части разработки формального представления проекта в виде дерева мероприятий; «Исследование механизмов формирования и функционирования бюджетных фондов инфраструктуры на основе модели концессионного контракта жизненного цикла с учетом косвенных эффектов в ЖКХ» в 2017 г. в части построения жизненного цикла с учетом дополнительных параметров; «Анализ релевантных сегментов российского рынка мобильных устройств» в 2023 г. в части построения сетевого графика распространения мобильных операционных систем, «Проектно-аналитическое исследование информационных систем финансово-экономического и управленческого блоков АО «КАВКАЗ.РФ» в 2023 г. в части разработки структурно-динамической системы связи модулей информационных систем, «Система компьютерного зрения для анализа циркадных ритмов растений», в 2023 г. в части построения графа классификации видов изображений.

Научные исследования диссертационной работы также поддержаны грантами РФФИ: «Разработка методики оценки результативности и эффективности реализации государственных целевых программ» в 2017 г. в части разработки методики оценки результативности целевых программ посредством построения структурно-динамических деревьев; «Разработка моделей и методов комплексного мониторинга для оптимального планирования и управления грузоперевозками в интегрированных транспортно-логистических системах на основе структурно-динамического подхода» в 2018 г. в части разработки модели структурно-динамической сетевой транспортно-логистической системы.

Результаты исследования использованы в практической деятельности:

– АО «НПП «Рубин» – в ходе выполнения ОКР и НИР по разработке перспективных образцов вооружения, военной и специальной техники в части разработки алгоритмов и методов многокритериальной оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности с гарантированными оценками, а также разработки метода динамического реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий;

– АО НПП «Автоматизированные системы связи» – при проектировании мобильных терминалов высокосортной спутниковой связи с учетом особенностей объектов базирования. Использование агрегированного топологического индекса оценки состояния структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности позволяет корректно оценивать текущее состояние структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности и принимать решения об оперативной реконfigurации для обеспечения структурно-функциональной устойчивости системы;

– АО «Концерн «Созвездие» – при разработке перспективных комплексов управления и новых образцов техники радиосвязи в части теоретико-графовой модели структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, что позволило установить зависимости основных параметров сети передачи данных при различных сценариях влияния деструктивных воздействий различной природы.

– ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» – при оценке параметров траекторных измерений при техническом проектировании перспективного информационного комплекса в части метода реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, что позволяет сохранять структурно-функциональные характеристики системы в соответствии с агрегированным топологическим индексом на заданном уровне при изменении ее состава и структуры.

– ООО «СОЭЗ» – при разработке систем управления перспективных стволопроходческих и тоннелепроходческих комплексов в части теоретико-графовой модели структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности и агрегированного топологического индекса оценки состояния системы, что позволило оценить функционирование на

информационном уровне систем управления пространственно-распределенными комплексами мониторинга и реагирования в условиях различных быстросменяемых сценариев деструктивных воздействий;

– АО «НПП «Пульсар» – материалы диссертационных исследований в части организации многодатчиковой системы непрерывного мониторинга, с использованием модели структурно-динамического сетевого мониторинга производственных систем, апробированы и использованы при разработке и организации непрерывного сквозного технологического процесса создания современной ЭКБ, что позволило сформировать мониторинг оборудования различного назначения, объединенного в полные многоэтапные технологические циклы в производственном комплексе.

Материалы диссертационного исследования использовались в учебном процессе:

– Кафедрой искусственного интеллекта Факультета информационных технологий и анализа больших данных Финансового университета в преподавании учебных дисциплин «Прикладная теория графов», «Технологии и алгоритмы анализа сетевых моделей», «Машинное обучение в семантическом и сетевом анализе» для обучающихся по направлению подготовки 01.03.02 «Прикладная математика и информатика»;

– Кафедрой «Радиотехнические системы» ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» в практикуме по дисциплине «Методы моделирования устройств и систем» для бакалавров направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника»;

– Кафедрой «Информационные системы и технологии» Института цифровых технологий ФГБОУ ВО «Северо-Кавказская государственная академия» в преподавании учебных дисциплин «Дискретная математика» раздел теория графов, «Сетевые технологии в прикладной области», «Технологии сетевого программирования» для обучающихся по направлению подготовки 09.03.03 «Прикладная информатика».

Апробация и внедрение результатов исследования подтверждены соответствующими документами.

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 41 научной публикации общим объемом 103,93 п.л. (авторский объем – 87,37 п.л.), в том числе в 4 авторских монографиях объемом 66,0 п.л., в 24 статьях общим объемом 21,95 п.л. (авторский объем – 12,98 п.л.), опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России (1 статья – в издании K1, 4 статьи – в изданиях K2), в 3 статьях общим объемом 2,98 п.л. (авторский объем – 0,9 п.л.), опубликованных в изданиях, включенных в цитатно-аналитическую базу RSCI,

а также 5 статьях объемом 8,24 п.л. (авторский объем – 5,45 п.л.), опубликованных в изданиях, включенных в международную цитатно-аналитическую базу Scopus (4 статьи – в изданиях Q2, 1 статья – в издании Q3).

Личный вклад автора. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно. Из числа совместных научных работ в диссертации отражены только результаты, полученные лично автором.

Структура и объем диссертации определены целью, задачами и логикой исследования. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 455 наименований, списка иллюстративного материала. Текст диссертации изложен на 421 странице, содержит 97 рисунков и 18 таблиц.

II Основное содержание работы

Во введении представлены актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель и научная проблема исследования, дана оценка новизны и практической значимости полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены апробация результатов работы и публикации по теме диссертации.

Первая глава посвящена анализу научно-методического аппарата моделирования и реконфигурирования СДСС НПМ БР и обоснование необходимости разработки новых модели и метода ее реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий.

Исследования, проведенные в настоящей диссертации, показали, что рост как количества различных систем мониторинга, так и их оснащенности разнородными датчиками и приборами, формирует новый перечень математических и инженерно-технических проблемно-ориентированных задач и в первую очередь задач реконфигурирования системы в условиях внешних факторов в целях сохранения функциональности системы. В случае выхода какого-либо из значений характеристик за заданные ограничения необходимо провести реконфигурирование системы для возвращения ее функциональности.

Отмечено, что выполнение задачи мониторинга и функционирование СДСС НПМ БР с заданным качеством мониторинга в условиях деструктивных воздействий должно обеспечиваться следующими свойствами: устойчивостью – отражает способность системы мониторинга выполнять задачу мониторинга при выходе элементов из строя в условиях деструктивных воздействий естественного и искусственного характера; целостностью – отражает сохранение беспрепятственного доступа к средствам мониторинга в условиях деструктивных воздействий. При этом

важной задачей сохранения функциональности СДСС НПМ БР является формирование комплексного структурно-топологического показателя оценки состояния в меняющихся внешних условиях при различных деструктивных воздействиях естественного и искусственного характера, который должен учитывать:

- состояние сложной многоэлементной системы в динамике;
- структурные особенности системы (иерархичность, наличие рангов структуры ее подсистем и др.);
- влияние деструктивных воздействий на структурно-функциональные характеристики (устойчивость, целостность, надежность, а также другие характеристики живучести).

Таким образом, СДСС НПМ БР выступает в качестве инструментария моделирования сложных систем мониторинга большой размерности с меняющейся во времени структурой связей средств мониторинга в условиях деструктивных воздействий естественного и искусственного характера.

Для обеспечения функциональности СДСС НПМ БР, выполнения задачи мониторинга и сохранения характеристик системы в заданных пределах необходимо динамическое реконфигурирование системы при повторяющихся деструктивных воздействиях. В связи со структурной сложностью и динамической топологией СДСС НПМ БР задача реконфигурирования за приемлемое время и допустимой вычислительной сложностью является актуальной и требует новых методов. Наличие сложных условий функционирования и больших объемов данных, обрабатываемых в СДСС НПМ БР, затрудняет достижение заданных параметров оперативности, устойчивости и качества мониторинга, в том числе в условиях деструктивных воздействий.

На основе проведенного анализа отечественных и зарубежных научных работ в области реконфигурации систем в диссертации предлагается решение задачи реконфигурирования СДСС НПМ БР. При этом выявленные недостатки с точки зрения применения предложенных методов к СДСС НПМ БР, в частности таких как вычислительная сложность и масштабируемость, обуславливают необходимость разработки графовых моделей и алгоритмов, ориентированных на оперативную реконфигурацию, способных работать в условиях неполных данных, а также учитывать динамические изменения сети и обеспечивать приемлемое время реакции для систем реального времени.

На основании вышеизложенного решаемая научная проблема заключается в разработке метода реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, обеспечивающего повышение оперативности принятия оптимальных решений о реконфигурации сети с сохранением ее структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий.

Разрешение сформулированной научной проблемы способствует развитию теоретической и методологической базы реконfigurирования СДСС НПМ БР в условиях воздействия деструктивных факторов. Декомпозиция поставленной научной проблемы представляется в виде следующей совокупности взаимосвязанных частных задач:

– разработать модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности на основе анализа научно-методического аппарата реконfigurирования и особенностей функционирования систем;

– разработать комплексный показатель, объединяющий различные структурно-топологические и функциональные характеристики структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности;

– разработать метод реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности;

– разработать программно-алгоритмический комплекс реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при возникновении аномальных вычислительных сложностей.

Научная проблема представляется в формализованном виде (1) и (2)

$$\text{МЕТОД: } ATI = \arg \min_{ATI} \tau \left(H(S, N_{cp}, N_m), ATI, G = (V, E), S(A(T_d, T_p, N_{cp}, N_{\pi})) \right), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{МОДЕЛЬ} &= H(N_{cp}(P_{ccp}, P_{nap}, Z, Tr), N_m(N_{cp}, P_{cc}, B, \rho)), \\ &\text{при ограничениях } \rho \leq \rho_0, T_d + T_p \leq T_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где МЕТОД – метод реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности;

ATI – агрегированный топологический индекс;

τ – время принятия оптимальных решений о реконfigurации;

H – пространственно-временные характеристики системы мониторинга;

S – последовательность конфигураций системы мониторинга;

N_{cp} – наборы приоритетных средств;

N_m – наборы маршрутов доведения;

A – алгоритмы реконfigurирования сети передачи данных;

T_d – время доведения информации до конечных потребителей;

T_p – время проведения реконfigurаций;

N_{π} – наборы конечных потребителей информации;

МОДЕЛЬ – теоретико-графовая модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности;

$P_{ср}$ – параметры средств мониторинга;

$P_{нап}$ – параметры объектов мониторинга;

Z – зона покрытия средств мониторинга;

Tr – траектории движения объектов;

$P_{сс}$ – параметры средств связи;

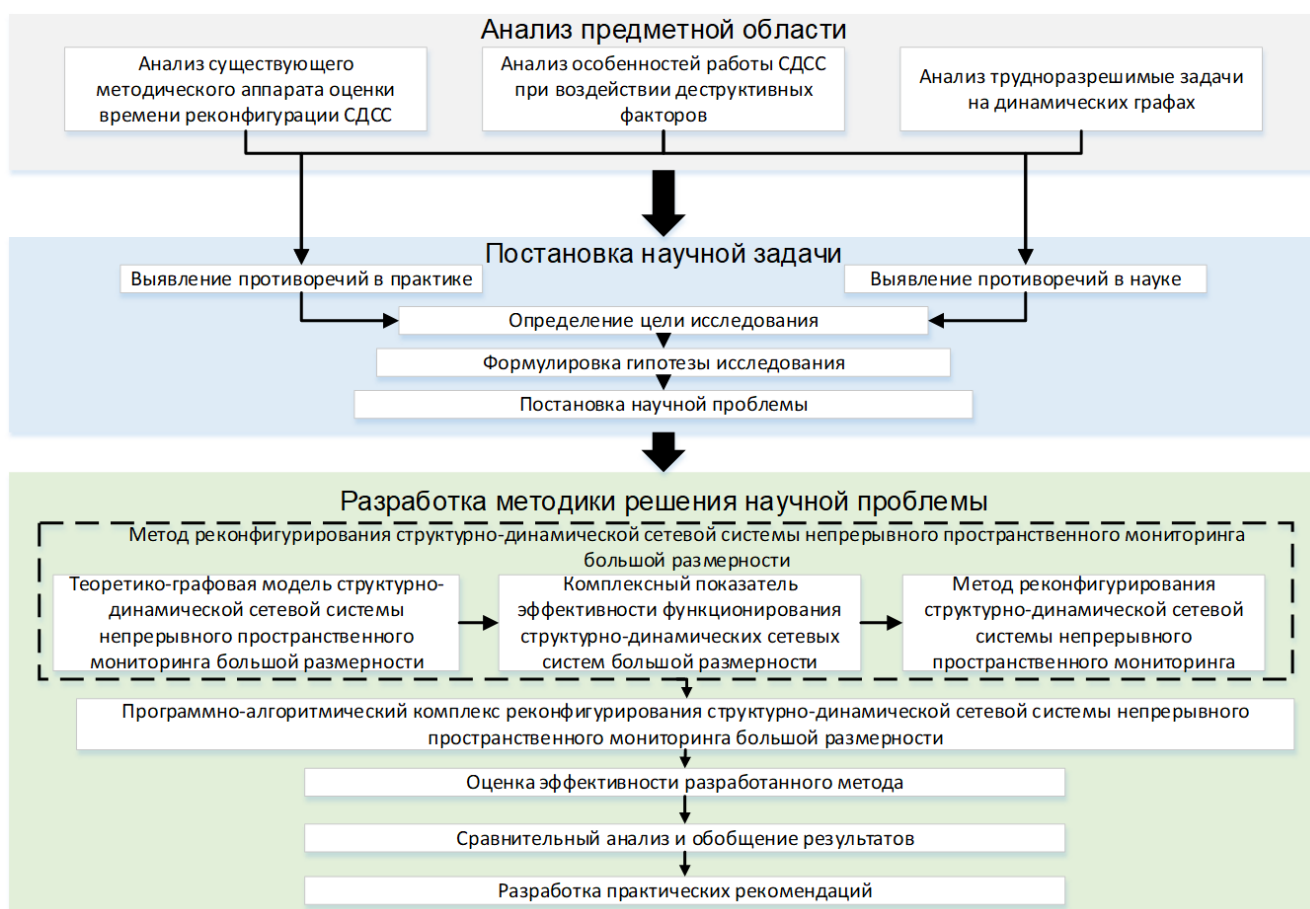
B – внешние воздействия;

ρ – радиус устойчивости;

ρ_0 – ограничения по радиусу устойчивости;

T_0 – ограничения по времени.

