

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант

Тимошенко Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор

Москва – 2026

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1 Общая характеристика структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности и обоснование необходимости разработки новых модели и метода ее реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий	26
1.1 Структурно-динамическая сетевая система непрерывного пространственного мониторинга большой размерности: понятие, математический аппарат предметной области и объекта исследования ..	26
1.2 Анализ научно-методического аппарата моделирования структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.....	37
1.3 Анализ известных методов реконфигурирования систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий.....	50
1.4 Постановка научной проблемы исследования	63
Глава 2 Теоретико-графовая модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	72
2.1 Особенности этапов функционирования и задачи модели структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.....	72
2.2 Формализация этапов функционирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	78
2.3 Теоретико-графовая модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	93
Глава 3 Комплексный показатель эффективности функционирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	116

3.1 Структурно-функциональные характеристики структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий	116
3.2 Формирование агрегированного топологического индекса структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.....	132
3.3 Применение агрегированного топологического индекса в составе модели структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.....	148
Глава 4 Метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	168
4.1 Общая схема метода динамического реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга в условиях деструктивных воздействий по результатам динамического анализа состояния графа конфигурации.....	169
4.2 Методика построения графа конфигурации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	172
4.3 Методика реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.....	190
4.4 Методика управления информационным обменом между средствами мониторинга в процессе реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий	208
4.5 Методика многокритериальной оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при возникновении аномальных вычислительных сложностей	223

Глава 5 Программно-алгоритмический комплекс реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	265
5.1 Состав программно-алгоритмического комплекса реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	266
5.2 Алгоритмы ПАК оптимизации на больших предфрактальных графах при возникновении аномальных вычислительных сложностей	272
5.3 Примеры поиска решений многокритериальной задачи оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности на предфрактальных графах с недетерминированными весами.....	295
Глава 6 Исследование эффективности метода реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	307
6.1 Задачи вычислительных экспериментов и исходные данные с учетом параметров структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга.....	307
6.2 Анализ эффективности метода реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	311
6.3 Прикладные задачи реконfigurирования структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности	334
Заключение	354
Список сокращений и условных обозначений.....	356
Список литературы	357
Список иллюстративного материала.....	415

Введение

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, 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 ведёт 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. Masko, 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. Воробьёв, 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 Е. 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, А. 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 К. 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, Е. 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. Добронец, 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. Nagam, и предлагаются условия разрешимости для некоторых подзадач. В современной литературе можно выделить следующие работы: A. Karcí 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 приближённого 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 её 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).

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 методы 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 её 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».

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 реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, *что позволяет* оценивать текущее состояние системы и принимать решения об оперативном ее реконfigurировании для обеспечения структурно-функциональной устойчивости.

3) Метод реконfigurирования 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; *реконfigurированием* 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.

Степень достоверности и апробация 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, теории 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 конференциях различного уровня, в том числе: на I Международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» (г. Переславль-Залесский, Институт системного анализа РАН, 12-16 сентября 2005 года); на IV Международном междисциплинарном

симпозиуме «Фракталы и прикладная синергетика» (Москва, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 14-17 ноября 2005 г.); на IX Международной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки» (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 23-27 октября 2006 года); на Международной конференции «Проблемы функционирования информационных сетей» (г. Новосибирск, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 31 июля - 3 августа 2006 года); на Международной междисциплинарной научной конференции «Идеи синергетики в естественных науках» (г. Тверь, Тверской государственный университет, 19-21 апреля 2007 года); на VII Международной конференции «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» (Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 13-14 ноября 2007 года); на Международной научной конференции «Перспектива» (г. Нальчик, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 24-28 апреля 2008 года); на III Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (г. Таганрог, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 24-28 марта 2008 года); на V Международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» (Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 26-28 октября 2010 года); на XIX Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (Москва, Российский государственный гуманитарный университет, 21 декабря 2011 года); 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 года); на I Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и её приложения в новых инфокоммуникационных системах» (г. Ставрополь, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 20-24 октября 2014 года); на II Всероссийской научно-технической конференции молодых

конструкторов и инженеров «Минцевские чтения» (Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э Баумана, 26 ноября 2015 года); на IV Всероссийской научно-технической конференции «РТИ Системы ВКО-2016» (Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э Баумана, 2-3 июня 2016 года); на IV Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики» (г. Нальчик, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук», 22-26 мая 2018 года); на III Международной научно-технической конференции «The 2019 Symposium On Cybersecurity Of The Digital Economy» (г. Казань, Университет Иннополис, 22-24 мая 2019 года); на V Всероссийской научно-практической конференции «Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления» (Москва, ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр», 27 декабря 2019 года); на XII Международной научно-практической конференции «Современная математика и концепция инновационного математического образования» (Москва, Финансовый университет, 11 июня 2025 года); на XVIII Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 24-26 Сентября 2025 года).

Результаты, включенные в диссертацию, докладывались в 2010-2025 гг. на семинарах: департамента анализа данных и машинного обучения, кафедры искусственного интеллекта Факультета информационных технологий и анализа больших данных Финансового университета; научно-практическом семинаре «Новые информационные технологии в автоматизированных системах» и семинаре «Будущее прикладной математики» Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН; семинаре отдела прикладных проблем оптимизации Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН (ФИЦ «Информатика и управление» РАН); семинарах лаборатории № 20 Института проблем управления

им. В.А. Трапезникова РАН; межкафедральном семинаре по вопросам структурно-динамического моделирования Московского физико-технического института (государственного университета); школе-семинаре «Управление и обработка информации в технических системах» Южного федерального университета; семинаре кафедры алгебры и математической логики Казанского (Приволжского) федерального университета; семинаре кафедры информатики и автоматизации научных исследований Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Отдельные результаты диссертационного исследования включены в отчеты Школы молодых ученых Лаборатории №20 ИПУ РАН в 2015-2017 гг.

Внедрение результатов исследования. 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 реконфигурирования 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 реконфигурации 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 реконфигурирования 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.

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: «Применение структурно-динамического подхода для

моделирования децентрализованных мобильных сетей связи» в 2012 г. в части развития модельного инструментария структурно-динамических сетей связи; «Моделирование поведения групп роботов-агентов при решении задачи мониторинга в условиях непрерывно изменяющейся внешней среды» в 2016 г. в части построения модели структурно-динамической системы мониторинга в условиях меняющейся среды; «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.

Материалы диссертационного исследования использовались: 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 их числе 4 авторских монографии объемом 66,0 п.л., 24 статьи 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), 3 статьи общим объемом 2,98 п.л. (авторский объем – 0,9 п.л.), опубликованных в изданиях, включенных в цитатно-аналитическую базу RSCI, а также 5 статей 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 совместных работ в диссертацию включены 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.

Глава 1

Общая характеристика структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности и обоснование необходимости разработки новых модели и метода ее реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий

1.1 Структурно-динамическая сетевая система непрерывного пространственного мониторинга большой размерности: понятие, математический аппарат предметной области и объекта 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. Под мониторингом как правило понимается наблюдение за объектами, процессами, или явлениями, осуществляемое для достижения проблемно-ориентированных результатов, в том числе контроля, оценки состояния и функционирования, решения задач по информационному обеспечению оперативного управления в условиях динамически меняющейся обстановки [1; 2].

Мониторинг как одна из основных функций сложных систем существенно трансформировался как на уровне составляющих элементарно-компонентной базы (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.

Вместе с тем существенно усложнились и условия функционирования систем мониторинга, в том числе и по причине увеличения числа элементов мониторинга и характера связей между ними, числа объектов мониторинга,

увеличения количества и видов деструктивных воздействий, и соответственно резкого роста вычислительной сложности при решении необходимых оптимизационных задач. В следствие чего сформировались новые и крайне жесткие требования к моделям и методам обработки данных, диагностирования и прогноза состояния как, собственно, самих систем мониторинга, так методов первичной обработки данных, а также решения задач с нечеткой и неполной информацией, анализа интенсивных потоков данных с применением новых нейросетевых технологий и т.д.

В результате усложнения задач мониторинга в системах непрерывного пространственного мониторинга сформировался отдельный класс систем – пространственно-распределенных информационных систем непрерывного мониторинга, решающих задачи контроля и оценки параметров окружающей обстановки или среды в пространственно-распределенной области мониторинга в непрерывном режиме с последующей передачей информации управляющей системе для обработки мониторинговой информации и принятия управленческих решений или воздействий. Следует отметить, что, говоря о непрерывном мониторинге, в диссертации подразумевается дискретное время мониторинга, в том числе и топологическое время.

В Российской Федерации актуальность исследований по развитию ПРИСНМ закреплена в Концепции создания и развития инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации, в том числе для обеспечения органов государственной власти [3-7].

Согласно [3], под *пространственно-распределенной областью* понимается область наблюдения или мониторинга, требующая применения средств мониторинга, размещенных равномерно или по заданному принципу на этой области. А в качестве *средств мониторинга* выступают – программные, программно-аппаратные либо аппаратные средства, обеспечивающие мониторинг окружающей обстановки (среды), которые в последнее время получили общепринятое название сенсоры, то есть устройства или их составные компоненты, измеряющие и преобразующие

измеряемые величины в информационные сигналы (данные измерения). Согласно [9-11], современные сенсоры разделяются по принципу работы и измеряемым параметрам: физические, оптические, химико-биологические и другие перспективные виды сенсоров.

Исследования, проведенные в настоящей диссертации, показали, что рост как количества различных систем мониторинга, так и их оснащенности разнородными датчиками (в том числе программными и программно-аппаратными) 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. Функциональность системы сохраняется при сохранении ее структурно-функциональных характеристик. В случае выхода какого-либо из значений характеристик за заданные ограничения необходимо провести реконфигурирование системы для возвращения ее функциональности.

Это направление исследований представлено в разработках ведущих научных школ, так в [12] рассматривается пространственно-распределенная система информационных сенсоров для мониторинга внешней обстановки с функциями реконфигурации. В [13] предлагаются многопозиционные пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга, в том числе обнаружения и распознавания движущихся объектов. Вопросам совершенствования модели сигналов и помех при обнаружении целей в пространственно-распределенной информационной системе радиолокационных модулей уделяется большое внимание в работах [14-17]. В [18] предложена модель обнаружения движущихся объектов с помощью пространственно-распределенной системы мониторинга с динамической структурой. В авиационной отрасли предлагаются модели мониторинга на основе многоуровневой сетцентрической авиационной системы мониторинга [19]. Отдельно стоит выделить исследования распределенных систем обработки пространственных данных [20] и

требования к архитектуре и технологиям интеллектуальных систем мониторинга для обеспечения безопасности предприятий и территорий [21].

Значительных успехов добились исследователи ПРИСНМ действующих в составе геоинформационных систем таких как: геопортальная платформа для управления пространственно-распределенными ресурсами, обеспечивающая поддержку принятия решений в области природно-производственных систем [22; 23]; интерактивный пространственно-экономический геоинформационный комплекс, предназначенный для поддержки принятия управленческих решений в сфере пространственной экономики и комплексного анализа многопараметрической информации в задачах управления развитием региона и её территорий [24]; многоуровневая распределенная ГИС мониторинга на основе данных дистанционного зондирования Земли для решения контрольно-хозяйственных задач [25]. В приведенных исследованиях активно используются данные мониторинга земной поверхности, в том числе дистанционного зондирования [26-29] распределенная информационная система обработки спутниковых данных мониторинга территорий Сибири и Дальнего Востока [30]; пространственно-распределенная система мониторинга технического состояния месторождений минерально-сырьевого комплекса [31] и пространственно-распределенная система зондирования для мониторинга качества воды в городе [32; 33]. В [34] рассматриваются вопросы обработки аномальных данных поступающих в ПРИСНМ, описан алгоритм фильтрации аномальных измерений при оценке технического состояния технологических объектов, что позволило выявить «узкие места» в работе системы. Проводятся исследования сетевого взаимодействия составляющих систем: сетевое взаимодействие элементов ПРИСНМ динамических объектов для обработки информации в реальном времени в задачах проектирования телекоммуникационных систем [35] и кибер-физических систем [36]; система мониторинга сетевых компонентов в распределенной информационной системе персональных данных в задаче отслеживания статусов компонентов компьютерной сети, серверов и сетевого

оборудования и их влияние на безопасность персональных данных [37; 38], а также система мониторинга множества мобильных объектов с пространственными ограничениями сети [39]. В связи с развитием беспроводных технологий появились новые задачи, требующие новых методов решения: проектирование беспроводных сетей параметрического мониторинга удаленных объектов [40-42] в различных областях мониторинга [43-47], в том числе в экологической, космической, медицинской, агробиологической и др.

Таким образом, несмотря на существующие исследования в предметной области, остается открытым вопрос о динамическом реконфигурировании пространственно-распределенных систем мониторинга в условиях деструктивных воздействий и быстро меняющейся внешней обстановки.

Следует также отметить востребованность новых методов обеспечения процесса мониторинга в части развития и инструментальной поддержки пространственно-распределенных систем мониторинга и управления [48; 49], в том числе: систем мониторинга на основе пространственно-временной спецификации для умных городов [50]; пространственно-распределенных экосистем с использованием дистанционного зондирования и гидрологическими моделями мониторинга [51]; систем мониторинга пространственного распределения улова и промыслового усилия [52]; сенсорных сетевых систем при идентификации пространственно-распределенных процессов [53] и др.

Вместе с этим, также остаются не решенными, а в последнее время и усугубились такие научно-технические задачи как: динамическая организация подсистем связи, конфигурирование систем с заданными начальными параметрами в условиях деструктивных воздействий, в том числе в связи с появлением аномальных вычислительных сложностей в задачах оптимизации и реконфигурирования систем для восстановления структурно-функциональных характеристик. Отсутствие действенных методов

динамической конфигурации и реконфигурации не позволяет адекватно оценивать изменения во внешней среде, что приводит к задержкам в принятии оперативных решений по реконфигурации систем и сохранению их функциональности.

В связи с увеличением масштабов – количества элементов ПРИСНМ, то есть ПРИСНМ большой размерности, к каждой из нерешенных задач добавляются требования к аномальным вычислениям. ПРИСНМ, состоящая из единичного или малого количества элементов (средств мониторинга), не требует значительного объема вычислительных ресурсов для функционирования или оптимизации работы. 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. Задача коммивояжера в системе с 50 элементами при использовании переборного алгоритма, потребует исполнения 2^{50} операций, что составляет более одного квадриллиона операций.

Важной задачей сохранения функциональности систем мониторинга является формирование комплексных показателей оценки состояния в меняющихся внешних условиях при различных деструктивных воздействиях естественного и искусственного характера.

Указанные обстоятельства, а именно меняющаяся во времени структура системы мониторинга, предопределили необходимость выделить ПРИСНМ большой размерности с динамической структурой в качестве отдельного класса информационно-управляющих систем, таких как структурно-динамические сетевые системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.

В диссертации под структурно-динамической сетевой системой непрерывного пространственного мониторинга большой размерности понимается система с изменяемой во времени сетевой структурой. При этом

отдельным *компонентам* или *подсистемам* соответствуют части ее сети – *подсети*, соответственно в терминологии теории графов – подграфы. Инженерно-математическое определение *сетевой системы* представляет собой новый широкий класс систем большой размерности с разнородными по функционалу элементами. В свою очередь, *сетевая система большой размерности* – это система, в основе функционирования которой лежит сеть [54; 55] состоящая из множества взаимодействующих элементов, большой размерности.

Современные технологии связи и передачи данных позволяют формировать СДСС НПМ БР в едином информационном пространстве со значительным количеством разнородных средств мониторинга, которые формируют сложные сети передачи данных. Такие системы могут включать наземные, надводные, подводные и воздушные (например, беспилотные летательные аппараты) средства с применением сложных сенсоров, образующих гетерогенную сеть передачи данных и позволяющих в режиме реального времени получать, обрабатывать и передавать разнородную информацию. Обеспечение взаимодействия в сети передачи данных между средствами мониторинга усложняется подвижностью их носителей. Подвижность средств мониторинга приводит к разрывам каналов связи, а деструктивные воздействия – к частичному снижению пропускной способности, либо к утрате связности. Что подчеркивает необходимость оценки структурно-функционального состояния СДСС НПМ БР посредством ее характеристик. То есть, для обеспечения информационного взаимодействия ключевой является задача сохранения и восстановления информационных каналов при изменениях структуры СДСС НПМ БР.

Таким образом, в силу гетерогенности и территориального распределения средств мониторинга СДСС НПМ БР, ее структурной сложностью, экстремальностью функционирования, существуют трудности оперативного принятия решений о реконфигурировании. Для обеспечения требуемой оперативности управления появляется необходимость проведения

исследований, направленных на адаптацию и интеграцию известных методов «теории оптимального управления» к решению задач комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов информационного взаимодействия в различных условиях, в том числе при деструктивных воздействиях. Одним из элементов оптимального управления является разработка высокоэффективных и качественных метрик.

В связи с чем совершенствование научно-методического аппарата, направленного на повышение оперативности принятия решений о реконфигурировании СДСС НПМ БР с сохранением ее структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий за счет формирования комплексного показателя оперативного управления и контроля структурно-функционального состояния, является крайне актуальной задачей [56].

Одним из показателей качества мониторинга является объем информации, получаемый об объекте мониторинга: $\langle b_i \rangle_k$, где $i = 1, 2, \dots, k$ и $b_i \in \{0, 1\}$ – элементы слежения за состоянием k -ого объекта мониторинга. Как правило состояние наблюдаемого объекта зависит от внешних условий (является экзогенным) и на него не влияет сам процесс наблюдения, поэтому целесообразно применять ограничение на объем получаемой информации о состоянии СДСС в процессе функционирования. При указанном ограничении, достижение максимума объема информации о наблюдаемых объектах мониторинга сводится к поиску рациональной конфигурации СДСС НПМ БР [57], что значительно повышает актуальность совершенствования научно-методического аппарата реконфигурирования СДСС НПМ БР.

Выполнение задачи мониторинга и функционирование СДСС НПМ БР с заданным качеством мониторинга в условиях деструктивных воздействий должно обеспечиваться следующими свойствами: устойчивость – 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.

СДСС НПМ БР в процессе функционирования подвергается деструктивным воздействиям, как естественного, так и искусственного характера, что влияет на ее структурно-функциональные характеристики. Деструктивное воздействие распространяется как на отдельные элементы системы – узлы и каналы связи, так и на ее подсистемы. Результатом деструктивного воздействия является нарушение работоспособности двух видов: частичное (функциональное) нарушение (снижение весовых характеристик, например, пропускной способности канала связи); структурное нарушение (удаление ребер и вершин графа). В первом случае сохранение общей работоспособности системы необходимо обеспечивать частичным перераспределением потоков информации, повторной настройкой системы связи, решением многокритериальной задачи маршрутизации и др. Во втором случае при нарушении структурного состояния системы необходимо решать задачу перераспределения потоков.

При отсутствии связности необходимо решение задачи структурного восстановления и формирования новых связей с оптимальными критериями: время формирования канала-ребра, пропускная способность, надежность и др. Изменения структурно-функциональных характеристик сети описываются инструментарием адаптивных сетей или динамических графов. Весовые и структурные характеристики элементов и подграфов сети G_L меняются в зависимости от ранга $l = 1, 2, \dots, L$ и коэффициента подобия $\theta \sim l$. Постановка оптимизационной задачи на динамическом графе сохраняется, но очевидно – решение задачи может измениться. В таком случае x_t^0 – решение индивидуальной многокритериальной задачи в момент времени t . В целях снижения последствий возможных деструктивных воздействий, а также прогнозирования поведения СДСС НПМ БР представляется необходимым определение структурно-функционального показателя в качестве комплексного показателя состояния. Для оперативного слежения за текущим состоянием показатель должен учитывать [58]:

- 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).

Кроме того, в целях снижения последствий возможных деструктивных воздействий, а также прогнозирования поведения СДСС НПМ БР, еще одной важной задачей является применение структурно-топологического показателя оценки состояния эффективности функционирования системы. При этом для оперативного слежения за текущим состоянием показатель должен учитывать: состояние сложной многоэлементной системы в динамике; структурные особенности системы – 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 качестве такого структурно-топологического показателя может быть определен комплексный показатель оценки состояния СДСС НПМ БР, реализующий в себе основные требования оперативного управления и контроля структурной устойчивости системы.

Таким образом, СДСС НПМ БР выступает в качестве инструментария моделирования сложных ПРИСНМ 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.

В этой связи целью настоящего исследования является повышение оперативности принятия решений о реконфигурировании структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности с сохранением их структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий, объектом исследования является структурно-динамическая сетевая система непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, а предметом исследования выступает метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.

Важными частными проблемами обеспечения функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий являются следующие:

- отсутствие комплексного показателя оценки текущего состояния системы с учетом динамично меняющихся внешних условий, в том числе сложно предсказуемого характера;
- отсутствие модели, описывающей структурно-функциональные характеристики, процессы функционирования и оптимизации системы;
- отсутствие метода реконфигурирования системы, учитывающего сложную обстановку в условиях внешних воздействий и позволяющего снижать сопутствующие аномальные вычислительные сложности.

Несмотря на имеющееся развитие научно-методического аппарата, также остаются нерешенными следующие задачи: вычислительная сложность алгоритмов на больших динамических графах остаётся критичной; адаптация к недетерминированным воздействиям требует разработки новых подходов; синтез структур с заданными характеристиками нуждается в развитии более

эффективных методов оптимизации; интеграция гетерогенных сетевых элементов требует адаптации существующих методов.

Таким образом, важной научной проблемой является отсутствие метода реконфигурирования, обеспечивающего выполнение современных требований к СДСС НПМ БР в части повышения оперативности принятия оптимальных решений о реконфигурации сети с сохранением ее структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий.

Для разработки метода реконфигурирования необходима разработка комплексной модели СДСС НПМ БР, как составной части самого метода реконфигурирования.

1.2 Анализ научно-методического аппарата моделирования структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

В настоящее время при моделировании как функционирования, так и организации информационного взаимодействия сложной многоэлементной системы находят свое применение математический аппарат теории вероятности и графов, систем массового обслуживания и другие [59-64], что позволяет оценить структурно-функциональную устойчивость системы в целом на основе связности и готовности каналов передачи данных. Однако, данные модели не в полной мере описывают способы реконфигурации сети в условиях приоритизации передаваемой информации, а также выполняются в отложенном режиме ввиду высокой вычислительной сложности используемых алгоритмов [65-69].

Поэтому актуальным является развитие научно-методического аппарата моделирования информационного взаимодействия элементов СДСС НПМ БР в части повышения оперативности оценки ее структурно-функциональной устойчивости. Необходимо разработать модель пространственно-распределенной системы мониторинга, позволяющую

производить оценку состояния системы в режиме реального времени в условиях воздействия дестабилизирующих факторов с учетом приоритезации информационных каналов на основе решения задачи обеспечения структурно-функциональной устойчивости и целостности.

Развитие современных систем мониторинга, особенно систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, сталкивается с фундаментальной научной проблемой, заключающейся в отсутствии эффективных методов их моделирования и реконфигурирования при деструктивных воздействиях [70; 71]. Научно-методический аппарат, направленный на анализ структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга, требует систематизации существующих подходов и разработки новых инструментов, адекватных сложности рассматриваемых объектов.