В соответствии с выполненной постановкой научной проблемы на рисунке 1 представлена схема исследований, определяющая общую структуру работы. В целом, представленная схема исследований в работе построена в соответствии с общими принципами системного подхода: анализ предметной области для обоснования цели исследований, моделирование предметной области, разработка методики решения задачи, реализация и оценка эффективности использования предлагаемой методики.



Источник: составлено автором.

Рисунок 1 – Схема диссертационного исследования

Во **второй главе** приведена теоретико-графовая модель СДСС НПМ БР.

Достижение цели исследования – повышение оперативности принятия решений о реконфигурировании СДСС НПМ БР, обуславливает необходимость формализации этапов жизненного цикла системы мониторинга, в значительной степени зависящих от разнородных и динамических воздействий. Исследования показали, что такими этапами являются этапы конфигурирования СДСС НПМ БР, ее функционирования в условиях деструктивных воздействий и разрушения. Под указанными понятиями в диссертации понимается:

– конфигурирование (или построение графа конфигурации $G_{\text{конф}}$) – это процесс определения всех свойств и параметров СДСС НПМ БР, обеспечивающих выполнение задач мониторинга с требуемыми значениям \hat{m}_i метрик m_i ;

– штатное функционирование в условиях деструктивных воздействий (граф воздействий $G_{\text{возд}}$) – это сохранение заданных структурно-функциональные характеристик в пределах допустимых значений за счет управляющих воздействий (далее – УВ) на граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ (3)

$$G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{возд}}^{t+1} \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+2} | G_{\text{возд}}^{t+2} \xrightarrow{\text{УВ}} \dots \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+n}, \quad (3)$$

где t – топологическое время;
 $\xrightarrow{\text{УВ}}$ – управляющие воздействия.

Управляющее воздействие – это применение графа воздействия, направленное на восстановление структурно-функциональных характеристик графа конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ после воздействия $G_{\text{возд}}^t$ (4)

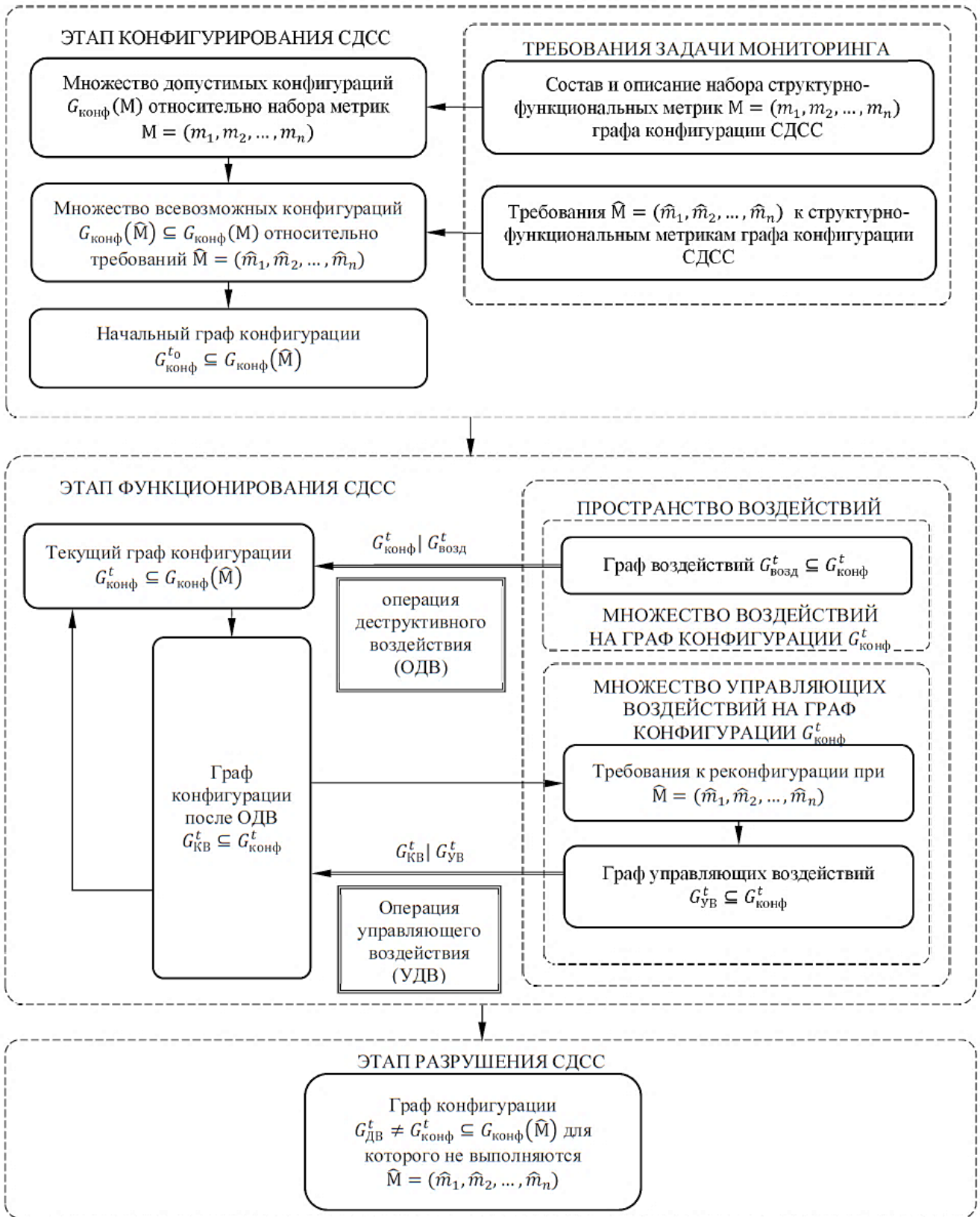
$$G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t = G_{\text{КВ}}^t | G_{\text{УВ}}^t = G_{\text{конф}}^{t+1}, \quad (4)$$

где $G_{\text{КВ}}^t$ – граф, полученный после операции воздействия $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t$;
 $G_{\text{УВ}}^t$ – граф управляющего воздействия.

Под разрушением СДСС НПМ БР понимается управляемое при помощи УВ или контролируемое в процессе естественных воздействий структурное разрушение графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ без возможности его восстановления.

Формализованное описание рассмотренных этапов жизненного цикла СДСС НПМ БР в виде схемы приведено на рисунке 2.

Отмечено, что формализованное описание жизненного цикла позволяет определить перечень задач, решаемых теоретико-графовой моделью СДСС НПМ БР.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2 – Формализованное описание жизненного цикла СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий

В частности, модель должна отражать структуру СДСС НПМ БР со всеми особенностями, обеспечивать своевременность, достоверность и полноту передачи информации между элементами системы, определять состояние СДСС НПМ БР в

непрерывном (топологическом) времени и обеспечивать процедуру оптимального конфигурирования и динамического реконфигурирования системы для выполнения задачи мониторинга. При этом на каждом из этапов динамическое реконфигурирование предоставляет новые возможности: на этапе конфигурирования – построение графа конфигурации для текущей задачи мониторинга; на этапе функционирования – реконфигурирование графа конфигурации в условиях деструктивных воздействий; на этапе деактивации – последовательное реконфигурирование СДСС НПМ БР посредством УВ.

В диссертации предложена теоретико-графовая модель СДСС НПМ БР в виде трех взаимосвязанных блоков. Первый блок описывает непосредственно структуру СДСС НПМ БР, второй – представлен моделью распространения влияния деструктивных воздействий по структуре СДСС НПМ БР, третий – модель структурного разрушения сети передачи данных СДСС НПМ БР с расчетом возможных сценариев разрушения при различных критериях.

В рамках первого блока СДСС НПМ БР представляет собой иерархический предфрактальный граф $G_t^L = (V_t^L, E_t^L)$, каждый уровень иерархии которого является динамическим графом $G^l = (V^l, E^l)$, где $l = 1, 2, \dots, L$ – номер уровня иерархии.

В общем виде в графе G^l множество вершин $V = \{v_i\}$ состоит из узлов СДСС НПМ БР, где каждому узлу v_i назначены средства мониторинга из множества $V_k = \{v_{i_k}\}$. Предполагается, что на каждом узле v_i функционируют одинаковые наборы средств мониторинга по составу и количеству. Множество $E = \{e_{ij}\}$ состоит из каналов связи между узлами v_i и v_j , где каждому каналу связи e_{ij} предоставляются цифровые каналы из множества $E_k = \{e_{ij}^k\}$, где e_{ij}^k – цифровые каналы связи между средствами мониторинга v_{i_k} и v_{j_k} .

Характеристики цифровых каналов связи e_{ij}^k определяются весовыми значениями из множества $w_{ij} = (w_{ij}^1, w_{ij}^2, \dots, w_{ij}^k)$ с коэффициентом подобия $\theta \in (0, 1)$: $0 < \theta < a/b$, где $a, b > 0$ – действительные числа и $a < b$, где каждый вес представляет одно из свойств канала связи: w_{ij}^1 – пропускная способность канала; w_{ij}^2 – задержка передачи данных; w_{ij}^3 – надежность (вероятность отказа); w_{ij}^4 – стоимость использования канала (ресурсы, энергия и другие); w_{ij}^k – любое другое значимое свойство канала. В частном случае w_{ij}^k представляют собой описания протоколов из множества $\{\pi_s\}$. При этом цифровой канал соединяет два узла v_{i_k} и v_{j_k} , если в обоих узлах используется одинаковый протокол, w_{i_k} – описание (вес) средства мониторинга v_{i_k} , w_{ij} – настройка (вес) канала связи e_{ij} между узлами v_i и v_j .

Придание весов узлам и каналам связи на момент времени t формирует матрицу Λ_t распределения информационных потоков между узлами сети. При этом наложение матрицы Λ_t на граф G^l отражает информационную структуру СДСС НПМ БР на момент времени t . Конфигурация $S_t = \{\Lambda_t, G\}$ отражает состояние СДСС НПМ БР с заданными структурными и весовыми значениями элементов графа G^l в момент времени t . Состояние СДСС НПМ БР по завершению этапа конфигурирования соответствует конфигурации $S_{t_0} = \{\Lambda_{t_0}, G_{\text{конф}}\}$ – начальное состояние или начальная конфигурация СДСС НПМ БР.

Отмечена важность выделения промежутков между изменениями структуры СДСС НПМ БР, заключающаяся в необходимости разделения двух типов временных шкал:

- топологического времени, которое описывает редкие, но значительные изменения в структуре графа;
- операционного времени, в котором происходят частые и менее значительные изменения характеристик ребер и узлов (например, изменение пропускной способности или задержки).

При этом на каждом уровне предфрактального графа G^l может отличаться как структура связей, так и характеристики ребер, что обуславливает изменение весов ребер для каждого уровня l с учетом обеих временных шкал и неопределенности.

В результате, определение для каждого уровня l многокритериальной функции $F^{(l)}$, учитывающей характеристики ребер, временные изменения и неопределенность, позволяет формировать оптимизационную задачу вида (5)

$$\min_x \max_{w \in W} \left\{ \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \lambda_i^{(l)} F_i^l \left(x, w_{ij}^{(l)}(t + \Delta t), w_{ij}^{(l)}(T + \Delta T) \right) \right\}, \quad (5)$$

- где x – вектор решений (например, маршрутов);
 W – множество возможных значений весов, определяемое на основе неопределенности на обеих временных шкалах;
 $\lambda_i^{(l)}$ – весовые коэффициенты для каждого критерия i на уровне l ;
 $w_{ij}^{(l)}(t + \Delta t)$ и $w_{ij}^{(l)}(T + \Delta T)$ – веса ребер с учетом изменений на операционной и топологической временных шкалах соответственно.

Отмечено, что сочетание подхода с двухвременными шкалами в многокритериальной оптимизации создает баланс между адаптивностью к быстрым изменениям и устойчивостью к крупным событиям.