Основное противоречие в науке состоит в необходимости совершенствования методов реконфигурирования СДСС НПМ БР для повышения оперативности принятия решений при одновременном расширении спектра деструктивных воздействий, включая воздействия недетерминированной природы [72]. В практической плоскости противоречие проявляется между необходимостью поддержания структурно-функционального состояния системы на заданном уровне и требуемой оперативностью её адаптации к изменяющимся условиям функционирования.

Существующие алгоритмы и методы обеспечения ПРИСНМ большой размерности неэффективны из-за быстрого роста вычислительной сложности, особенно при возникновении так называемой аномальной вычислительной сложности [73]. Это ограничивает возможности адаптации систем в режиме реального времени и нарушает непрерывность мониторинга. Решение поставленной проблемы требует разработки новых моделей и алгоритмов, способных эффективно работать с большими динамическими графовыми структурами и обеспечивать оперативные решения о реконфигурации [74; 75].

Для решения проблемы обеспечения оперативности реконfigurирования СДСС НПМ БР с сохранением структурно-функциональной устойчивости в условиях деструктивных воздействий в качестве инструментальной основы моделирования рассматривается многоуровневый предфрактальный граф, динамически изменяющийся во времени и отражающий иерархическую структуру системы мониторинга. Такое представление позволит учитывать недетерминированность как весовых характеристик каналов связи, так и структуру рассматриваемой системы. Выделяются промежутки времени между изменениями структуры системы мониторинга двух типов временных шкал: топологического времени, описывающего редкие, но значительные изменения в структуре графа, и операционного времени, в котором происходят частые и менее значительные изменения характеристик ребер и узлов графа.

Обоснование этого выбора основано на следующих предпосылках [66; 71]: динамический граф естественным образом отражает структурные изменения сети мониторинга, происходящие в реальном времени под влиянием внешних и внутренних факторов; предфрактальная структура графа позволяет адекватно моделировать иерархическую организацию СДСС НПМ БР, характеризующуюся многоуровневостью и самоподобием; аппарат предфрактальных графов обеспечивает учет недетерминированности как весовых характеристик информационных каналов, так и стохастических изменений топологии системы.

Модель пространственно-распределенной системы мониторинга с предфрактальной динамической структурой реализует задачу многокритериальной оптимизации с учётом приоритезации информационных каналов. Сочетание робастного подхода с двухвременными шкалами в многокритериальной оптимизации создаёт баланс между адаптивностью к быстрым изменениям и устойчивостью к крупным событиям. Это приводит к повышению общей эффективности и надёжности системы, позволяя ей эффективно функционировать в условиях сложной и изменчивой среды,

характерной для систем с иерархической структурой. Согласованное управление на всех уровнях и временных шкалах: интеграция влияния разных уровней и временных шкал позволяет оптимизировать систему в целом, а не только её отдельные части.

Вопрос о развитии подобных СДСС НПМ БР стоит особенно остро и актуален ввиду значительной территориальной распределенности, в том числе в труднодоступных и климатически неблагоприятных условиях, в которых отсутствует развитая система коммуникации, что значительно затрудняет применение современных методов мониторинга и диагностирования. Особенности применения СДСС НПМ БР является возможность задействовать устройства мониторинга как наземного, воздушного базирования, так и космических систем, что накладывает более высокие требования по решению информационно-емких задач, направленных на повышение производительности и повышения интенсивности передачи потоков информации, ее полноте и качеству.

Структура и параметры ПРИСНМ, в виду воздействия как внутренних факторов (отсутствие электромагнитной доступности, отказ аппаратуры приема-передачи и т.п.), так и внешних дестабилизирующих факторов (преднамеренные помехи, физическое воздействие и другие), постоянно меняются во времени, что соответствует формированию динамической сети [76-78].

Для выявления сложности задач, решаемых на графах, необходимо классифицировать графовые структуры по трем ключевым признакам: размерность, динамичность и специальные свойства [79; 80]. Даже применение полиномиальных алгоритмов не всегда обеспечивает получение результата за приемлемое время при решении задач на больших графах. В случае динамических графов большой размерности ситуация усложняется необходимостью получения решений после каждого изменения структуры, то есть при изменении множеств вершин и рёбер, а также количественных характеристик этих элементов (весов или атрибутов).

Размерность графа является первым определяющим фактором. В соответствии с современными подходами теории больших данных целесообразно разделить размерность графов на следующие уровни: малая размерность; средняя размерность; большая размерность.

Динамичность графа представляет второй классификационный признак. Для задач, решаемых на динамических графах, поиск решения осуществляется не на одном фиксированном графе, а для каждого графа в траектории динамического графа. Для оценки структурного изменения динамического графа в траектории вводится понятие меры структурного изменения графа, которая зависит от количества вершин и рёбер, а также от других количественных характеристик. Для динамических графов с изменяющейся в топологическом времени структурой и весовыми значениями необходимо явное определение постановки задачи и понятия решения на динамическом графе.

Специальные свойства графа выступают третьим признаком классификации. Методы и алгоритмы, эффективные на графах малой размерности, могут демонстрировать совершенно различные временные характеристики при увеличении размерности. Классическая задача поиска кратчайшего пути для двух различных алгоритмов на большом графе может дать кардинально отличающиеся результаты. В естественных сетях (natural networks) выделяют два основных подкласса: графы со специальными свойствами (иерархичность, самоподобие, кластеризация, фрактальность, центральность и другие) и графы без специальных свойств (ячеистые структуры и подобные).

На основе предложенной классификации графов определяется сложность задачи и выбор адекватных методов её решения.

- 1) Определение размерности графа (размерность задачи) с отнесением к одной из трёх категорий.

- 2) Анализ динамичности графа, включая оценку скорости изменения (процентное изменение структуры и весов за единицу топологического

времени). Формулировка постановки задачи и определение типа динамического решения.

3) Выявление специальных свойств графа и определение их наличия в рассматриваемой структуре.

4) Вычисление коэффициента подобия для графов со специальными свойствами относительно теоретического (идеального) предфрактального графа.

5) Определение набора методов и алгоритмов для решения задачи на основе выявленных параметров.

6) Решение задачи на теоретическом (идеальном) предфрактальном графе с использованием оптимальных алгоритмов.

7) Формирование итогового решения с использованием коэффициента подобия для получения приближённого решения реальной задачи [81].

Методология анализа больших графов. Концептуальное определение и научный статус больших графов

Понятие «большие графы» (англ. big graphs) объединяет масштабные, крупномасштабные (huge, large) и масштабно-инвариантные (large-scale) графовые структуры [82; 83]. За последние десятилетия накоплено более 100 тысяч научных публикаций в области больших данных, из которых более 10 тысяч посвящены проблематике больших графов [84; 85].

Исследования в этой области ведутся по следующим основным направлениям: исследование свойств и характеристик больших графов; решение оптимизационных задач на больших графах; разработка моделей и решение прикладных задач с использованием графовых структур большой размерности [86]. В современной литературе предложены комплексные обзоры приложений больших графов, рассматривающие их ключевые свойства: масштабируемость, обработка сложных запросов, хранение и управление данными [87; 88]. Выявлены основные проблемы при работе с такими графами: визуализация, разбиение и распределение данных, динамический анализ структур [89; 90]. Особое внимание уделяется

масштабно-инвариантным графам со специальными свойствами, позволяющим применять специализированные методы анализа [91]. Для решения проблемы визуализации больших графов предложены алгоритмы спектральной кластеризации, позволяющие упростить структуру графов до необходимого уровня детализации при сохранении существенных топологических свойств [92; 93]. Апробация этих методов показала эффективность при работе с реальными графами, содержащими свыше 10 тысяч узлов. Задача разбиения больших графов решается посредством двухэтапных алгоритмов, основанных на принципе выделения сообществ в социальных сетях [94; 95]. Эти подходы позволяют размещать подграфы в облачной среде для параллельной обработки отдельных компонент. Разработаны новые алгоритмы разбиения для параллельной обработки больших графов на основе жадных алгоритмов, успешно апробированные на реальных и синтетических сетях [96; 97]. Для решения задачи достижимости большого количества узлов предложены подходы к распределённой индексации, основанные на разделении большого графа на малые подграфы, связанные между собой специальным оверлейным графом [98; 99]. Такая иерархическая организация позволяет значительно снизить вычислительную сложность операций поиска и анализа.

Отдельной проблемой является определение подобия и структурного сходства компонент в больших графах [100; 101]. Предложены алгоритмы быстрого сравнения на основе марковских цепей, работающие с графами экстремально больших размеров [102]. Другой перспективный подход основан на использовании шаблонов (patterns) для классификации сложных графовых структур [103; 104]. Шаблоны позволяют выявлять свойства, отличающие сети реального мира от случайных графов, и обнаруживать аномальные структуры [105]. Известные меры центральности рёбер не являются оптимальными при работе с большими графами, особенно для графов реальных структур [106; 107]. В связи с этим разработаны новые метрики для измерения важности рёбер, отражающие структурные особенности графа и

позволяющие эффективнее оценивать критичность элементов сети [108; 109]. Такие метрики используются как для масштабирования графов, так и для упрощения процесса их визуализации.

Инструментарий анализа больших графов активно применяется в биологических и социальных сетях, беспроводных сетях одноранговой архитектуры, сети Интернет и веб-сетях, семантических сетях, коммуникационных и транспортных сетях [110]. Все эти приложения также называют анализом сложных сетей [111]. Одним из современных применений крупномасштабных графов является моделирование нейронных сетей (Graph Neural Networks, GNN) с однотипными узлами и связями [112; 113]. Одной из актуальных проблем является динамическое изменение структуры нейронной сети в режиме реального времени [114]. Разработаны модели гетерогенных многовидовых граф-нейронных сетей, описывающие сложные сети с различными типами узлов и рёбер, имеющих разные атрибуты [115]. Апробация этих моделей проведена на реальных наборах данных крупных электронных коммерческих сетей. В экономических приложениях используется понятие крупномасштабных сетевых структур, функционирующих на различных уровнях [116; 117]. Во взаимосвязи эти виды сетевых структур представляют крупномасштабную интегрированную систему, определяющую качество экономического пространства. Саморазвитие таких структур, сопровождаемое появлением новых связей, проявляется через свойство самоподобия [118]. Применение теоретико-графовых методов в биомедицинских исследованиях позволяет моделировать и исследовать структурные свойства генетических сетей [119]. Структурный анализ сетей генов способствует выявлению критичных генов, влияющих на развитие многих заболеваний [120]. При увеличении размерности графов генетических наборов данных поиск структурных характеристик становится затруднённым даже для отдельных вершин [121].

Концептуальное введение в динамические графовые структуры

Динамический граф состоит из последовательности классических графов. Переход от одного графа к другому осуществляется с помощью

теоретико-графовых операций. Под простыми операциями понимаются операции удаления (добавления) ребра и удаления (добавления) вершины. Сложные операции состоят из простых. Изменения в структуре могут быть описаны элементарными теоретико-графовыми операциями. Если структурные изменения происходят постоянно, вводится понятие структурной динамики [122; 123]. Для описания структурной динамики оптимально подходит математический аппарат динамических графов.

Конструктивная теория графов охватывает понятие динамических графов и рассматривает графы как результаты некоторых процессов их конструирования [124; 125]. Конструктивный подход позволяет генерировать графы с требуемыми характеристическими свойствами, основываясь на алгоритмах синтеза [126]. Динамическая структурная характеристика различных классов графов позволяет эффективно решать прикладные задачи [127]. Число сохраняемых свойств характеризует «силу» системы операций: чем меньше сохраняемых свойств, тем сильнее система операций. Примером наиболее сильной системы являются операции добавления или удаления ребра [128], позволяющие получать любой граф из любого. Следуя конструктивному подходу, можно выделить класс самоподобных графов. Понятие самоподобия в графах близко понятию самоподобных структур (фрактальных множеств) из синергетики [129]. О значимости исследований самоподобных структур свидетельствуют регулярно проводимые международные конференции и периодические издания [130].

Предфрактальные графы представляют собой подкласс больших динамических графов и являются конечной версией фрактальных графов [131; 132]. Самоподобные графы, в целом, и предфрактальные графы, в частности, являются важным математическим инструментом для моделирования структур сетевых систем большой размерности [133]. Моделирование такой структуры фактически представляет решение задачи распознавания [134]. Определение предфрактального графа базируется на операции замены вершины затравкой [135]. При этой операции вершина удаляется из графа вместе с инцидентными рёбрами, а соседи этой вершины

соединяются с вершинами затравки согласно определённым правилам [136]. Заменяя последовательно вершины затравкой на каждом этапе, получают траекторию предфрактального графа [137]. При этом вводятся понятия ранга ребра, блоков различных рангов, старых и новых рёбер [138]. Каждый блок предфрактального графа сам является предфрактальным графом, что обеспечивает иерархическую структуру [139]. Исследования самоподобных графов ведутся по трём основным направлениям: распознавание графов [140], анализ свойств и характеристик [141], решение задач многокритериальной оптимизации [142].

Динамический граф Γ состоит из графов $G_1, G_2, \dots, G_L$, переход между которыми описывается операциями $\phi(G_l) = G_{l+1}$. Операции могут включать добавление/удаление рёбер и вершин, замену вершины затравкой, приоритетное присоединение элементов и другие преобразования. Последовательность графов называют траекторией динамического графа.

Траектория динамического графа соответствует последовательности изменений в структуре СДСС НПМ БР. Структура СДСС НПМ БР представляет сеть передачи данных между составляющими её элементами или подсистемами. Применение динамических графов позволяет учитывать изменения топологии связей при внешних воздействиях на систему. Применение динамических графов для описания структурных изменений СДСС НПМ БР возможно только при строгом определении операции перехода $\phi(G_l) = G_{l+1}$ [143; 144]. Технические характеристики средств мониторинга и связи между ними определяют принципы формирования новых структур в динамике [145]. Эти характеристики задают комплекс правил и ограничений для отображения, формирующего траекторию динамического графа.

На основе проведенного анализа предлагается следующая систематическая процедура анализа и решения задач на больших графах при моделировании СДСС НПМ БР:

1) *Определение размерности графовой структуры.* Произвести подсчет вершин и рёбер с целью отнесения задачи к одной из трех категорий размерности и выбора соответствующей вычислительной парадигмы.

2) *Анализ динамичности.* Оценить скорость и характер структурных изменений посредством вычисления меры структурного изменения $\delta\Gamma$ на различных временных интервалах; определить временные шкалы топологических и операционных изменений; сформулировать математическую постановку задачи с явным определением типа требуемого решения (точное/приближенное, режим реального времени/отложенный).

3) *Выявление специальных свойств.* Провести анализ топологических инвариантов и структурных характеристик графа с целью выявления наличия иерархичности, самоподобия, фрактальности, кластеризации и других специальных свойств.

4) *Вычисление коэффициента подобия.* Для графов со специальными свойствами определить коэффициент подобия ρ предфрактального графа.

5) *Выбор методов и алгоритмов.* На основе выявленных параметров выбрать оптимальный набор методов и алгоритмов, обеспечивающих баланс между точностью решения и вычислительной эффективностью.

6) *Решение на теоретическом графе.* Провести решение задачи на идеальном предфрактальном графе, используя оптимальные алгоритмы с известной вычислительной сложностью.

7) *Адаптация решения.* Коэффициент подобия ρ позволяет получить приближенное решение для реальной сетевой системы.

Однако, при моделировании реального функционирования СДСС НПМ БР требуется рассмотрение не только теоретического решения, полученного на идеализированной предфрактальной модели, а реального учёта специфики деструктивных воздействий, влияющих на структурно-функциональные характеристики СДСС НПМ БР. Поэтому далее рассматривается влияние деструктивных воздействий на структурно-функциональные характеристики СДСС НПМ БР

Влияние деструктивных воздействий на структурно-функциональные характеристики СДСС НПМ БР

СДСС НПМ БР включают различные средства мониторинга с беспроводными технологиями связи, формирующие сложные сети передачи

данных. Такие сети подвержены естественным и искусственным деструктивным воздействиям. Основные факторы, влияющие на структурно-функциональные характеристики:

а) информационное взаимодействие – обеспечение непрерывного обмена данными между источниками и потребителями информации, требующее стабильных информационных каналов.

б) сетевое взаимодействие – эффективность передачи структурированных данных в условиях подвижности средств и динамических изменений структуры.

Традиционные понятия информационного и сетевого взаимодействия недостаточны для СДСС НПМ БР из-за структурной сложности и динамики. Подвижность средств может приводить к разрывам каналов связи, а деструктивные воздействия – к функциональным или структурным нарушениям связности. Требуется комплексная оценка устойчивости, целостности и надежности [146].

Система может подвергаться деструктивным воздействиям, распространяющимся на отдельные элементы и подсистемы [147; 148]. Результатом являются нарушения двух видов: функциональные нарушения - снижение весовых характеристик при сохранении структурной целостности; структурные нарушения - удаление рёбер и вершин графа, нарушающие структурное состояние системы. В первом случае сохранение работоспособности достигается перераспределением потоков информации. Во втором случае при сохранении связности графа решаются задачи резервирования и перераспределения. При отсутствии связности необходимо структурное восстановление. При изменении структурно-функциональных характеристик говорят об адаптивных или динамических сетях. Весовые и структурные характеристики элементов меняются в зависимости от ранга и коэффициента подобия.

Для снижения последствий деструктивных воздействий и прогнозирования поведения СДСС НПМ БР необходимо определение структурно-функционального показателя как комплексного показателя

состояния системы [149; 150]. Для оперативного слежения за состоянием системы показатель должен учитывать: состояние сложной многоэлементной системы в динамике; структурные особенности СДСС НПМ БР: иерархичность, наличие рангов структуры подсистем [151]; влияние деструктивных воздействий на структурно-функциональные характеристики. Устойчивость к структурным разрушениям определяется влиянием элементарных действий удаления вершин и рёбер. Любые структурные изменения влекут изменение функциональных матриц системы.

Анализ существующего научно-методического аппарата показывает необходимость его комплексного применения для моделирования и анализа СДСС НПМ БР.

Ключевыми компонентами научно-методического аппарата являются:

- классификационный инструментарий, позволяющий систематизировать задачи по размерности, динамичности и специальным свойствам графовых структур;
- методы анализа больших графов, обеспечивающие решение задач визуализации, разбиения, распределения и динамического анализа;
- теоретико-графовый аппарат динамических и предфрактальных графов, позволяющий моделировать структурные изменения;
- показатели структурно-функционального состояния, включающие метрики устойчивости, целостности, надёжности.

Существующий инструментарий теории графов, теории больших данных и конструктивной теории обеспечивает адекватное математическое описание СДСС НПМ БР. Развитие научно-методического аппарата должно быть направлено на повышение эффективности вычислительных алгоритмов. Комплексное применение методов классификации, анализа, синтеза и оценки структурно-функциональных характеристик позволяет обеспечить оперативность принятия решений.

Дальнейшее развитие научно-методического аппарата требует интеграции результатов исследований в области теории графов, теории сложных сетей, теории оптимального управления.

1.3 Анализ известных методов реконфигурирования систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий

В работе [152] предложен инструментарий синтеза технологий и программ управления реконфигурацией на примере бортовых систем массогабаритных космических аппаратов, направленный на повышение живучести, автономности и эффективности функционирования сложных технических объектов в условиях нештатных и аварийных ситуаций. Основу решения задачи реконфигурации составляет использование логико-динамических моделей и гиперграфов для анализа зависимостей между элементами сети, а также разделение процессов реконфигурации на эвристические и структурно-функциональные. В контексте ССДС НПМ БР предложенный инструментарий позволяет оптимизировать структурные, функциональные и топологические изменения в сети с учетом пространственно-временных, ресурсных и других ограничений, а также адаптивно перераспределять функции между узлами сети и внешними управляющими системами. Недостатками предложенного инструментария являются высокая вычислительная сложность, неопределенность при работе с нечёткими данными, а также ограниченная масштабируемость.

В [153], предложен инструментарий оптимальной реконфигурации сетей, основанный на методах смешанно-целочисленного выпуклого программирования. С точки зрения ССДС НПМ БР предложенный инструментарий позволяет находить глобально оптимальную конфигурацию сети за счет представления уравнений потока мощности в виде ограничений второго порядка, гарантируя минимальные потери мощности при соблюдении всех технических ограничений (радиальность, уровни напряжения, пропускная способность), тем самым, делая задачу вычислительно разрешимой для средних и крупных сетей. Недостатками предложенного инструментария являются как сильная зависимость от точности

математической модели сети, так и высокая вычислительная сложность для задач динамической реконфигурации в реальном времени.

В [154] предложен метод динамической реконфигурации сетей на основе гибридного эволюционного алгоритма, объединяющего модифицированный метод роя частиц и алгоритма Grey Wolf. В контексте СДСС НПМ БР предложенный метод позволяет адаптивно и многокритериально оптимизировать топологию сети на протяжении временного горизонта, перераспределяя потоки мощности для компенсации неопределённостей в работе возобновляемых источников. В качестве основных недостатков можно отметить эвристическую природу алгоритма, не гарантирующую нахождение глобального оптимума, а также возрастающую вычислительную нагрузку при увеличении горизонта планирования и числа учитываемых сценариев.

В [155] предложен научно-методический аппарат синтеза технологий управления реконфигурацией сложных сетевых систем на основе обучения с подкреплением. Процесс реконфигурации формализован как последовательность принятия решений агентом, взаимодействующим со средой (распределительная сеть), который обучается на исторических или смоделированных данных, максимизируя накопленное «вознаграждение», включающее минимизацию потерь и стоимости переключений. Недостатками предложенного аппарата являются, во-первых, критическая зависимость качества решений от полноты и репрезентативности данных для обучения; во-вторых, длительный и ресурсоемкий этап обучения, особенно для СДСС НПМ БР с большим количеством управляющих элементов; в-третьих, сложность соблюдения всех технических ограничений на каждом шаге.

В [156] предложен инструментарий динамической реконфигурации сетевой инфраструктуры суперкомпьютерных систем при выполнении пользовательских заданий, представленных в виде Docker-контейнеров, что в контексте СДСС НПМ БР позволяет в соответствии с выделенными ресурсами обеспечить как структурную адаптацию сети, так и ее функциональную

изоляцию – разделение сетевых пространств для разных заданий. Недостатками данного инструментария являются ограниченная масштабируемость и сложность реализации.

В [157] предложен метод синтеза технологий и программ управления реконфигурацией на примере смарт-распределительных электрических сетей, направленный на одновременную оптимизацию топологии сети, размещения распределенной генерации и учета неопределённостей данных. С точки зрения СДСС НПМ БР предложенный аппарат позволяет одновременно минимизировать потери мощности и стоимость коммутационных операций, обеспечивая адаптивную работу сети в условиях неопределенности. Основными недостатками предложенного метода являются высокая вычислительная сложность из-за комбинации нескольких метаэвристических алгоритмов, чувствительность к выбору параметров алгоритмов, а также использование интервальных оценок, что может привести к субоптимальным решениям.

В [158] предложен алгоритм самовосстановления передающих сетей, где узлы и рёбра оцениваются с помощью индекса электрического посредничества, учитывающего генерацию, нагрузки и длины путей. Данный подход определяет критичные узлы и пути восстановления, учитывая топологические и электрические характеристик сети, тем самым оптимизирует процесс реконфигурации системы после каскадных отказов, позволяя повысить устойчивость сети к атакам и снизить время восстановления. Недостатками предложенного алгоритма являются, во-первых, высокая вычислительная сложность при расчете индексов для сетей большой размерности, во-вторых, ограниченность учета динамических изменений в реальном времени.