Модель распространения деструктивных воздействий составляет второй блок общей модели СДСС НПМ БР. Она описывает ситуации снижения функциональности системы (например, информативность или пропускную способность каналов), не выводя при этом ее из строя, что, однако, приводит к каскадному ухудшению работы связанных компонентов системы. Рассматриваемая модель описывает распространение внешних воздействий по системе, формализованной как ориентированный граф, где влияние представляется в виде импульсных воздействий, которые могут приводить к отказам элементов и нарушению процессов задач мониторинга. Для повышения надежности как отдельных элементов, так и системы в целом, применяются методы резервирования. Время достижения системой предельного состояния является основной мерой стойкости системы – его увеличение снижает риск выхода системы из строя. Поскольку работа элементов системы взаимосвязана, повреждение одних под действием внешних воздействий приводит к ухудшению работы других элементов, даже если они не были затронуты напрямую. Такое распространение функциональных воздействий, влияющих на значения весов элементов графа, и является предметом моделирования.

Направление распространения воздействия между элементами системы задается *ориентированным ребром*. Орграф моделируемой СДСС НПМ БР не имеет петель.

Надежность элемента системы – вероятность $P(t < T)$ его безотказной работы с момента начала воздействия в течении времени T . При переходе между элементами интенсивность воздействия ослабевает. Для $v_i \in V$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ из $G = (V, E)$ вес $w_i(t) = P_{v_i}(t < T)$, а $w(v_i, v_j) = w(e_{ij}) = w_{ij}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, $i \neq j$, дуги $(v_i, v_j) \in E$. Импульсное воздействие выражается импульсом $imp_j(t) = \frac{w_j(t)}{w_j(t-1)}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, при $t > 0$. Тогда $w_i(t+1) = w_i(t) \prod_{k=1}^{deg v_i} w_{ji} imp_j(t)$ и $imp_j(t+1) = \prod_{k=1}^{deg v_i} w_{ji} imp_j(t)$, где $deg v_i$ – число входящих дуг в вершину v_i . Автономное импульсное воздействие задается вектором начальных значений $W(0) = (w_1(0), w_2(0), \dots, w_n(0))$ и вектором импульсов $Imp(0) = (imp_1(0), imp_2(0), \dots, imp_n(0))$. В модели время t соответствует топологическому времени. Такое представление распространения внешних воздействий позволяет определять структурную уязвимость отдельных вершин и в целом состояние системы, в котором начинается разрушение системы.

Третий блок модели СДСС НПМ БР представлен частной моделью структурного разрушения, позволяющей определить ключевые сценарии распространения деструктивных воздействий, приводящих к ухудшению ее функционирования.

Для $t = 0$ осуществляется проверка по $v \in V$ и формируется множество \tilde{V}_1 , которого $w_0(\tilde{v}_j) \geq \bar{w}(\tilde{v}_j)$. Для остальных $t = 1, 2, 3, \dots, T$ верно правило (6)

$$w_{t+1}(v_{ij}^j) = w_t(v_{ij}^j) + \varepsilon_j \cdot \bar{w}(\tilde{v}_j), i_j = 1, 2, 3, \dots, |\xi(\tilde{v}_j^t)|, j = 1, 2, 3, \dots, |\tilde{V}_t|, \quad (6)$$

если $w_{t+1}(v_{ij}^j) \geq \bar{w}(v_{ij}^j)$, то вершина v_{ij}^j удаляется из графа G и $\tilde{V}_{t+1} + v_{ij}^j$.

Основной задачей моделирования структурного разрушения является определение зависимости времени разрушения T_{cr} от количества эпицентров – множества $\Phi(G)$ элементов, вышедших из строя (удаленные из структуры СДСС НПМ БР) в момент времени $t = 0$, сопоставляемых с внешними воздействиями.

Разработанная модель с предфрактальной динамической структурой обеспечивает гибкость, эффективное распределение ресурсов и учет сложных взаимосвязей СДСС НПМ БР и способствует более эффективному и точному решению оптимизационных задач в сложных и изменяющихся условиях.

В третьей главе предложен и обоснован новый показатель оценки структурно-функционального состояния СДСС НПМ БР. Рассмотрены характеристики, отражающие состояние и особенности функционирования СДСС НПМ БР. Отмечено, что для снижения последствий возможных деструктивных воздействий, а также прогнозирования поведения СДСС необходим структурно-функциональный показатель эффективности информационного взаимодействия учитывающий:

- состояние сложной многоэлементной системы в динамике;
- структурные особенности СДСС НПМ БР: иерархичность и наличие рангов структуры ее подсистем;
- влияние деструктивных воздействий на структурную составляющую системы: устойчивость, целостность системы, а также другие структурные характеристики живучести систем.

В диссертации разработано формализованное описание структурно-функциональных метрик в соответствии с графом конфигурации $G_{\text{конф}}$. Показано, что для оценки состояния СДСС НПМ БР и возможности ее реконфигурирования необходимо анализировать характеристики графа конфигурации $G_{\text{конф}}$, отражающие

свойства устойчивости, целостности, надежности и, в целом, живучести системы в условиях деструктивных воздействий.

С целью оперативной оценки текущего состояния и соответственно обоснованного управления состоянием СДСС НПМ БР разработан новый показатель эффективности – агрегированный топологический индекс (далее – АТИ, АТІ), представляющий собой линейную свертку структурно-функциональных метрик (7)

$$\text{АТІ} = a_1 m_1 + a_2 m_2 + \dots + a_k m_k, \quad (7)$$

где a_i – весовой коэффициент метрики;

$$a_i \in [0; 1], \sum_{i=1}^n a_i = 1;$$

m_i – нормализованное значение структурно-функциональной метрики.

При этом, так как структура СДСС НПМ БР является адаптивной (динамический граф), то во времени меняется и $\text{АТІ}_t = a_1 m_{t1} + a_2 m_{t2} + \dots + a_k m_{tk}$, где его составляющие могут учитывать уровни и характеристики подграфов (подсистем). В качестве составляющих m_i могут выступать различные характеристики сети, такие как число центров и медиан, коэффициент кластеризации, количество кратчайших путей, плотность графа и многие др. В таком случае, показатель АТІ_t является инструментом управления структурно-топологическими характеристиками СДСС НПМ БР в момент времени t , а также управления ее составляющими $a_i m_{it}$. Текущие оценки каждой из метрик m_i позволяют анализировать эффективность СДСС НПМ БР в части информационного взаимодействия между средствами системы, как с точки зрения структуры и ее качества, так и с точки зрения характера информационного обмена во времени.

Показано, что с точки зрения оптимизационной задачи – выбора составных частей АТИ, вычисление метрик соответствует поиску оптимальных значений критериев многокритериальной задачи. В частности записи вида $\text{АТІ} = a_1 m_1 + a_2 m_2 + \dots + a_n m_n$ соответствует многокритериальная постановка задачи $F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_n(x))$, где $F_i(x)$ – соответствуют составным частям $a_i m_i$, позволяющая представить поиск значения АТИ в виде (8)

$$\text{АТІ} = \sum_{i=1}^n a_i f_i(G) \rightarrow \text{opt}, \quad (8)$$

где $f_i(G)$ соответствуют метрикам m_i графа G .

Отмечено, что, с одной стороны, процесс оптимизации АТИ непосредственно связан с процессом реконфигурирования СДСС НПМ БР, то есть выбором таких конфигураций $G_{\text{конф}}$, которые улучшают значения $f_i(G) = f_i(G_{\text{конф}})$. С другой

стороны, поиск значения АТИ при текущей конфигурации $ATI_{\text{конф}}$ подразумевает решение многокритериальной задачи $ATI|F(x) = ATI_{\text{конф}}|F(x)$. Конфигурация $G_{\text{конф}}$ при которой АТИ достигает наилучшего значения является оптимальной при заданных условиях: $ATI_{\text{опт}} = ATI_{\text{опт}}|F(x) = F_{\text{опт}}(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_n(x))$.

При этом изменение конфигурации $G_{\text{конф}}$ приводит к изменению $f_i(G)$ и необходимости нового расчета $F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_n(x))$, что требует значительных вычислительных ресурсов, а для СДСС НПМ БР задача становится нерешаемой за приемлемое время.

Показано, что для эффективного использования АТИ, учитывающего различные характеристики состояния СДСС НПМ БР, необходим анализ ее конфигураций, при которых изменяется АТИ и его составляющие. В случае многокритериальной задачи, когда невозможно найти единые оптимальные значения для всех $f_i(G)$, предложены методики параметризации АТИ с оценками параметров и определения весовых коэффициентов.

Методика параметризации АТИ включает следующие этапы:

1) Выявление попарной зависимости составляющих АТИ, то есть каким образом изменение параметров F_j и соответственно значений $f_j(G)$ при текущей конфигурации $G_{\text{конф}}$ влияет на $f_i(G)$. При этом все параметры j принимаются за независимые переменные, а параметр i зависимый от параметров j (9)

$$F_i|G_{\text{конф}}: f_i(G) \rightarrow opt, f_j(G) = f_{\text{оценка}}(G), \quad (9)$$

где $i = 1, 2, \dots, n; j \in \{1, 2, \dots, n\}, i \neq j$.

2) Выявление зависимости параметров F_i от конфигураций $G_{\text{конф}}$, т.е. какая конфигурация $G_{\text{конф}}$ приводит к требуемым значениям параметров F_i , $i = 1, 2, \dots, n$: $G_{\text{конф}}: F_i(G_{\text{конф}}) \rightarrow F_i$.

3) Формирование управляющих реконфигураций (последовательности реконфигураций G_1, G_2, \dots, G_k) для достижения требуемых значений АТИ, или хотя бы одного из его составляющих m_i .

В диссертации отмечено, что данная методика позволяет значительно ускорить время оптимизации АТИ в условиях деструктивных воздействий и ограниченных вычислительных ресурсов.

В рамках методики определения весовых коэффициентов рассмотрен вопрос балансировки метрик m_i относительно состава и свойств графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ за счет определения их чувствительности во времени при заданных требованиях $\dot{M} = (\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_i, \dots, \dot{m}_n)$. Методика включает следующую последовательность этапов:

1) Генерация проверочной последовательности конфигураций G_t^* , $t = 1, 2, \dots, T$.

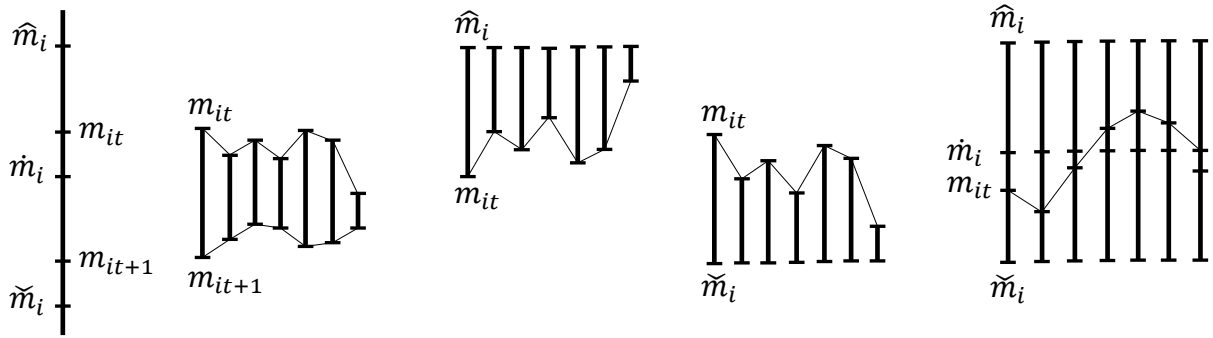
2) Вычисление значений m_{it} для каждого графа конфигурации G_t^* в проверочной последовательности. При этом рассматриваются следующие показатели чувствительности \check{a}_i метрики m_{it} :

а) средняя чувствительность: $\check{a}_i^I(m_i) = \frac{\left(\sum_{t=1}^T \frac{\min(m_{it}, m_{it+1})}{\max(m_{it}, m_{it+1})}\right)}{T}$;

б) чувствительность относительно требований \hat{M} : $\check{a}_i^{II}(m_{it}) = \frac{\left(\sum_{t=1}^T \frac{\min(m_{it}, \hat{m}_i)}{\max(m_{it}, \hat{m}_i)}\right)}{T}$

или $\hat{a}_i^{II}(m_i) = \frac{\left(\sum_{t=1}^T \frac{\min(m_{it}, \hat{m}_i)}{\max(m_{it}, \hat{m}_i)}\right)}{T}$.

В общем случае для приведения \dot{m}_i к действительному значению используется равновзвешенная линейная свертка интервала $[\check{m}_i; \hat{m}_i]$. На рисунке 3 представлена визуализация вычисления показателя чувствительности \check{a}_i для разных случаев.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3 – Вычисление показателя чувствительности \check{a}_i

В диссертации отмечено, что оба типа чувствительности \check{a}_i^I и \check{a}_i^{II} лежат на отрезке $[0; 1]$, суммарная или общая чувствительность метрики m_i определяется как $\check{a}_i = (\check{a}_i^I + \check{a}_i^{II})/2$. При этом состав и количество типов чувствительности может меняться в зависимости от постановки задачи мониторинга, требований \hat{M} и графа конфигурации СДСС НПМ БР.

В общем случае весовые коэффициенты a_i принимают значения (10)

$$a_i = 1 - \text{норм}\check{a}_i, \quad (10)$$

где $\text{норм}\check{a}_i$ – нормализованные значения \check{a}_i на отрезке $[0; 1]$;

$$\sum_i \text{норм}\check{a}_i = 1;$$

$$\sum_i a_i = 1.$$

3) В случае отсутствия проверочной последовательности конфигураций G_t^* или невозможности создания таковой чувствительность метрик вычисляется на графах конфигурации G_t , $t = 1, 2, \dots, T$. При этом значение $T \in \{2, 3, \dots\}$ – количество графов в последовательности конфигураций, является адаптивным параметром настройки с допуском $D \in (0; 1)$, отвечающим за адекватность показателей чувствительности \check{a}_i метрик m_i .

В частности, на каждом шаге t настройки коэффициентов a_i вычисляются значения $\text{норм} \check{a}_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, при этом достижение значения $\max_i \text{норм} \check{a}_i \geq D$ означает завершение процесса настройки и необходимость фиксирования значений весовых коэффициентов: $ATI = \sum_i (1 - \text{норм} \check{a}_i) m_i$. В случае если заданное значение допуска D недостижимо и процесс настройки не завершается, оператор настройки итерационно уменьшает значение допуска D на $\Delta D \in (0; 1)$ до тех пор, пока не будет достигнуто соотношение $\max_i \text{норм} \check{a}_i \geq D$.

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что рассмотрение в качестве АТИ свойств живучести, весовые коэффициенты фактически задают важность составляющих его характеристик – устойчивости, целостности и надежности.

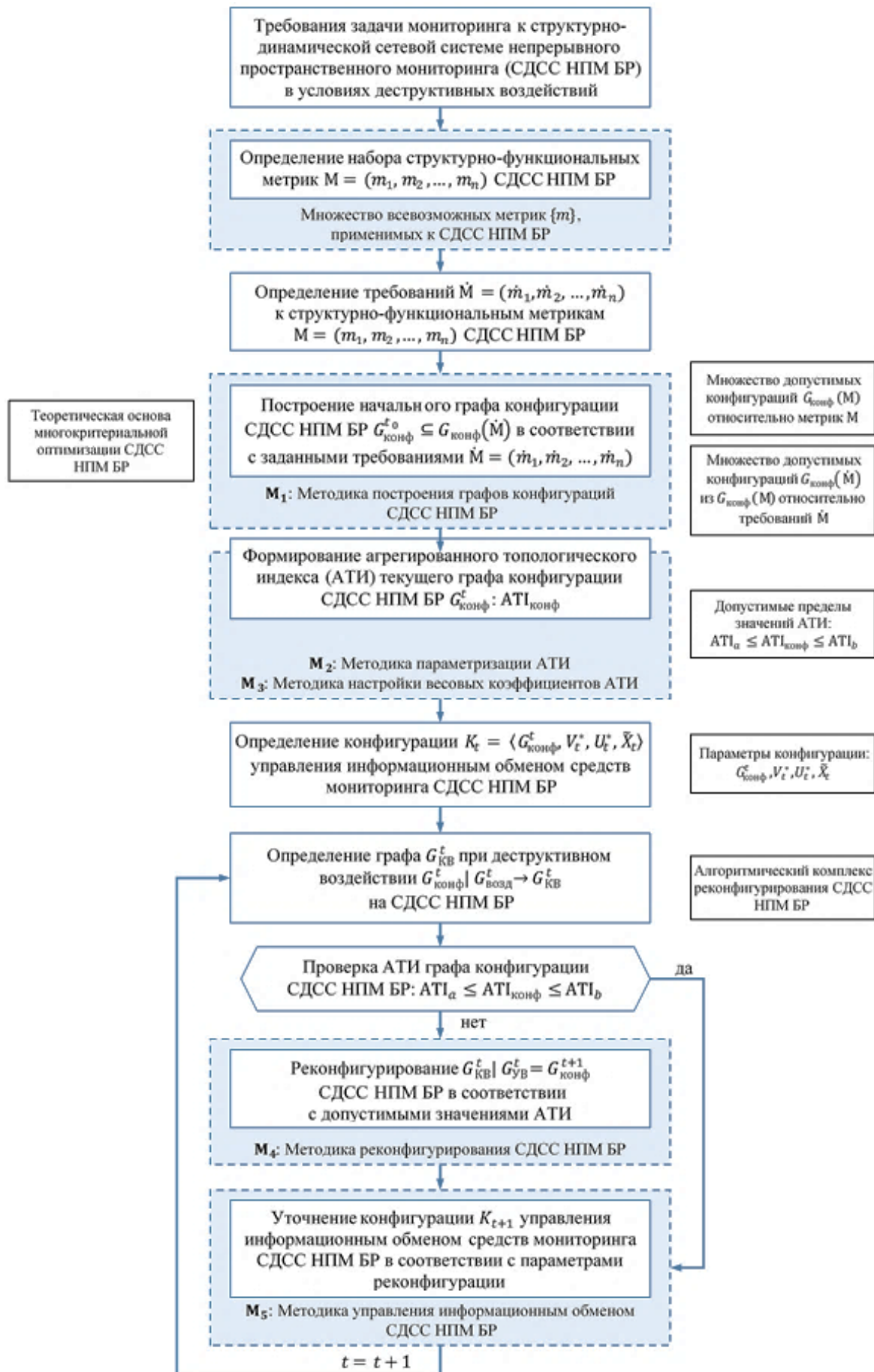
Таким образом, предложенный новый показатель позволяет достоверно оценивать текущее состояние СДСС НПМ БР и принимать решения об оперативном ее реконфигурировании для обеспечения структурно-функциональной устойчивости.

Четвертая глава посвящена описанию метода динамического реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий. Общая схема метода представлена на рисунке 4.

Отличительной особенностью метода реконфигурирования является возможность динамического анализа состояния графа конфигурации и его изменение в соответствии с текущим состоянием в условиях деструктивных воздействий.

Метод реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий состоит из следующих методик:

- методики построения графов конфигураций СДСС НПМ БР;
- методики параметризации АТИ и методики настройки весовых коэффициентов АТИ;
- методики реконфигурирования СДСС НПМ БР;
- методики управления информационным обменом между средствами мониторинга в процессе реконфигурирования СДСС НПМ БР.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4 – Схема метода реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий

Методика построения конфигураций СДСС НПМ БР предназначена для построения начального графа конфигурации $G_{\text{конф}}$, удовлетворяющему составу набора метрик $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ и их содержанию – требованиям $\dot{M} = (\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_n)$. СДСС НПМ БР начинает функционирование с выбранным графом конфигурации, то есть выполнять задачу мониторинга при заданных начальных условиях. Граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ и заданные требования \dot{M} к метрикам M обеспечивают задачу мониторинга СДСС НПМ БР, поскольку в результате реконфигурирования значение АТИ возвращается в требуемые пределы.

Основное отличие метода реконфигурирования от известных состоит в том, что для конфигурирования СДСС НПМ БР, основанного на построении начального графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ и задания его свойств для оперативного и точного реконфигурирования определяется набор структурно-функциональных метрик $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ и требования $\dot{M} = (\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_n)$ к ним. Начальные значения структурно-функциональных характеристик или конкретнее метрик m_i формируются на этапе построения графов конфигураций СДСС НПМ БР. Состав и описание набора метрик $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ в совокупности определяют свойства графа конфигурации $G_{\text{конф}}$, необходимые для решения задачи мониторинга в условиях деструктивных воздействий. На основе набора метрик M формируется множество допустимых конфигураций $G_{\text{конф}}(M)$ с заданными свойствами. Наборы метрик из (m_1, m_2, \dots, m_n) составляют свойства $M^k = \{m_i^k \in M\}$, $M^k \subseteq M$. Сохранение значений $m_i^k \leq \dot{m}_i$ в заданных пределах означает сохранение свойства M^k .

Методика построения конфигураций СДСС НПМ БР направлена на построение конфигурации, удовлетворяющей требованиям к составу и содержанию метрик – свойств системы, таких как устойчивость и целостность, для выполнения задачи мониторинга в том числе в условиях деструктивных воздействий.

Методика распределенного параллельного реконфигурирования является частью метода реконфигурирования СДСС НПМ БР для изменения графа конфигурации в интересах обеспечения требуемых значений агрегированного топологического индекса и штатного функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий. Методика распределенного параллельного реконфигурирования обеспечивает функционирование СДСС НПМ БР в результате деструктивных воздействий посредством перенастройки теоретико-графовой модели в части изменения ее графа конфигурации.

Методика распределенного параллельного реконфигурирования состоит из следующих операций: 1) операция воздействия (деструктивного, управляющего) на

граф конфигурации СДСС и его влияние на агрегированный топологический индекс;
2) процедура и описание операции реконфигурирования СДСС в результате деструктивного воздействия.

Таким образом, методика реконфигурирования обеспечивает функционирование СДСС НПМ БР в результате деструктивных воздействий посредством перенастройки теоретико-графовой модели в части изменения ее графа конфигурации.

Методика управления информационным обменом решает указанную задачу и включает в себя процедуру управления информационным обменом, вычисление радиуса устойчивости решения, частные методики уточнения и корректировки информационных каналов. Методика управления информационным обменом функционирует в условиях двух разных деструктивных воздействий.

В случае функционального воздействия $G_{\text{возд}}$ на граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ ухудшаются метрики и в целом АТИ. Но значение АТИ может оставаться в допустимых пределах и не требуется реконфигурирование структуры связей – графа конфигурации. При этом оптимальные решения \tilde{x} – ранее кратчайшие цепи уже таковыми могут не являться. Что приводит к потере «оптимальности» реализуемого набора информационных каналов, как решения многокритериальной задачи покрытия графа конфигурации множеством цепей с заданными концевыми вершинами. Для такого воздействия наиболее значимым является задача определения устойчивости оптимального решения текущей многокритериальной задачи. Второй случай – структурно-функциональные воздействия, то есть деструктивные воздействия, выводящие из строя элементы СДСС НПМ БР, что соответствует удалению вершин или ребер графа конфигурации. Заметим, что причиной реконфигурирования может стать вывод значения АТИ за допустимые пределы, при этом формально в текущем графе $G_{\text{КВ}}^t$ после воздействия на граф конфигурации $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t = G_{\text{КВ}}^t$ решение \tilde{x} не изменилось.

При этом для каждого вида деструктивных воздействий применяются частные методики – частная методика уточнения набора каналов связи с учетом деструктивных воздействий и частная методика корректировки набора каналов связи с учетом деструктивных воздействий. Частная методика уточнения набора информационных каналов с учетом деструктивных воздействий состоит из последовательности действий – обработки исходных данных, оценки устойчивости решения через расчет радиуса устойчивости задачи $\rho(A) = \min_{i \notin \varphi(A)} \max_{i \in \varphi(A)} \frac{\tau_i(A) - \tau_j(A)}{|\tau_i| + |\tau_j| - 2|\tau_i \cap \tau_j|}$.

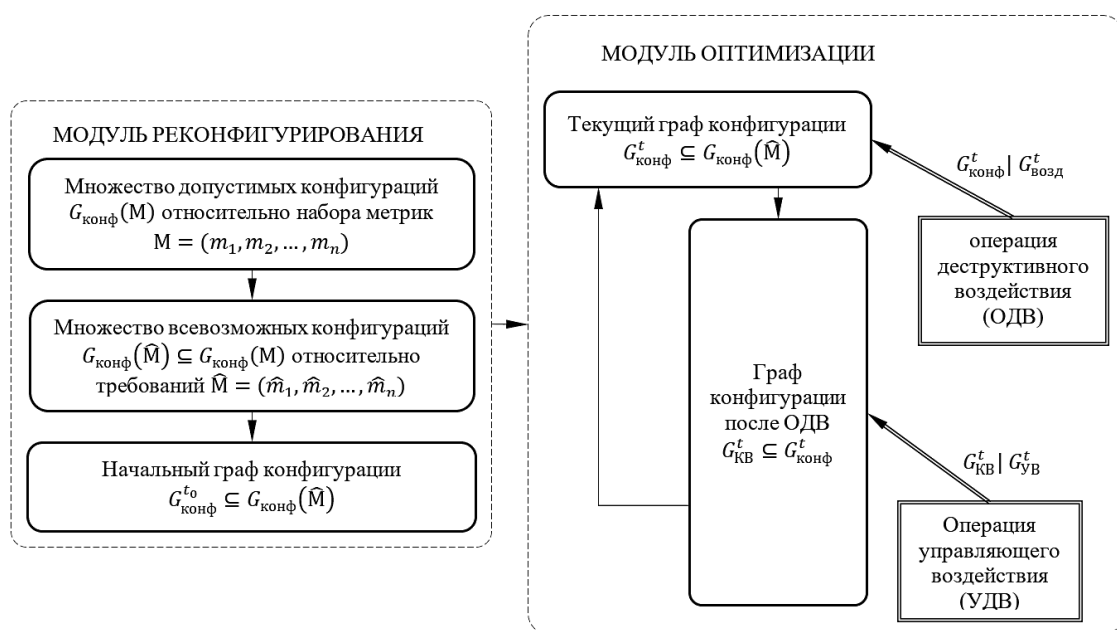
Таким образом, в четвертой главе разработан метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, позволяющий сохранять структурно-функциональные характеристики системы в соответствии с агрегированным топологическим индексом

на заданном уровне в пределах расхождения 10% при изменении ее состава и структуры, обладающий оперативностью принятия решений, превышающей известные методы в несколько раз. Метод обеспечивает выделение нового набора оптимальных информационных каналов для гарантированного доведения информации в СДСС НПМ БР при изменении параметров конфигурации системы (совокупности приоритетных средств, совокупности пунктов управления, состава и структуры сети связи, реализуемых информационных каналов), вызванных влиянием дестабилизирующих фактов на систему.