В [159] предложена двухэтапная стратегия реконфигурации сети, учитывающая важность узлов с использованием мер центральности и восстановленную генерирующую мощность. Предложенный инструментарий позволяет балансировать между скоростью восстановления и устойчивостью

системы, оптимизируя структурные и функциональные изменения. В качестве основных его недостатков можно отметить, во-первых, сложность интеграции с реальными системами управления, во-вторых, зависимость от эвристических правил и необходимость ручной настройки весовых коэффициентов

В [160] предложен метод оценки важности узлов в каркасно-сетевой электросети на основе многокритериального метода принятия решений, позволяющий определить веса критериев, учитывая их интенсивность и конфликтность. Разработанный научно-методический аппарат использует графовое представление сети и комбинирует несколько мер центральности для всесторонней оценки узлов сети, что позволяет точнее определять ключевые элементы сети и оптимизировать процесс реконфигурации. Недостатками данного подхода являются необходимость настройки весовых коэффициентов и сложность многокритериальной обработки данных.

В [161] предложен научно-методический аппарат для динамической реконфигурации распределительных сетей с учетом неопределенностей в генерации и нагрузке. Основу решения составляет модель глубокого обучения с подкреплением, которая обучается на исторических данных без прямого взаимодействия с сетью в реальном времени. В контексте СДСС НПМ БР предложенный аппарат позволяет адаптивно изменять топологию сети в условиях нестабильности возобновляемых источников энергии, минимизировать потери мощности и повышать надежность системы за счет прогнозирования и управления в режиме, близком к реальному времени. В качестве основных недостатков можно отметить высокую требовательность к объему и качеству данных для обучения, а также сложность интерпретации решений, принимаемых нейросетевой моделью.

В [162] предложен научно-методический аппарат на основе глубокого обучения для робастной реконфигурации трехфазных несимметричных активных распределительных сетей. Основу решения составляет глубокая сверточная нейронная сеть, которая адаптивно строит множество неопределенностей на основе исторических данных. С точки зрения СДСС

НПМ БР предложенный аппарат позволяет учитывать стохастичность генерации и нагрузки, обеспечивая устойчивость и оптимальность реконфигурации сети в условиях изменяющихся условий. Недостатками являются значительные вычислительные затраты на обучение модели, а также зависимость от репрезентативности обучающей выборки.

В [163] предложен метод динамической реконфигурации сервисов в спутниково-наземных сетях, направленный на обеспечение непрерывности обслуживания и высокой производительности в условиях двойной мобильности спутников и пользователей. В основу предложенного аппарата положена формализация задачи миграции и реконфигурации виртуальных сетевых функций как задачи целочисленного линейного программирования и применение гибридного алгоритма на основе нечеткой логики и квантово-генетического метода. В контексте СДСС НПМ БР предложенный метод позволяет оптимизировать выбор узлов и путей миграции виртуальных сетевых функций с учетом динамики топологии, ограничений ресурсов и требований к качеству обслуживания. Недостатками данного подхода являются высокая вычислительная сложность квантово-генетического алгоритма, чувствительность к выбору параметров модели, а также задержки передачи в условиях высокой мобильности спутников.

В [164] предложен научно-методический аппарат динамической реконфигурации сетевых структур на основе максимизации энтропии с использованием глубокого обучения с подкреплением. Основу решения задачи реконфигурации составляет формулировка задачи перестройки графа как марковского процесса принятия решений и применение алгоритма Deep Q-Network в сочетании с графовыми нейронными сетями. С точки зрения СДСС НПМ БР предложенный аппарат позволяет адаптивно изменять топологию сети для увеличения её энтропии и усложнения навигации злоумышленника, сохраняя при этом связность графа. В качестве недостатков можно определить требовательность к объему обучающих данных, высокую ресурсоемкость обучения, а также ограниченная интерпретируемость стратегий, выработанных моделью Deep Q-Network.

В [165] предложен метод реконфигурации распределительных сетей на основе комплексного анализа сценариев работы в долгосрочном периоде, направленный на снижение суммарных потерь энергии при минимальном количестве переключений. Основу метода составляет кластеризация сценариев нагрузки методом k -средних, формирование типовых сценариев и оптимизация конфигурации сети с использованием генетического алгоритма на основе предложенного индекса потерь. В контексте сложных сетевых систем предложенный аппарат позволяет учитывать изменчивость нагрузки во времени и находить устойчивые конфигурации, эффективные на длительном интервале. Недостатками являются статичность модели, чувствительность к качеству исходных данных, а также ограниченная применимость в условиях высокой динамики и неопределенности.

В [166] предложен научно-методический аппарат синтеза технологий и программ управления реконфигурацией на примере многоузловой децентрализованной вычислительной системы на базе мобильных устройств, направленный на повышение динамической устойчивости, масштабируемости и эффективности распределенных вычислений в условиях отсутствия централизованного управления. В контексте СДСС НПМ БР предложенный аппарат позволяет обеспечить равновесное состояние вычислительной структуры при динамическом исключении узлов, поддерживать целостность распределенного реестра сеансов вычислений и адаптивно перераспределять вычислительные ресурсы и потоки данных в условиях нестационарности нагрузки и отказов узлов. Недостатками предложенного научно-методического аппарата являются высокая вычислительная сложность мультиагентного обучения с подкреплением при масштабировании системы, необходимость точной настройки параметров, а также ограничения, связанные с использованием конкретных аппаратных платформ и программных сред.

В [167] предложен научно-методический аппарат синтеза технологий управления реконфигурацией на примере распределительных электрических сетей, направленный на снижение перегрузки и потерь электроэнергии в

нормальных и аварийных режимах. В основу подхода положены разделение процессов на статическую и динамическую реконфигурацию, использование метода ветвей и границ для поиска оптимальной топологии сети. В контексте СДСС НПМ БР предложенный аппарат позволяет оперативно изменять структуру сети с учетом эксплуатационных ограничений и балансировать нагрузку между центральными узлами. Недостатками предложенного научно-методического аппарата являются необходимость точного задания прогнозных значений нагрузок, а также высокая сложность перебора вариантов при большой размерности сети.

В [168] предложен синтез технологий управления реконфигурацией программно-конфигурируемых сетей, направленный на обеспечение корректного и безопасного восстановления сетевых конфигураций после удаления правил коммутации. В контексте СДСС НПМ БР предложенный аппарат позволяет плавно изменять сетевую конфигурацию без нарушения инвариантов маршрутизации, обеспечивать согласованность обновлений таблиц коммутаторов и избегать аномалий в поведении сети. Недостатками предложенного научно-методического аппарата являются необходимость использования правил с приоритетами, что усложняет управление, а также невозможность решения задачи восстановления в общем случае без привлечения дополнительных механизмов при наличии топологических циклов и разноприоритетных правил.

В [169] предложен научно-методический аппарат реконфигурации сложных сетевых систем на примере группы мобильных роботов, направленный на повышение адаптивности, живучести и эффективности функционирования в недетерминированной среде. Основу решения задачи реконфигурации составляет использование иерархической дискретно-событийной модели с переменной структурой и вычислительных графов для описания алгоритмов группового управления. С точки зрения СДСС НПМ БР предложенный аппарат позволяет динамически синтезировать супервизоры и вычислительные графы при изменении состава группы роботов, обеспечивая

согласованное выполнение групповых операций. Недостатками предложенного подхода являются необходимость заранее определенного набора допустимых групповых действий, а также сложность масштабирования при значительном увеличении числа агентов.

В [170] предложен научно-методический аппарат синтеза технологий и программ управления реконфигурацией бортовых информационно-управляющих систем авиационной промышленности, направленный на повышение надежности, отказоустойчивости и живучести в условиях жестких стандартов. Предложенный аппарат позволяет динамически адаптировать топологию и маршрутизацию СДСС НПМ БР к изменениям структуры системы, минимизируя простои и сохраняя связность. Недостатками предложенного подхода являются риск возникновения «ложных реконфигураций» из-за дискретности процессов обмена данными, а также зависимость от предварительно заданных конфигураций для каждого типа отказа.

В [171] предложен научно-методический аппарат синтеза технологий и программ управления реконфигурацией корпоративных сетей связи, направленный на повышение устойчивости к информационно-техническим воздействиям и сохранение управляемости в условиях кибератак. Задача решается за счет использования взвешенных графов для моделирования сети связи, оценки информированности источника атак, а также ранжирования и последовательного перебора вариантов маршрутизации. В контексте СДСС НПМ БР предложенный подход позволяет динамически менять топологию и маршрутизацию сети, снижая эффективность атак за счет уменьшения информированности о структуре сети. Недостатками предложенного подхода являются необходимость предварительного ранжирования вариантов маршрутизации, высокая вычислительная нагрузка при частых реконфигурациях, а также зависимость от точности оценки параметров качества услуг и весовых коэффициентов.

В [172] предложен научно-методический аппарат реконфигурации информационных систем, подверженных сетевой разведке, направленный на

повышение защищенности и устойчивости информационного обмена за счет динамического изменения их структурно-функциональных характеристик. Основу решения задачи реконфигурации составляет использование марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем, а также методов оптимизации для определения минимально допустимых интервалов реконфигурирования. С точки зрения СДСС НПМ БР предложенный аппарат позволяет рассчитать оптимальную частоту изменения параметров сети, обеспечивая заданный уровень вероятности вскрытия системы при минимальных ресурсных затратах. Недостатками предложенного подхода являются допущение о стационарности и экспоненциальном распределении потоков событий, сложность учета нелинейных зависимостей и совместного влияния нескольких параметров конфигурирования, а также масштабируемость системы.

На основе проведенного анализа отечественных и зарубежных научных работ можно сделать вывод, что решение задачи реконфигурации СДСС НПМ БР основывается на следующей совокупности (или части из них) методов:

- использовании теории графов, гиперграфов, планарных графов, остовных деревьев и мер центральности для формализации структурных зависимостей, обеспечения радиальности и связности;
- формулировке задачи как задачи оптимизации с целочисленными, выпуклыми или многоцелевыми ограничениями для нахождения оптимальных решений с учетом ограничений;
- использовании роевых, генетических, муравьиных алгоритмов для поиска решений в большом пространстве состояний для нелинейных и невыпуклых задач;
- машинном обучении и обучении с подкреплением для принятия решений в реальном времени

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.

Особенности оптимизации и реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий

Содержательная постановка задачи оценки состояния СДСС НПМ БР в режиме реального времени в условиях воздействия дестабилизирующих факторов на предмет многоуровневого информационного взаимодействия с учетом приоритезации информационных каналов имеет следующие особенности:

- если объем поступающей информации превышает возможности средств мониторинга по ее обработке, хранению и передаче, то происходит утеря неиспользуемых данных;
- суммарное время обработки и передачи информации ограничивается длительностью интервала постоянства структуры ($L = l \in L: 0 \leq l < +\infty$), которая варьируется в процессе функционирования СДСС НПМ БР.

В целом задача сводится к математической постановке многокритериальной задачи на графах, которая включает множество допустимых решений, многокритериальную функцию, правила сравнения и выбора альтернативных решений. Однако решение классической многокритериальной задачи на графах не полностью охватывает цели, поставленные в рамках настоящей работы – оперативная оценка структурно-функциональной устойчивости и целостности в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

В частности, для моделирования СДСС НПМ БР с многоуровневым информационным взаимодействием в условиях деструктивных воздействий требуется учитывать следующие особенности:

- применение динамических графов со специальными свойствами самоподобия и неоднородности, что позволяет моделировать системы с высокой степенью структурной сложности и устойчивости динамически изменяющейся во времени;

– введение многовзвешенной модели ребер графа, где каждому ребру приписан вектор весов, зависящий от множественных характеристик (пропускной способности, задержки, надежности и других), изменяющихся во времени [28; 29].