В пятой главе представлен программно-алгоритмический комплекс (далее – ПАК) реконfigurирования СДСС НПМ БР и разработанные алгоритмы оптимизации на больших предфрактальных графах при возникновении аномальных вычислительных сложностей.

Реализация разработанного метода реконfigurирования СДСС НПМ БР выполнена путем построения ПАК, реализующего методологию многоуровневой оптимизации. Основной акцент сделан на проектировании эффективных алгоритмов обработки иерархических графовых моделей, обеспечивающих решение задач структурной оптимизации с полиномиальной сложностью. Комплекс интегрирует передовые подходы к анализу сложных систем с использованием математического аппарата теории графов и оптимизационных методов.

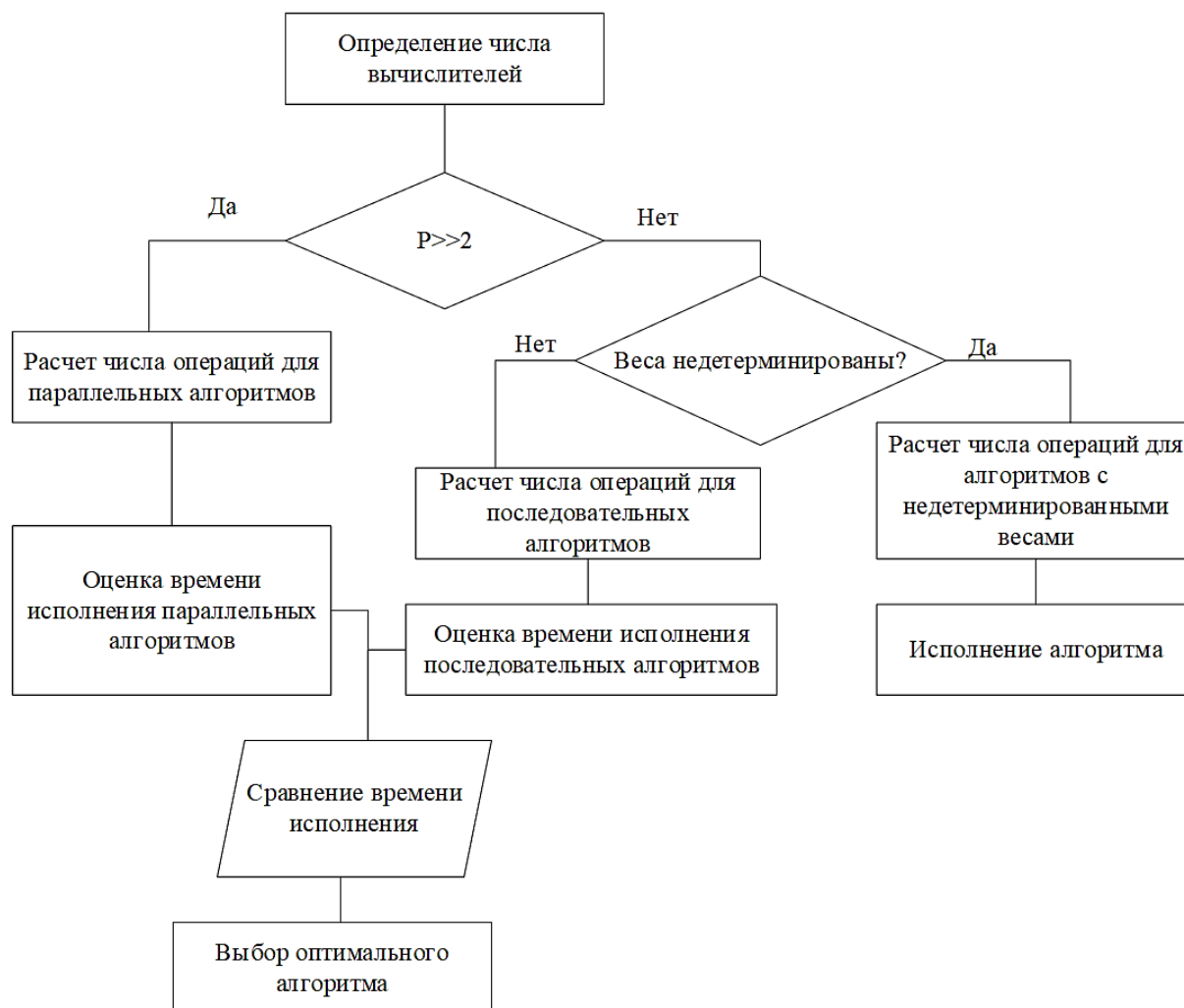
ПАК построен на основе многоуровневой иерархической архитектуры, включающей следующие ключевые компоненты: 1) модуль реконfigurирования; 2) модуль оптимизации. Состав ПАК представлен в виде схемы на рисунке 5.



Источник: составлено автором.

Рисунок 5 – Состав ПАК реконfigurирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий

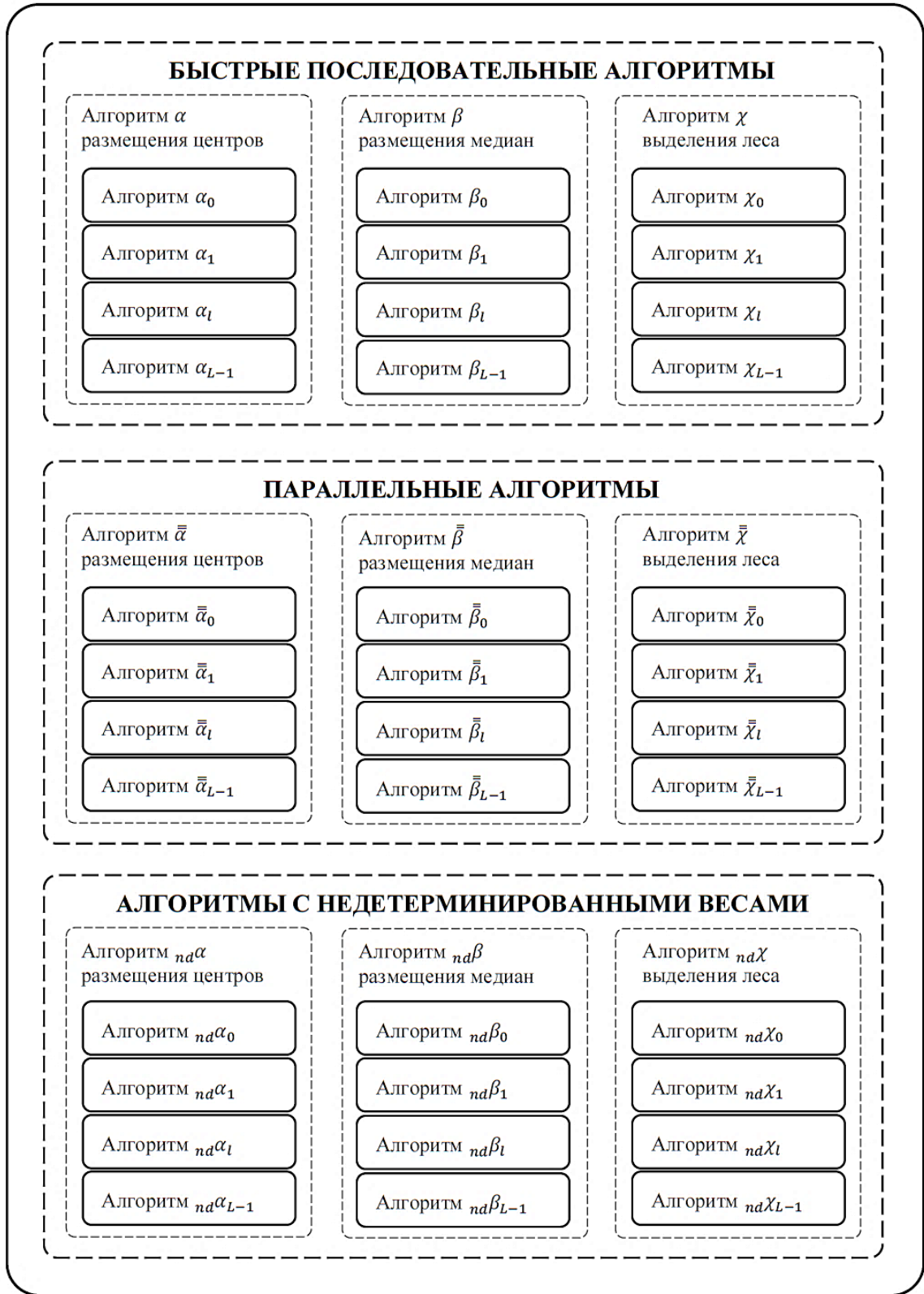
Конкретная СДСС НПМ БР характеризуется своим набором параметров, в том числе включает разное количество вычислителей и средств мониторинга. На рисунке 6 представлена схема выбора оптимального алгоритма с учетом числа вычислителей и недетерминированности весов, точнее параметров работы алгоритма.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6 – Схема выбора оптимального алгоритма с учетом числа вычислителей и недетерминированности весов

На рисунке 7 представлены алгоритмы, обеспечивающие базовую функциональность СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий и ограниченности ресурсов при аномальных вычислительных сложностях, позволяя быстро оценивать АТИ и принимать решения о реконфигурировании. В интересах минимизации времени исполнения алгоритма производится выбор алгоритма под заданную СДСС НПМ БР и ее текущее состояние. В качестве алгоритмической части программно-аппаратного комплекса представлены алгоритмы α размещения кратного центра, β размещения медиан и χ выделения остовного леса минимального веса. Алгоритмы размещения кратного центра позволяют в условиях аномальной вычислительной сложности принять решение о реконфигурации СДСС НПМ БР.



Источник: составлено автором.

Рисунок 7 – Алгоритмы оптимизации СДСС НПМ БР при возникновении аномальных вычислительных сложностей в составе ПАК

В сравнении с классическими алгоритмами данные алгоритмы обеспечивают точное и оперативное решение задачи о размещении кратного центра. Для быстрых последовательных алгоритмов вычислительная сложность $\tau(\alpha) = O(4n^2N)$. Тогда $\tau(\alpha)$ меньше вычислительной сложности алгоритма Флойда-Уоршелла в $n^{L-2}/4$ раз.

Алгоритм β , необходимый для размещения компонент в СДСС НПМ БР является оптимальным с точки зрения затрат на вычисления. Новизна данного алгоритма заключается в оригинальном представлении предфрактальных графов, состоящая в том, что в качестве медианы предфрактального графа G_L выбирается вершина x_0 с наименьшим передаточным числом $\sigma(x_0) = \min_{s_1}[\sigma(x_{s_1}^1)]$. Вычислительная сложность $\tau(\beta) = O(4n^2N)$ меньше вычислительной сложности алгоритма Флойда-Уоршелла в $n^{L-2}/4$ раз. Алгоритм χ выделения остова минимального веса является оптимальным с точки зрения вычислительной сложности. Для быстрых последовательных алгоритмов вычислительная сложность $\tau(\chi) = O(4n^2N)$ меньше вычислительной сложности алгоритма Прима в $n^{L-2}/4$ раз.

Разработанный ПАК реконfigurирования СДСС НПМ БР при возникновении аномальных вычислительных сложностей в условиях деструктивных воздействий, отличается от известных тем, что при решении оптимизационной задачи реконfigurирования производится иерархическая декомпозиция оптимизационных задач, выбор параллельного или последовательного алгоритма с учетом числа вычислителей, прогнозный расчет вычислительной сложности выполнения алгоритмов и формирование решений с гарантированными оценками в том числе при появлении недетерминированных значений весов, что позволяет сократить время оптимизации в диапазоне от 10 до 20% для принятия оперативных действий по структурной реконfigurации системы в условиях аномальной вычислительной сложности.

В главе 6 представлены результаты исследования эффективности применения метода реконfigurирования СДСС НПМ БР и верификации теоретических результатов научной работы, полученных в условиях высокой размерности и многокритериальности пространства решений.

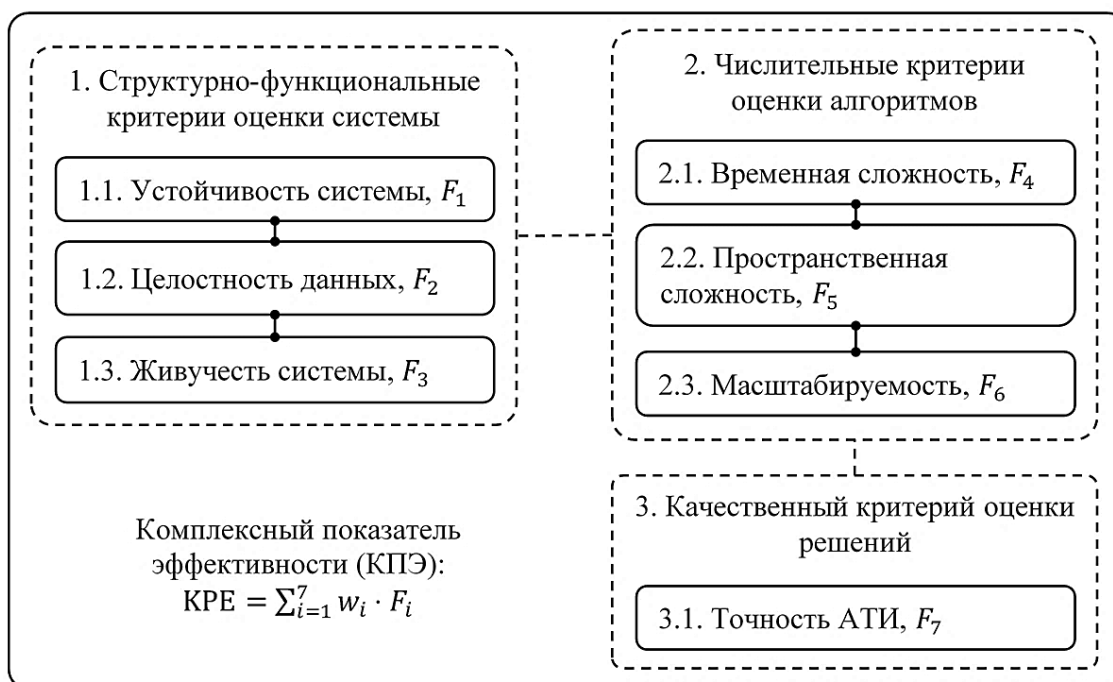
В качестве исходных данных численного моделирования СДСС НПМ БР использованы параметры, представленные на рисунке 8, отражающие начальную конфигурацию СДСС НПМ БР.

Анализ эффективности метода реконfigurирования проводился в следующем порядке: 1) оценка эффективности метода по множеству критериев в различных условиях; 2) сравнение результатов с существующими подходами к оптимизации топологии сетевых систем; 3) моделирование сценариев функционирования СДСС НПМ БР при деструктивных воздействиях. На рисунке 9 представлена схема оценки эффективности метода по множеству критериев в различных условиях функционирования СДСС НПМ БР.



Источник: составлено автором.

Рисунок 8 – Состав и характеристики СДСС НПМ БР для вычислительных экспериментов



Источник: составлено автором.

Рисунок 9 – Схема оценки эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР в соответствии с заданными критериями

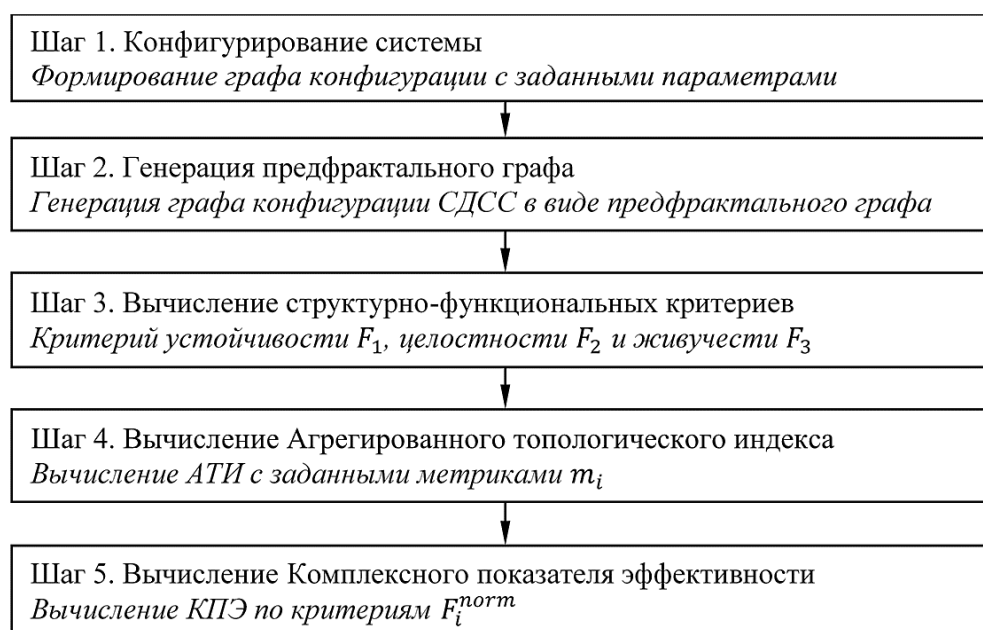
Для оценки эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР использованы пороговые значения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Пороговые значения критериев эффективности

Критерий	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно
Устойчивость (F_1)	$> 0,9$	$[0,7; 0,9]$	$[0,5; 0,7)$
Целостность (F_2)	$> 0,95$	$[0,85; 0,95]$	$[0,7; 0,85)$
Живучесть (F_3)	$> 0,8$	$[0,6; 0,8]$	$[0,4; 0,6)$
Временная сложность (F_4)	$> 0,9$	$[0,7; 0,9]$	$[0,5; 0,7)$
Пространственная сложность (F_5)	$> 0,8$	$[0,6; 0,8]$	$[0,4; 0,6)$
Масштабируемость (F_6)	$> 0,8$	$[0,6; 0,8]$	$[0,4; 0,6)$
Точность АТИ (F_7)	$> 0,9$	$[0,7; 0,9]$	$[0,5; 0,7)$
Комплексный показатель эффективности	$> 0,85$	$[0,7; 0,85]$	$[0,55; 0,7)$

Источник: составлено автором.

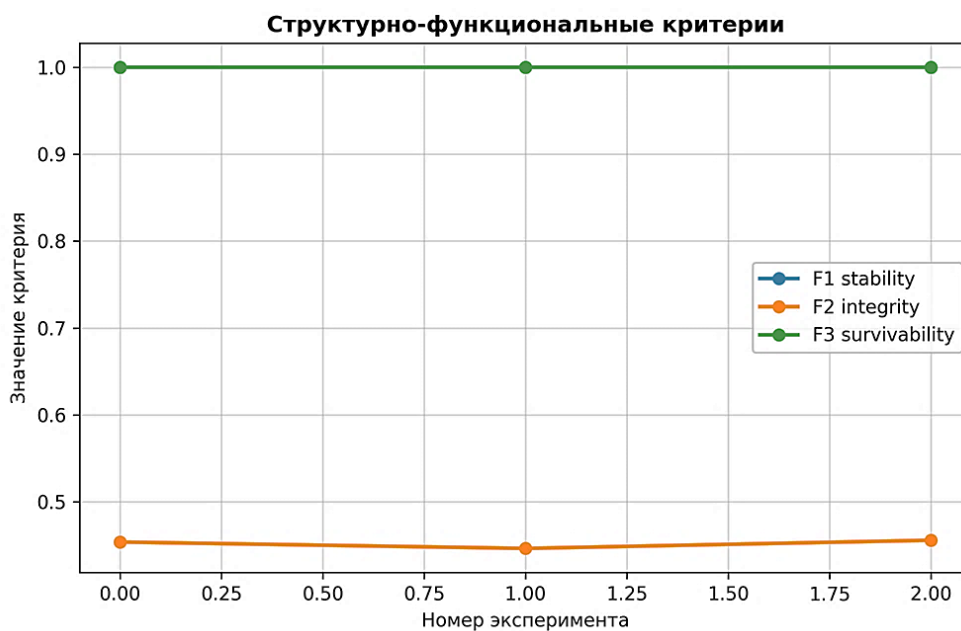
На рисунке 10 представлен порядок реализации вычислительного эксперимента оценки эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР в виде последовательных шагов.



Источник: составлено автором.

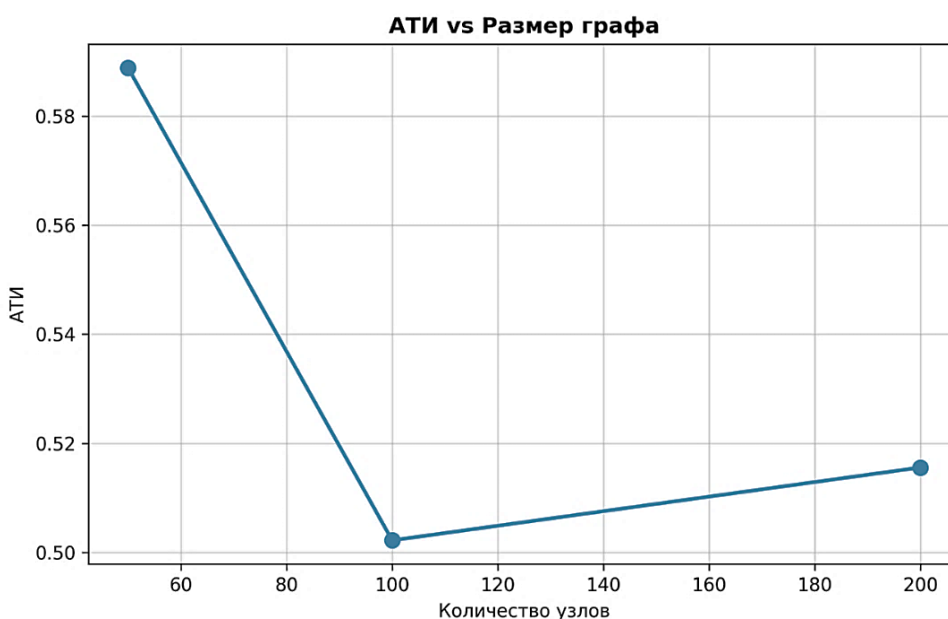
Рисунок 10 – Порядок проведения вычислительного эксперимента

На рисунке 11 представлены полученные значения структурно-функциональных критериев F_1 , F_2 и F_3 . Критерий целостности F_2 демонстрирует значения ниже 0,5, а критерии устойчивости F_1 и живучести F_3 – максимально возможные значения, равные 1, что свидетельствует о работоспособности метода реконфигурирования и наилучших значениях критериев F_1 и F_3 . На рисунке 12 представлены полученные значения АТИ при различном количестве узлов, отражающие текущее состояние СДСС НПМ БР. Наибольшее значение АТИ = 0,59 при количестве 50 узлов. Значения АТИ выше 0,5 подтверждают сбалансированность составных метрик.



Источник: составлено автором.

Рисунок 11 – Структурно-функциональные критерии F_1 , F_2 и F_3



Источник: составлено автором.

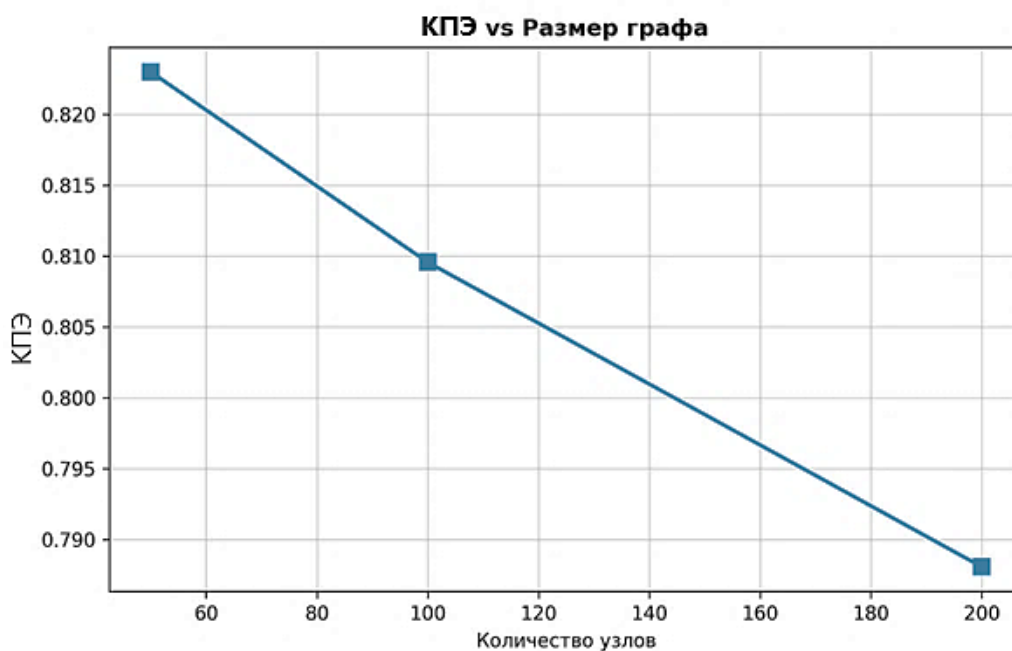
Рисунок 12 – Значения АТИ при различном количестве узлов

Комплексный показатель эффективности вычисляется в соответствии со следующими весовыми коэффициентами (11)

$$\text{КРЕ} = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot F_i^{\text{norm}}, \quad (11)$$

где $w_1 = 0,20$; $w_2 = 0,20$; $w_3 = 0,15$; $w_4 = 0,15$; $w_5 = 0,10$; $w_6 = 0,10$; $w_7 = 0,10$.