Трудноразрешимые задачи оптимального конфигурирования СДСС НПМ БР

Метод реконфигурирования должен включать определение новой конфигурации СДСС НПМ БР относительно текущей конфигурации. Задача определения новой конфигурации соответствует оптимизационной задаче, когда из множества решений – вариантов конфигураций выбирается наилучшее. В связи с большим количеством параметров задача является многокритериальной, где оптимальное решение выделяется одновременно с учетом всех критериев, а также относится к трудноразрешимым задачам (труднорешаемых, сложных, NP) [69; 74]. Исследуются трудноразрешимые задачи и на больших графах, например, задача поиска потоков с низкой пропускной способностью [84], которая относится к потоковым NP-трудным задачам. В работе предлагается математическая модель задачи MC-GPP (The minimum conductance graph partitioning problem) определения пропускной способности графа, а также гибридный эволюционный алгоритм поиска потоков с низкой пропускной способностью на больших графах. Алгоритм апробирован на больших социальных сетях с миллионами вершин, где поиск локальных компонент соответствует выделению социальных сообществ.

Область исследования многокритериальных задач на графах не является новой. Несмотря на значимые публикации, пока не существует универсальных методов решения многокритериальных задач на графах. В [103] исследована многокритериальная графовая задача с критериями вида MAXMIN и предложен алгоритм поиска решения из полного множества альтернатив. В [104] предлагается два метода решения многокритериальной задачи поиска кратчайшего пути на грубом графе (графе с недетерминированными весами ребер) – модифицированный алгоритм

Дейкстры и метод грубого программирования. Стоит отметить, что даже классические задачи на больших графах и сложных сетях требуют новых подходов поиска решений. Так для вычисления парето-оптимальных кратчайших путей на взвешенной нечеткими весами сети предлагается новый алгоритм [105]. В исследовании также уделено внимание нечеткости самих критериев, что вносит дополнительную сложность в поиск решения. Безусловно теория многокритериальной оптимизации становится все более актуальной, в частности на больших графах и сетях с многими весами и сложными структурами связей [111; 112], в том числе для решения прикладных модельных задач [113]. Для решения задач многокритериальной оптимизации может использоваться теоретико-графовый подход, например, в задаче разбиения социального графа в реальном времени [84] или в транспортно-логистических задачах [115; 116].

В настоящее время пока не существует единых подходов решения NP-задач. Даная проблема усугубляется на больших графах, где задача является трудноразрешимой и с аналитической, и с вычислительной стороны. Анализ частных случаев NP-задач является одним из способов снижения их вычислительной сложности. Этот подход заключается в наложении дополнительных ограничений на свойства входных данных. В настоящей работе такие ограничения применяются к рассматриваемому классу динамических графов. Это в свою очередь позволит на основе наследственных свойств разработать алгоритмы и методики для решения прикладных задачи в сетевых системах большой размерности.

Быстрые последовательные и параллельные алгоритмы выделения оптимальной конфигурации СДСС НПМ БР

В связи с появлением трудноразрешимых оптимизационных задач и задач большой размерности необходима разработка быстрых последовательных и параллельных алгоритмов выделения оптимальной конфигурации СДСС НПМ БР.

Параллельные алгоритмы по сути являются параллельной реализацией последовательных алгоритмов с различной формой параллелизма. Среди всех

параллельных форм имеется одна или несколько форм минимальной высоты. Такие параллельные формы алгоритма называются максимальными, а их высота называется высотой алгоритма. Максимальные параллельные формы алгоритмов представляют предмет особого интереса, так как определяют минимально возможное время реализации алгоритмов если не на реальных, то, по крайней мере, на некоторых гипотетических параллельных вычислительных системах. Для решения одной и той же задачи могут применяться алгоритмы, имеющие различную параллельную сложность. Среди них могут быть и алгоритмы наименьшей высоты.

Разработка теоретических основ параллельного программирования такая же важная задача, как и создание параллельных вычислительных систем и языков параллельного программирования [109; 173]. Существуют большой класс задач, для решения которых требуется обработка сложных дискретных структур. Говоря о *сложной структуре*, будем иметь в виду структуру с «большим» количеством элементов и нетривиальными связями между ними [108; 118]. Задачи, связанные со сложными структурами, возникают в теории просачивания, в теории многоуровневых иерархических систем, в моделировании глобальных структур, таких как Internet [71], глобальные электронные рынки [70] и т.д. Такие структуры зачастую приобретают свойства, которыми не обладают ни отдельные элементы, ни отдельные подструктуры. Поиск решения этих задач и исследование их структур можно проводить, используя возможности параллельных вычислительных систем.

Моделью любой структуры, в том числе и сложной, является граф [79; 80]. Для того чтобы построить граф, являющийся моделью исследуемой структуры, достаточно поставить в соответствие элементам структуры вершины графа, а связям между элементами структуры – ребра графа. Благодаря такому подходу в моделировании структур, многие задачи, возникающие в упомянутых областях, легко формулируются в терминах теории графов. Полученные таким образом теоретико-графовые задачи важно уметь обрабатывать на параллельных вычислительных системах.

1.4 Постановка научной проблемы исследования

Проведенный анализ позволил определить цель исследования, заключающуюся в повышении оперативности принятия решений о реконфигурировании структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности с сохранением её структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий.

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

Разрешение сформулированной научной проблемы способствует развитию теоретической и методологической базы реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях воздействия деструктивных факторов. Таким образом, тема исследования «Модель и метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности» является актуальной.

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 реконфигурирования 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 реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности;

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

В формализованном виде научная проблема представляется (1.1-1.2):

$$\text{МЕТОД: } ATI = \arg \min_{ATI} \tau \left(H(S, N_{\text{ср}}, N_{\text{м}}), ATI, G = (V, E), S \left(A(T_{\text{д}}, T_{\text{р}}, N_{\text{ср}}, N_{\text{п}}) \right) \right), \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} \text{МОДЕЛЬ} = H(N_{\text{ср}}(P_{\text{срр}}, P_{\text{нап}}, Z, Tr), N_{\text{м}}(N_{\text{ср}}, P_{\text{сс}}, B, \rho)), \\ \text{при ограничениях } \rho \leq \rho_0, T_{\text{д}} + T_{\text{р}} \leq T_0, \end{aligned} \quad (1.2)$$

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

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

τ – время принятия оптимальных решений о реконфигурации;

A – алгоритмы реконфигурирования сети передачи данных;

H – пространственно-временные характеристики системы мониторинга;

S – последовательность конфигураций системы мониторинга;

$T_{\text{д}}$ – время доведения информации до конечных потребителей;

$T_{\text{р}}$ – время проведения реконфигураций;

$N_{\text{ср}}$ – наборы приоритетных средств;

$N_{\text{п}}$ – наборы конечных потребителей информации;

$N_{\text{м}}$ – наборы маршрутов доведения;

Tr – траектории движения объектов;

$P_{\text{срр}}$ – параметры средств мониторинга;

$P_{\text{сс}}$ – параметры средств связи;

$P_{\text{нап}}$ – параметры объектов мониторинга;

Z – зона покрытия средств мониторинга;

ρ – радиус устойчивости;

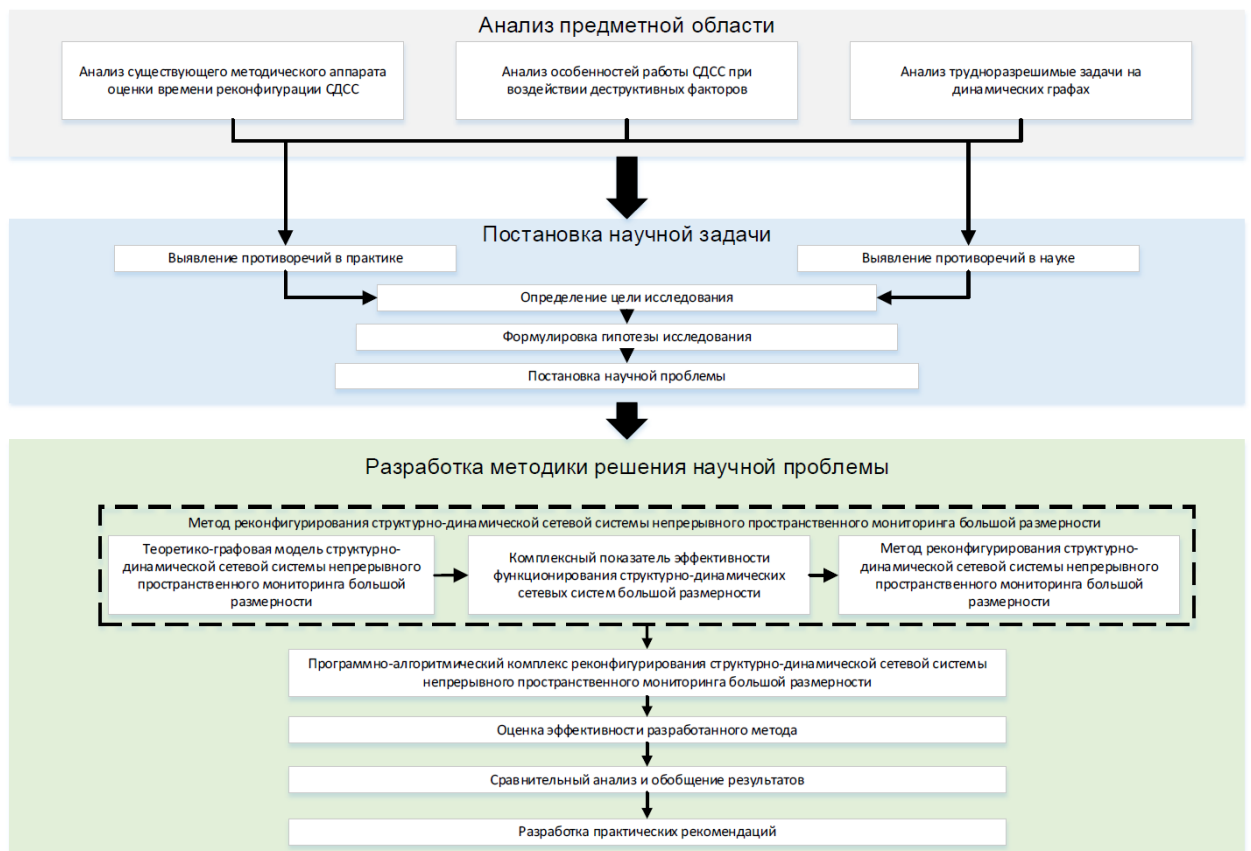
B – внешние воздействия;

T_0 – ограничения по времени;

ρ_0 – ограничения по радиусу устойчивости;

АТИ – агрегированный топологический индекс.

В соответствии с выполненной постановкой научной проблемы на рисунке 1.1 представлена схема исследований, определяющая общую структуру работы.



Источник: составлено автором.

Рисунок 1.1 – Схема диссертационного исследования

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.

Выводы к главе 1

В настоящей главе представлен анализ существующих методов и подходов управления пространственно-распределенными информационными системами мониторинга, а именно модели, методы и алгоритмы реконфигурирования структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.