На рисунке 13 представлены полученные значения комплексного показателя эффективности при различном количестве узлов.



Источник: составлено автором.

Рисунок 13 – Значения КПЭ при различном количестве узлов

Необходимо отметить, что увеличение количества элементов приводит к снижению значений КПЭ и требуется реконфигурирование системы и состава метрик АТИ. Что свидетельствует об эффективности метода реконфигурирования в части оперативного принятия решений в условиях меняющихся параметров в частности количества узлов графа конфигурации.

Для оценки эффективности разработанного в диссертации метода реконфигурирования рассмотрено поведение системы в различных условиях функционирования. Вычислительные эксперименты проведены в соответствии со сценариями. Из множества сценариев выбраны три:

1) конфигурирование СДСС НПМ БР в соответствии с заданными параметрами; построен граф конфигурации $G_{\text{конф}}^6$ с количеством узлов $N = 200$, ребер $E = 9148$, построенный в соответствии с требованиями к теоретико-графовой модели СДСС НПМ БР на основе трехуровневой иерархической структуры;

2) моделирование отказа элементов СДСС НПМ БР в пределах 25%; мощность наибольшей компоненты связности составила 157 узлов из 200 (78,5% от исходной конфигурации); 30 отказавших узлов (15,0% от начального числа всех узлов); 8 изолированных функционирующих узлов, но не связанных с основной компонентой графа конфигурации;

3) деградация каналов связи меняет их параметры – снижается пропускная способность и надежность, увеличивается задержка сигналов. После чего необходимо реконфигурировать систему в условиях возникновения деструктивных воздействий.

Наибольшей информативностью с точки зрения подтверждения эффективности метода является третий сценарий. Несмотря на значительное снижение пропускной способности каналов связи текущей конфигурации СДСС НПМ БР методика оптимизации в составе метода реконфигурирования позволяет адаптировать структуру связи для максимальной загрузки каналов связи.

Решение о реконфигурировании СДСС НПМ БР принимается в случае достижения АТИ пороговых значений, представленных в таблице 2. Пороговые значения КПЭ применяются для оценки метода реконфигурирования, в частности эффективности выбранных критериев F_i .

Таблица 2 – Пороговые значения АТИ и КПЭ

Метрика	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно
АТИ	$> 0,8$	$[0,6; 0,8]$	$[0,4; 0,6)$
КРЕ	$> 0,85$	$[0,7; 0,85]$	$[0,55; 0,7)$

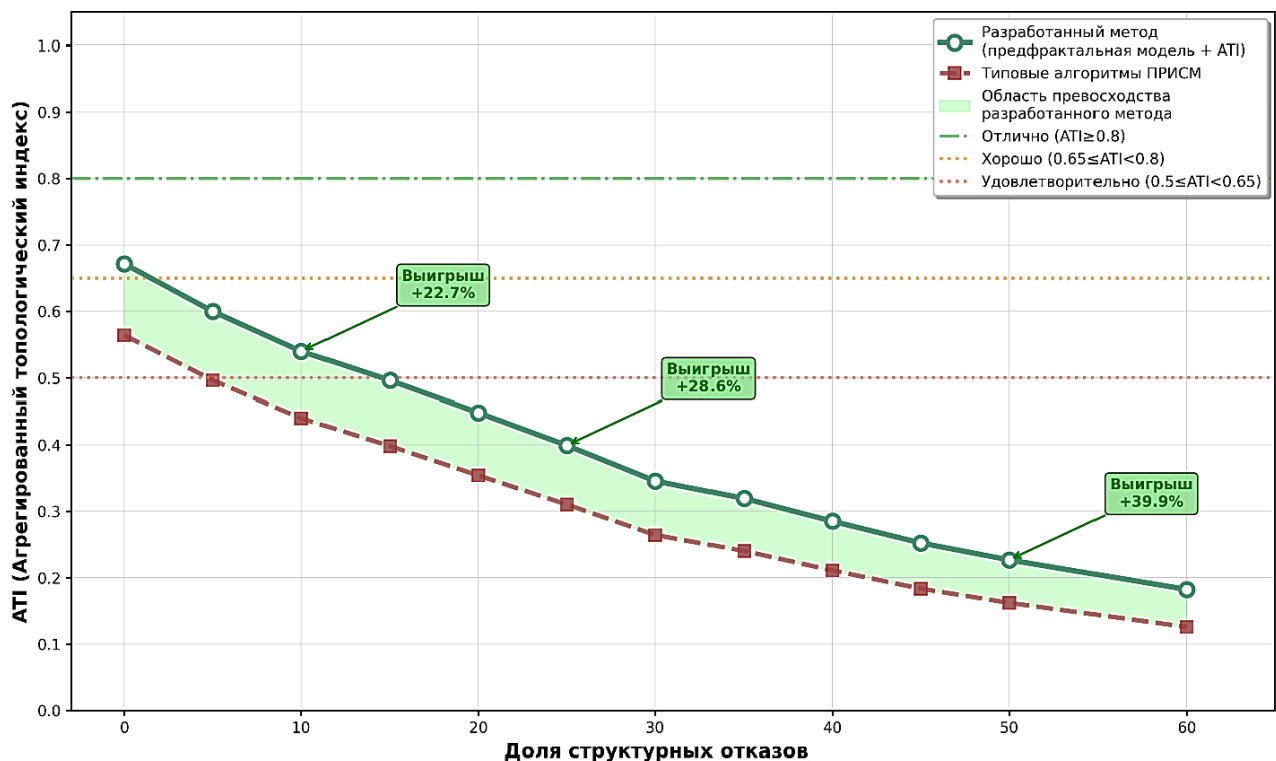
Источник: составлено автором.

При $АТИ < 0,1$ – необходимо немедленное реконфигурирование системы.

При $КРЕ < 0,55$ – система функционирует неудовлетворительно.

При деградации $\Delta АТИ > 0,3$ – критическое снижение эффективности.

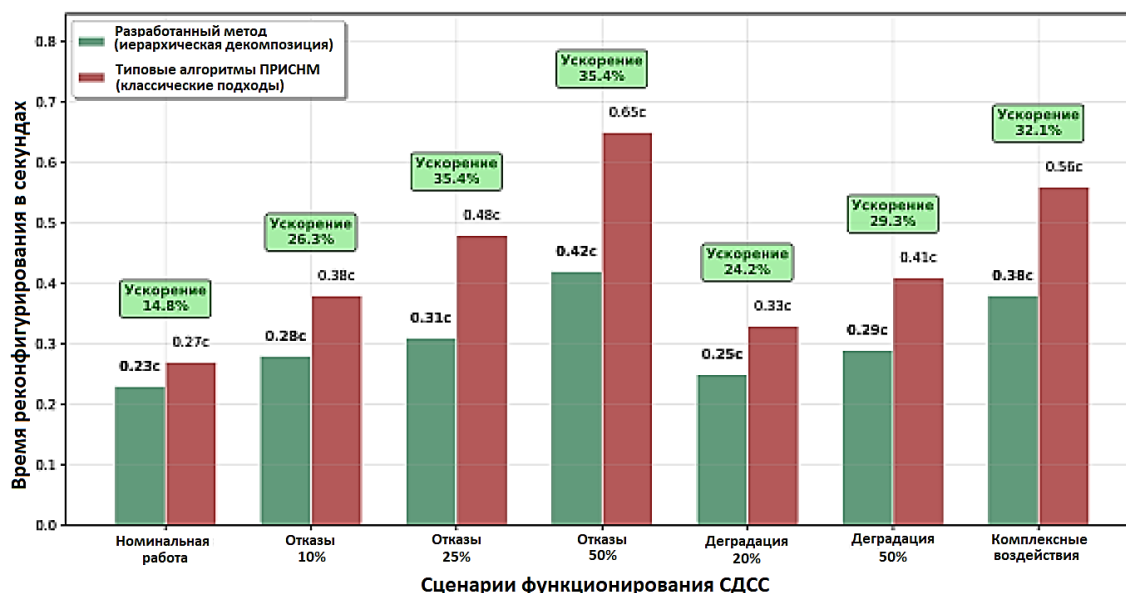
На рисунке 14 представлен сравнительный анализ динамики АТИ при структурных отказах системы и применении известных алгоритмов в составе метода реконфигурирования. Даже при 90% ухудшении каналов связи и неудовлетворительном $КРЕ < 0,55$, СДСС НПМ БР продолжает функционировать ($КРЕ > 0,3$).



Источник: составлено автором.

Рисунок 14 – Динамика АТИ при структурных отказах системы

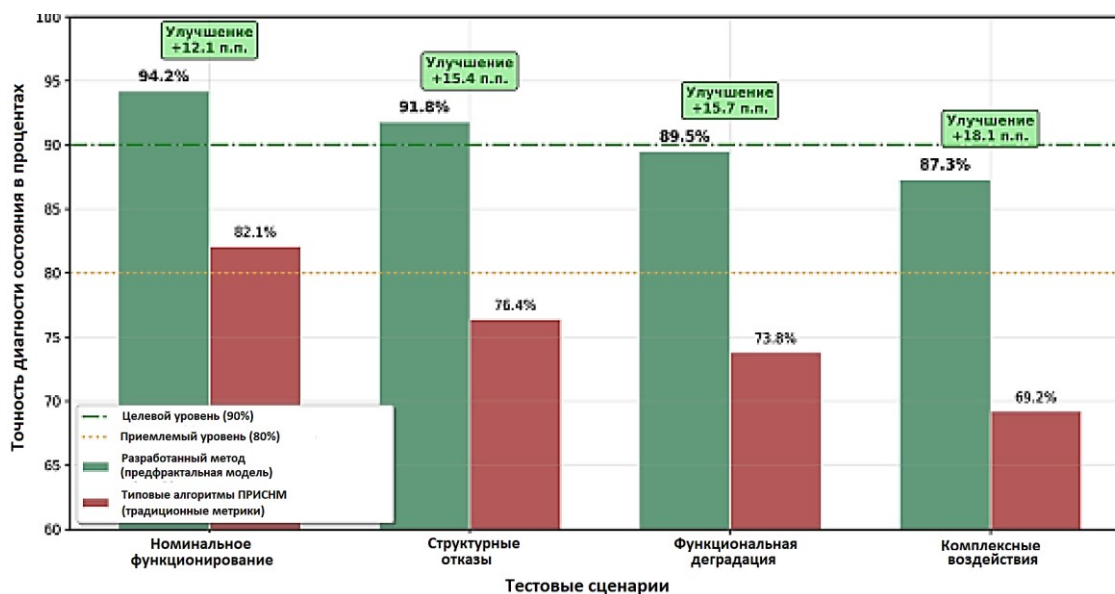
На рисунке 15 представлены результаты сравнения времени реконфигурирования системы известным методом и новым методом реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий. В зависимости от доли отказов элементов системы, новый метод реконфигурирования показывает улучшенные характеристики (ускорение от 14,8% до 35,4%).



Источник: составлено автором.

Рисунок 15 – Сравнительный анализ реконфигурирования системы

На рисунке 16 представлены результаты сравнения оценки состояния системы известным методом и новым методом реконфигурирования, разработанным в диссертации. В зависимости от режима функционирования системы новый метод реконфигурирования показывает улучшенные характеристики оценки (точность от 12,1 до 18,1 процентных пунктов).



Источник: составлено автором.

Рисунок 16 – Сравнительный анализ оценки состояния системы

Таким образом предложенный метод реконфигурирования СДСС НПМ БР демонстрирует практическую применимость и более высокие значения по ключевым показателям над известными методами.

III Заключение

В результате исследований по теме диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1) Проведен анализ и основные направления развития научно-методического аппарата моделирования и реконфигурирования СДСС НПМ БР в режиме реального времени, обоснована необходимость разработки новой модели и метода ее реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий.

2) Предложена и описана процедура конфигурирования СДСС НПМ БР с определением всех ее параметров мониторинга с учетом особенностей окружающей обстановки и в соответствии с требованиями задачи мониторинга. Для обеспечения функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий представлены параметры, необходимые для разработки метода реконфигурирования и обеспечения функционирования СДСС НПМ БР. Обоснована и разработана теоретико-графовая модель, обеспечивающая гибкость, эффективное распределение ресурсов и учет сложных взаимосвязей СДСС НПМ БР, что способствует более эффективному и точному решению оптимизационных задач в сложных и изменяющихся условиях. Отмечено, что данная модель создает основу для построения методов, методик и алгоритмов управления информационным взаимодействием средств мониторинга на основе реконфигурирования ее структуры с учетом заданных параметров задачи мониторинга

3) Предложен новый показатель оценки состояния СДСС НПМ БР – агрегированный топологический индекс, учитывающий влияние деструктивных воздействий на СДСС НБР посредством объединения структурно-топологических характеристик, сведенных в единое нормированное пространство, что позволяет достоверно оценивать текущее состояние системы и принимать решения об оперативном ее реконфигурировании для обеспечения структурно-функциональной устойчивости.

4) Разработан метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, позволяющий сохранять структурно-функциональные характеристики системы на заданном уровне при изменении ее состава и структуры.