В качестве структурного описания и основы модели рассматривается использование специального класса предфрактальных графов большой размерности или по-другому больших предфрактальных графов. Предложен обзор современных подходов к решению задач на больших предфрактальных графах в разрезе – большие графы, фрактальные графы и многокритериальные задачи. Анализ научных работ показывает востребованность инструментария больших графов для решения современных прикладных задач, в том числе задач с многими критериями. В связи с развитием науки о больших данных в дальнейшем предполагается значительное увеличение исследований в этом направлении, в частности в разработке методов и алгоритмов решения оптимизационных задач на больших графах. При этом в реальных моделях на больших графах часто проявляются свойства самоподобия, иерархичности, кластеризации, присущие фрактальным графам. В настоящей работе предлагается развитие инструментария обработки больших предфрактальных графов – постановки многокритериальных задач, методы и алгоритмы их решения. Класс больших предфрактальных графов, зародившийся на стыке больших графов и фрактальных графов со специальными свойствами самоподобия. Значительное число больших графов «реального мира» обладает свойствами самоподобия, кластеризации и иерархичности, то есть входит в класс больших предфрактальных графов. Задачи, разрешимые на графах малой размерности, становятся трудноразрешимыми или вовсе неразрешимыми с вычислительной точки зрения на больших графах. Инструментарий больших предфрактальных графов предлагает методы решения сложных (трудноразрешимых и NP -полных) задач. При этом сложность многокритериальных задач на больших графах, в том числе со

многими весами, увеличивается многократно, что приводит к аномальным вычислительным сложностям задач.

В первой главе также рассмотрены модели ПРИСНМ и постановки оптимизационных задач с различными критериями: весовыми и топологическими. Отмечено, что для снижения последствий возможных деструктивных воздействий, а также прогнозирования поведения ПРИСНМ необходима метрика эффективности информационного взаимодействия информационных средств в составе системы. Предложено использовать комплексный показатель, представляющий собой свертку структурно-топологических метрик и реализующий в себе основные требования оперативного управления и контроля структурной устойчивости ПРИСНМ. Исходя из решаемых задач ПРИСНМ предложены основные структурно-топологические метрики. Отмечено, что, изучая каждую метрику и применяя к анализу предложенный критерий, можно оценить механизм информационного взаимодействия между средствами мониторинга ПРИСНМ, как с точки зрения структуры и ее качества, так и с точки зрения характера информационного обмена во времени.

Развитие научно-методического аппарата моделирования СДСС НПМ БР для реконфигурации в режиме реального времени необходимо по следующим направлениям.

Рост размерности и динамичности: 1) экстремальная размерность графовых структур приводит к тому, что даже полиномиальные алгоритмы перестают обеспечивать получение решений в допустимое время, что делает невозможной оперативную реконфигурацию без специальных методов редукции и приближённого моделирования; 2) высокая динамичность топологии и параметров каналов требует перехода от отложенного анализа к непрерывному моделированию, учитывающему изменения как на топологическом, так и на операционном временных масштабах.

Усложнение деструктивных воздействий: 1) расширение набора деструктивных воздействий требует оперативной оценки структурно-функционального состояния системы и реконфигурирования сети;

2) одновременное действие функциональных и структурных нарушений делает традиционные статические модели неадекватными, так как они не учитывают комбинированное влияние деградации параметров и разрушения топологии.

Ограничения существующих моделей и алгоритмов: 1) классические теоретико-графовые модели и аппараты массового обслуживания ориентированы на анализ устойчивости и пропускной способности, но не описывают механизмы реконфигурации сети в реальном времени с учётом приоритизации информационных потоков; 2) существующие алгоритмы часто выполняются в отложенном режиме из-за аномальной вычислительной сложности, что не позволяет использовать их в задачах адаптивного управления СДСС НПМ БР при быстро меняющихся условиях.

Необходимость иерархического и предфрактального моделирования: 1) иерархическая и самоподобная структура СДСС НПМ БР требует применения предфрактальных моделей, позволяющих декомпозировать задачу и получать решения на разных уровнях иерархии с последующей агрегацией результатов; 2) использование коэффициента подобия и предфрактальных траекторий позволяет перенести решения, полученные на идеализированных моделях, на реальные сети, что критично для вычислительно-эффективной реконфигурации в режиме реального времени.

Требования к оперативному управлению: 1) переход к управлению в режиме реального времени предполагает наличие интегральных показателей структурно-функциональной устойчивости, которые могут быстро пересчитываться при изменении топологии и параметров каналов и использоваться как критерии для автоматизированной реконфигурации; 2) интеграция многокритериальной оптимизации с робастным подходом необходима для одновременного обеспечения минимизации задержек, сохранения связности, приоритизации критически важных потоков и устойчивости к деструктивным воздействиям в условиях неопределённости.

Дальнейшее развитие научно-методического аппарата моделирования СДСС НПМ БР требует интеграции результатов исследований в области

теории графов, теории сложных сетей, теории оптимального управления, разработки алгоритмов оперативного анализа и реконfigurирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий, создавая предпосылки для перехода от методов отложенного анализа к системам адаптивного управления в режиме реального времени.

Таким образом, развитие научно-методического аппарата моделирования СДСС НПМ БР является обязательным условием перехода от статического анализа и отложенных расчётов к адаптивной реконfigurации структурно-динамических сетевых систем в режиме реального времени.

Можно выделить следующие основные выводы первой главы.

1) Существующие пространственно-распределенные сетевые системы непрерывного мониторинга (в том числе и специальные), функционируют с постоянно нарастающим разнообразием средств мониторинга, что требует создания новых подходов по модернизации управления без вывода систем мониторинга из эксплуатации.

2) Анализ возможных дестабилизирующих факторов различной природы (происхождения) показал, что появляется риск потери технических характеристик как средств мониторинга, так системы мониторинга в целом.

3) Особое место в современных система мониторинга занимают беспилотные аппараты (в первую очередь летательные) с различными системами видения. Высокая мобильность БЛА позволяет обеспечить сосредоточение усилий по мониторингу в заданных зонах. Вместе с тем их мобильность формирует проблемы с оптимальным доведением информации в сети с динамической (переменной) топологией.

4) Проведенный анализ позволил выявить ряд нижеследующих противоречий в науке и практике.

Противоречие в практике – между необходимостью поддержки на заданном уровне структурно-функционального состояния СДСС НПМ БР и оперативностью реконfigurации системы.

Противоречие в науке – заключается в необходимости совершенствования методического аппарата многокритериальной

реконфигурации СДСС НПМ БР для повышения оперативности принятия решения и расширяющимися условиями деструктивных воздействий в том числе недетерминированной природы.

5) С учетом выявленных противоречий в науке и практике, сформулированы цель, объект, предмет, и научная проблема диссертационного исследования.

Цель исследования – повышение оперативности принятия решений о реконфигурировании структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности с сохранением её структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий.

Объект исследования – структурно-динамическая сетевая система непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.

Предмет исследования – методы реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.

Для достижения цели исследования, с учетом выбранного объекта и предмета исследования, необходимо разрешить следующую научную проблему – разработать модель и метод 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.

6) Проведена формализация научной проблемы и ее декомпозиция на взаимоувязанный комплекс частных научных и прикладных задач:

- 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.

Логика построения диссертационной работы определяется последовательностью решения указанных задач исследований.

7) Рамки исследования формируются исходя из технических характеристик разнородных средств мониторинга, используемых для создания пространственно-распределенных сетевых систем мониторинга.

Глава 2

Теоретико-графовая модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

2.1 Особенности этапов функционирования и задачи модели структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Как было представлено в предыдущем разделе, целью систем мониторинга является слежение за окружающей обстановкой в пределах заданного пространства для предоставления данных центрам управления и принятия решений. Осуществление мониторинга в широком смысле без специализации системы мониторинга представляет собой сложный процесс, особенно это касается следующих прикладных задач.

1) Программы экономического развития, представленные динамическими деревьями целей, в которых собираются и агрегируются данные о результативности и эффективности мероприятий. Агрегированные показатели на верхнем уровне дерева говорят об успешности или недостатках, возникающих в процессе реализации целевых программ.

2) Многокритериальная задача оптимального размещения средств мониторинга с критериями максимизации количества объектов мониторинга и минимизации расстояния между самими средствами мониторинга.

3) Непрерывные системы мониторинга, представленные программными средствами мониторинга. В частности, мониторинг за распространением эпидемических процессов в компьютерных сетях, где в качестве средств мониторинга выступают антивирусные приложения на локальных компьютерах или серверах, в случае глобальной сети.

В представленных примерах, а точнее классе прикладных задач – взаимодействие средств мониторинга и процесс информационного обмена

основаны на сложно-структурированных связях, меняющихся во времени. Возможности формирования пространственно-распределенной системы мониторинга с большим количеством составляющих элементов приводят к появлению новых задач в области построения топологии и структуры связей в системе мониторинга, в частности к задаче построения СДСС НПМ БР с оптимальными структурно-функциональными характеристиками.

Построение СДСС НПМ БР подразумевает применение теоретической основы, в качестве которой выступает динамическая теория графов. С целью эффективного выполнения задач мониторинга и функционирования СДСС НПМ БР, в том числе и в условиях деструктивных воздействий, необходимо формализовать этап функционирования СДСС НПМ БР. Процесс построения СДСС НПМ БР включает в себя – такие операции как конфигурирование с заданными свойствами и параметрами, функционирование в условиях деструктивных воздействий с возможностью адаптивного изменения структуры системы для сохранения заданных параметров и устойчивости к разрушению.

Для определения указанных операций необходимо разработать модель СДСС НПМ БР, которая позволит описать каждую из операций, задать входные и выходные параметры, определить оптимизационные задачи. Свойства и параметры СДСС НПМ БР задаются структурно-функциональными характеристиками. Область допустимых значений, начальные значения – состав и описание структурно-функциональных характеристик определяются моделью СДСС НПМ БР.

Как правило [174; 175] функционирование СДСС НПМ БР представляется из трех укрупненных этапов. На каждом из этапов модель СДСС НПМ БР обеспечивает или организует выполнение задачи мониторинга в соответствии с ее постановкой (заданными параметрами – областью мониторинга, количеством средств мониторинга, свойствами и характеристиками сети связи и др.).

1. *Этап конфигурирования СДСС НПМ БР.* Под конфигурированием или построением понимается формирование графа конфигурации СДСС НПМ

БР с заданными свойствами и характеристиками – что представляет собой структуру подсистемы связи СДСС НПМ БР.