5) Разработан программно-алгоритмический комплекс реконфигурирования СДСС НПМ БР при возникновении аномальных вычислительных сложностей. Предложены новые алгоритмы оптимизации на больших предфрактальных графах при возникновении аномальных вычислительных сложностей, в том числе быстрые последовательные алгоритмы при решении задач реконфигурации, параллельные алгоритмы для решения задачи оптимизации, алгоритмы на графах конфигураций с недетерминированными весами. Приведены результаты численного анализа вычислительной сложности алгоритмов оптимизации СДСС НПМ БР.

6) Проведены экспериментальные исследования и представлены результаты моделирования процесса реконфигурирования СДСС НПМ БР, верификации теоретических результатов исследований, полученных в условиях высокой размерности и многокритериальности пространства решений.

Это подтверждает, что цель диссертации – повышение оперативности принятия решений о реконфигурировании СДСС НПМ БР с сохранением ее структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий – достигнута, научная проблема решена.

IV Список работ, опубликованных по теме диссертации

*Публикации в рецензируемых научных изданиях,
определенных ВАК при Минобрнауки России:*

1. Кочкаров, Р.А. Параллельный алгоритм поиска кратчайшего пути на предфрактальном графе / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2004. – № 6. Том 44. – С. 1157-1162. – ISSN 0044-4669.

2. Кочкаров, Р.А. Управление реализацией, формализация и мониторинг целевых программ / Р.А. Кочкаров // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3. Тематический выпуск «Перспективные системы и задачи управления». – С. 127-132. – ISBN 5-8327-0240-9.

3. Кочкаров, Р.А. Алгоритм выделения р центров на предфрактальном графе / Р.А. Кочкаров, А.А. Узденов // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2006. – № 5 (9). – С. 44-46. – ISSN 1997-9495.
4. Кочкаров, Р.А. Стратегическое планирование и прогнозирование / Р.А. Кочкаров // Вестник Финансовой академии. – 2006. – № 4 (40). – С. 97-109. – ISSN 1028-9461.
5. Кочкаров, Р.А. Моделирование разрушения сложных систем с ациклической структурой / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров, М.Б. Салпагаров // Управление большими системами: сборник трудов. – 2007. – Выпуск 17. – С. 103-120. – ISSN 1819-2440. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <http://www.mtas.ru/Library/uploads/1174730437.pdf> (дата обращения: 19.05.2025).
6. Кочкаров, Р.А. Алгоритмы распознавания предфрактальных графов с разными затравками / Р.А. Кочкаров, И.Х. Утакаева // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 1 (102). Тематический выпуск «Методы и средства адаптивного управления в энергетике». – С. 27-38. – ISSN 1999-9429.
7. Кочкаров, Р.А. Алгоритм поиска внешне-внутреннего центра предфрактального графа с сохранением смежности старых ребер / Р.А. Кочкаров, А.А. Узденов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 3 (101). – С. 145-149. – ISSN 2304-9766.
8. Кочкаров, Р.А. Алгоритм поиска центра предфрактального графа, смежность старых ребер которого сохраняется / Р.А. Кочкаров, А.А. Узденов // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (26). – С. 50-53. – ISSN 1997-9495.
9. Кочкаров, Р.А. Алгоритм распознавания предфрактального графа с двумя полными затравками, в случае пересечения старых ребер / Р.А. Кочкаров, И.Х. Утакаева // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 2 (115). Тематический выпуск «Методы и средства адаптивного управления в электроэнергетике». – С. 14-18. – ISSN 1999-9429.
10. Кочкаров, Р.А. Ключевые показатели эффективности и результативности целевых программ / Р.А. Кочкаров // Качество. Инновации. Образование. – 2012. – № 5 (84). – С. 117-123. – ISSN 1999-513X.

11. Кочкаров, Р.А. Жизненный цикл целевой программы / Р.А. Кочкаров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 1 (138). – С. 227-235. – ISSN 1999-9429.
12. Кочкаров, Р.А. Многокритериальная постановка задачи выбора проектов целевых программ / Р.А. Кочкаров, Л.А. Кунижева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 88 (04). – С. 470-484. – ISSN 1990-4665. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/04/pdf/31.pdf> (дата обращения: 19.05.2025).
13. Кочкаров, Р.А. Распознавание предфрактального графа, порожденного полной двудольной затравкой / Р.А. Кочкаров, Л.А. Кунижева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 91 (07). – С. 82-96. – ISSN 1990-4665. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/07/pdf/57.pdf> (дата обращения: 19.05.2025).
14. Кочкаров, Р.А. Модель многокритериальной задачи выбора проектов на предфрактальном графе / Р.А. Кочкаров // Качество. Инновации. Образование. – 2013. – № 8 (99). – С. 66-72. – ISSN 1999-513X.
15. Кочкаров, Р.А. Многокритериальная задача размещения центра на М-взвешенном предфрактальном графе / Р.А. Кочкаров, А.Н. Кочкарова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 4 (165). – С. 237-249. – ISSN 1999-9429.
16. Кочкаров, Р.А. Сравнительный анализ алгоритмов выявления сообществ в сложных сетевых системах на примере социальных сетей / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров, Н.В. Калашников // Программные продукты и системы. – 2020. – № 2. Том 33. – С. 349-356. – ISSN 2311-2735. – Текст : электронный. – DOI 10.15827/0236-235X.130.349-356. – URL: <https://swsys.ru/files/2020-2/349-356.pdf> (дата обращения: 19.05.2025).
17. Кочкаров, Р.А. Некоторые подходы к оценке процесса функционирования структурно-динамических систем мониторинга в условиях внешних воздействий / Р.А. Кочкаров, А.М. Казанцев, А.В. Тимошенко, А.А. Сычуг // Научный журнал «Моделирование, оптимизация и информационные технологии». – 2021. – № 4 (35). Том 9. – ISSN 2310-6018. – Текст : электронный. –

DOI 10.26102/2310-6018/2021.35.4.005. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1047> (дата обращения: 19.05.2025).

18. Кочкаров, Р.А. Исследование некоторых трудноразрешимых задач на классе предфрактальных графов с изменяемым траекторным порождением / Р.А. Кочкаров // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 4. – С. 66-82. – ISSN 1995-5499.

19. Кочкаров, Р.А. Моделирование структуры сети авиамаршрутов предфрактальными графами / Р.А. Кочкаров // Программные продукты и системы. – 2022. – № 1. Том 35. – С. 113-123. – ISSN 0236-235X.

20. Кочкаров, Р.А. Теоретико-графовый алгоритм динамического назначения средств системы непрерывного мониторинга / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров // Успехи современной радиоэлектроники. – 2023. – № 9. Том 77. – С. 44-50. – ISSN 2070-0784. (K2).

21. Кочкаров, Р.А. Подходы к прогнозированию изменения состояния обеспечивающих компонентов информационно-управляющей системы / Р.А. Кочкаров, Ю.С. Шевнина, П.Е. Рябов, С.В. Прокопчина // Научный журнал «Моделирование, оптимизация и информационные технологии». – 2024. – № 2 (45). Том 12. – ISSN 2310-6018. – Текст : электронный. – DOI 10.26102/2310-6018/2024.45.2.023. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1549> (дата обращения: 19.05.2025). (K2).

22. Кочкаров, Р.А. Показатель структурной эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга / Р.А. Кочкаров, В.А. Шевцов, А.В. Тимошенко [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – № 2. Том 20. – С. 124-131. – ISSN 2782-4624. – Текст : электронный. – DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.019. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67875917> (дата обращения: 19.05.2025). (K2).

23. Кочкаров, Р.А. Алгоритм оценки структурно-функциональной устойчивости и целостности гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга / Р.А. Кочкаров, А.В. Тимошенко, С.В. Прокопчина [и др.] // Труды МАИ. – 2024. – № 137.

– ISSN 1727-6942. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181887> (дата обращения: 19.05.2025). (K1).

24. Кочкаров, Р.А. Генерация глубоких графов с элементами фрактальной структуры и их применение на примере моделирования новостных сетей / Р.А. Кочкаров, С.А. Корчагин, А.А. Кочкаров [и др.] // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2024. – № 6. Том 26. – С. 86-98. – ISSN 1999-8554. (K2).

Публикации в других научных изданиях:

25. Кочкаров, Р.А. Предфрактальные графы в проектировании и анализе сложных структур / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2003. – № 10. – ISSN 2071-2898. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2003-10> (дата обращения: 19.05.2025).

26. Кочкаров, Р.А. О планарности и других топологических свойствах фрактальных графов / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2003. – № 83. – ISSN 2071-2898. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2003-83> (дата обращения: 19.05.2025).

27. Кочкаров, Р.А. Параллельные алгоритмы на предфрактальных графах / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2003. – № 84. – ISSN 2071-2898. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2003-84> (дата обращения: 19.05.2025).

28. Кочкаров, Р.А. Целевые программы: инструментальная поддержка : монография / Р.А. Кочкаров // Москва : ЗАО «Издательство «Экономика», 2007. – 223 с. – 1000 экз. – ISBN 978-5-282-02723-5.

29. Кочкаров, Р.А. Новые возможности программно-целевого подхода к управлению экономикой : монография / Р.А. Кочкаров // Москва : Вега-Инфо, 2013. – 216 с. – 1000 экз. – ISBN 978-5-91590-017-1.

30. Кочкаров, Р.А. Задачи многокритериальной оптимизации на многовзвешенных предфрактальных графах : монография / Р.А. Кочкаров // Москва : Академинновация, 2014. – 189 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-906761-01-9.

31. Кочкаров, Р.А. Некоторые аспекты динамической теории графов / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров, Г.Г. Малинецкий // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2015. – № 9. Том 55. – С. 1623-1629. – ISSN 0044-4669 (*RSCF*).
32. Кочкаров, Р.А. Многовзвешенные предфрактальные графы с недетерминированными весами. Приложения в экономике, астрофизике и сетевых коммуникациях : монография / Р.А. Кочкаров. – Москва : ЛЕНАНД, 2017. – 432 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-9710-3803-0.
33. Кочкаров, Р.А. Оценка структурной устойчивости транспортно-логистических систем при решении оптимизационных задач / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров, Д.В. Яцкин // Нелинейный мир. – 2019. – № 5. Том 17. – С. 14-23. – ISSN 2070-0970.
34. Кочкаров, Р.А. Моделирование транспортно-логистических систем и исследование их структурной устойчивости / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров, Д.В. Яцкин // Управленческие науки. – 2020. – № 1. Том 10. – С. 102-111. – ISSN 2618-9941. – Текст : электронный. – DOI 10.26794/2404-022X-2020-10-1-102-111. – URL: <https://managementscience.fa.ru/jour/article/view/253/225> (дата обращения: 19.05.2025).
35. Кочкаров, Р. Research of NP-Complete Problems in the Class of Prefractal Graphs = Исследование NP-полных задач на классе предфрактальных графов / R. Kochkarov // Mathematics. – 2021. – № 21. Volume 9. – ISSN 2227-7390. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/math9212764. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/9/21/2764> (дата обращения: 19.05.2025) (*Scopus Q2*).
36. Кочкаров, Р.А. Выделение условий разрешимости NP-полных задач для класса предфрактальных графов / Р.А. Кочкаров, А.В. Тимошенко, А.А. Кочкаров // Моделирование и анализ информационных систем. – 2021. – № 2. Том 28. – С. 126-135. – ISSN 1818-1015 (*RSCF*).
37. Кочкаров, Р. Multicriteria Optimization Problem on Prefractal Graph = Задача многокритериальной оптимизации на предфрактальном графе / R. Kochkarov // Mathematics. – 2022. – № 6. Volume 10. – ISSN 2227-7390. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/math10060930. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/6/930> (дата обращения: 19.05.2025) (*Scopus Q2*).

38. Кочкаров, Р. Introduction to the Class of Prefractal Graphs = Введение в класс предфрактальных графов / R. Kochkarov, A. Kochkarov // Mathematics. – 2022. – № 14. Volume 10. – ISSN 2227-7390. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/math10142500. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/14/2500> (дата обращения: 19.05.2025) (*Scopus Q2*).

39. Кочкаров, Р.А. Identification Conditions for the Solvability of NP-Complete Problems for the Class of Prefractal Graphs = Выделение условий разрешимости NP-полных задач для класса предфрактальных графов / R.A. Kochkarov, A.V. Tymoshenko, A.A. Kochkarov // Automatic Control and Computer Sciences. – 2022. – № 7. Volume 56. – P. 807-814. – ISSN 1558-108X. – Текст : электронный. – DOI 10.3103/s0146411622070215. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S0146411622070215> (дата обращения: 19.05.2025) (*Scopus Q3*).

40. Кочкаров, Р. Graph-Clustering Method for Construction of the Optimal Movement Trajectory under the Terrain Patrolling = Метод графовой кластеризации для построения оптимальной траектории движения при патрулировании местности / R. Kochkarov, B. Rumiantsev, A. Kochkarov // Mathematics. – 2023. – № 1. Volume 11. – ISSN 2227-7390. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/math11010223. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/1/223> (дата обращения: 19.05.2025) (*Scopus Q2*).

41. Кочкаров, Р.А. Модель пространственно-распределенной информационной системы непрерывного мониторинга с предфрактальной динамической структурой в условиях воздействия дестабилизирующих факторов / Р.А. Кочкаров, Д.С. Чиров, А.В. Тимошенко, А.М. Казанцев // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2025. – № 1. Том 19. – С. 4-12. – ISSN 2072-8735. (*RSCI*).