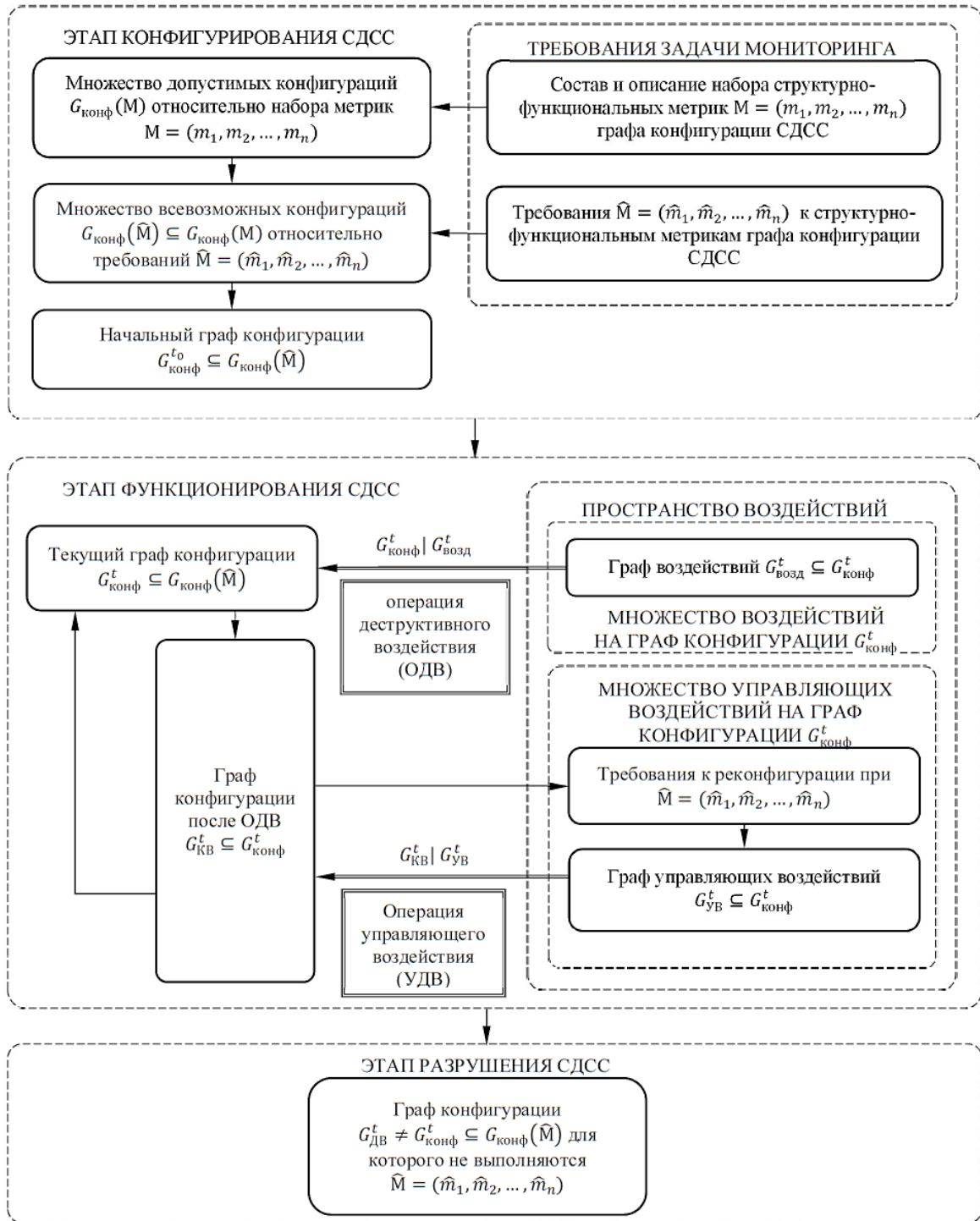
2. *Этап функционирования СДСС НПМ БР.* На этапе функционирования СДСС НПМ БР выполняется задача мониторинга, в том числе оптимизация работы системы для ее поддержания в работоспособном состоянии. На этапе функционирования в условиях деструктивных воздействий применяются меры по сохранению работоспособности – посредством реконфигурирования СДСС НПМ БР.

3. *Этап разрушения (деактивации) СДСС НПМ БР.* На этапе разрушения происходят необратимые изменения системы, приводящие к нарушению функционирования системы без возможности восстановления ее работоспособности за приемлемое время. Результатом деактивации системы является завершение ее жизненного цикла. Деактивация системы может быть управляемой, неуправляемой с элементами самоорганизации (саморазрушение системы), неуправляемой под воздействием внешних (деструктивных) факторов, как естественного, так и искусственного происхождения (целенаправленное разрушение системы). Следует отметить, что процесс реконфигурации – является противодействием разрушению СДСС НПМ БР.

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 управляющих воздействий.

Следует отметить, что на этапе функционирования СДСС НПМ БР на систему могут оказывать влияние деструктивные воздействия естественного и искусственного происхождения. В этом случае необходимо сохранение работоспособности системы с помощью ее реконфигурирования. Что определяет одну из важных задач модели СДСС НПМ БР – оптимальное динамическое реконфигурирование СДСС НПМ БР для сохранения ее

характеристик и в целом состояния работоспособности и функционирования в заданных параметрах.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2.1 – Схема функционирования СДСС от этапа конфигурирования до завершения функционирования в условиях деструктивных воздействий

Конфигурирование в составе модели СДСС НПМ БР означает формирование структурно-функционального состояния системы на

начальный момент времени [176]. Структура СДСС НПМ БР как одна из составляющих модели представляет собой взвешенный граф или по-другому сеть, где в качестве весов выступают функциональные параметры (характеристики).

На рисунке 2.1 представлена схема функционирования СДСС НПМ БР состоящая из трех этапов с момента конфигурирования, функционирования – выполнения задачи мониторинга и завершения с присущими им операциями и ограничениями, в том числе в условиях деструктивных воздействий.

В настоящей работе под оптимальными структурно-функциональными характеристиками понимаются характеристики, позволяющие решать данную задачу мониторинга в пределах допустимых значений характеристик.

Таким образом, на основе формализованного описания жизненного цикла СДСС НПМ БР – этапов конфигурирования, функционирования и разрушения, модель должна решать следующие задачи:

- отражать структуру СДСС НПМ БР со всеми особенностями, в том числе описывать сложно-структурированные связи разнородных и разноуровневых элементов системы мониторинга с учетом свойств кластеризации, иерархичности, подобия и масштабируемости;
- обеспечивать работоспособность подсистему связи, а именно обеспечивать своевременность, достоверность и полноту передачи информации между средствами мониторинга или в центры управления (обработки информации) в заданные сроки;
- определять состояние СДСС НПМ БР в непрерывном (топологическом) времени, конкретнее позволять оценивать состояние системы мониторинга на разных этапах ее жизненного цикла посредством структурно-функциональных характеристик;
- динамически реконфигурировать СДСС НПМ БР, то есть обеспечивать процедуру оптимального конфигурирования и динамического реконфигурирования системы для выполнения задачи мониторинга;
- сформировать единый показатель оценки состояния СДСС НПМ БР посредством формирования комплексного показателя структурно-функционального состояния системы на основе заданных характеристик;

– обеспечить непрерывный мониторинга в условиях деструктивных воздействий, обеспечивать решение задачи непрерывного пространственного мониторинга в условиях деструктивных воздействий посредством сохранения показателей устойчивости, целостности и надежности в заданных пределах.

На рисунке 2.2 изображены в схематическом виде задачи модели СДСС НПМ БР, каждая из которых в отдельности решается на основе аппарата динамических графов. При этом модель СДСС НПМ БР должна объединить в себе возможность взаимосвязанного решения всех частных задач.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2.2 – Задачи модели СДСС НПМ БР, обеспечивающие выполнение задачи мониторинга

Модель позволяет оценивать состояние СДСС НПМ БР в процессе функционирования в условиях деструктивных воздействий – реконфигурировать СДСС НПМ БР для сохранения параметров задачи

мониторинга (постановки задачи) через структурно-функциональные характеристики.

Представленные задачи направлены на разработку модели СДСС НПМ БР, которые можно решать с помощью аппарата теории графов с готовыми или модифицированными инструментами в его составе. Накопленный инструментарий современной теории графов [176, 177] представляет основу для создания моделей оптимального конфигурирования и реконфигурирования СДСС НПМ БР с многими весами, в том числе недетерминированной природы (интервальные числа, временные ряды и др.).

Аппарат динамических графов и сетей [178] широко используется при изучении сложных структурно-изменяющихся сетей различной природы. Особое значение на практике имеют динамические сети связи, которые становятся основой пространственно-распределенных информационных систем с подвижными средствами мониторинга. Текущее структурно-функциональное состояние системы мониторинга, называемое конфигурацией, может меняться во времени в зависимости от поведения средств мониторинга.

Таким образом, на каждом из этапов жизненного цикла имеются свои особенности функционирования СДСС НПМ БР. Вместе с этим на каждом из этапов применяется граф конфигурации, отражающий структуру связей СДСС НПМ БР, вначале это построение графа конфигурации в соответствии с заданными параметрами, далее реконфигурирование СДСС НПМ БР – изменение графа конфигурации для сохранения структурно-функциональных характеристик в допустимых значениях, и завершение функционирования СДСС НПМ БР – разрушение графа конфигурации посредством управляющих воздействий.

2.2 Формализация этапов функционирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

В процессе жизненного цикла СДСС НПМ БР сталкивается с различными деструктивными факторами, как искусственного, так и

естественного характера. При этом СДСС НПМ БР выполняет задачу мониторинга собирая данные и передавая их через средства мониторинга. При этом, на каждом этапе функционирования системы возникают свои сложности, которые необходимо определять и принимать управляющие воздействия. Состояние системы оценивается комплексным показателем, отражающим на текущий момент времени нахождение системы в пределах допустимых значений и меняющимся в соответствии с деструктивными воздействиями. Такие динамические разнородные воздействия затрудняют применение традиционных методов, а в ряде случаев делает их неэффективными.

Для учета разнородных и динамических воздействий в целях сохранения функциональности СДСС НПМ БР, нужна формализация этапов функционирования – определение особенностей для формирования корректных структурно-функциональных зависимостей.

Формализация этапов функционирования с описанием особенностей направлена на разработку модели СДСС НПМ БР, метода динамического реконфигурирования (адаптации к изменившейся обстановке) и алгоритмического комплекса поддержки функционирования и реконфигурирования СДСС НПМ БР.

Для чего в настоящей диссертации по результатам проведенного анализа определены особенности этапов функционирования и задачи модели СДСС НПМ БР.

Конфигурирование структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

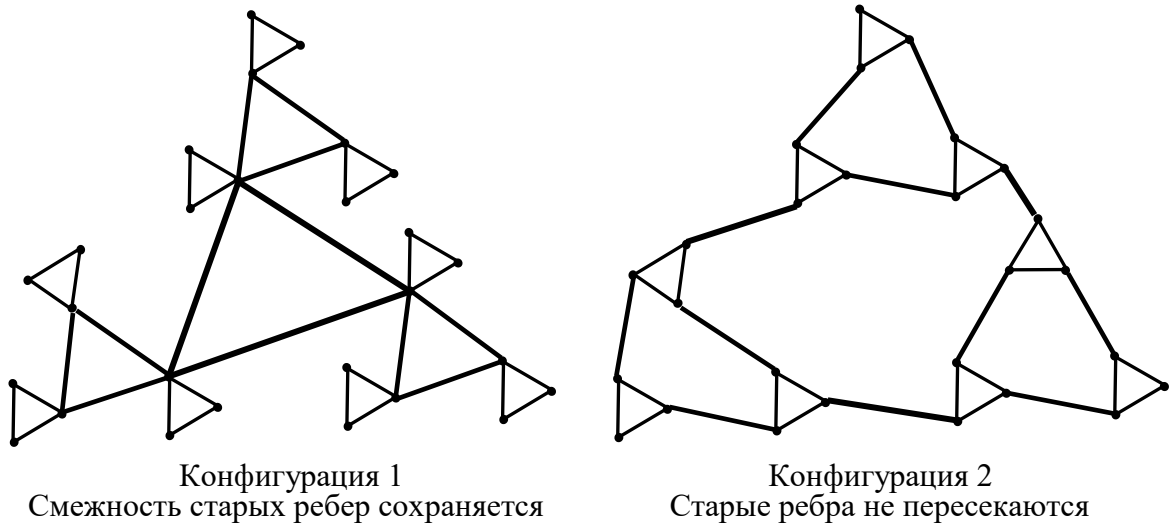
Конфигурирование СДСС НПМ БР предусматривает определение всех ее параметров мониторинга с учетом особенностей окружающей обстановки и в соответствии с требованиями задачи мониторинга. В топологическом смысле это означает построение такой структуры СДСС НПМ БР, которая обеспечивает пространственно-распределенный мониторинг. Конфигурирование СДСС НПМ БР осуществляется посредством инструментария динамических графов, который позволяет строить альтернативные графы с заранее заданными свойствами и характеристиками,

а в дальнейшем реконфигурировать СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий. Такие графы являются основой для общей модели СДСС НПМ БР и ее частных моделей для прикладных задач мониторинга.

Конфигурирование или *построение графа конфигурации* $G_{\text{конф}}$ задает структурно-функциональные характеристикам СДСС НПМ БР. Граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ и структурно-функциональные характеристики СДСС НПМ БР являются параметрами задачи мониторинга. В настоящей работе как показал предварительный анализ для описания сложно-структурированных взаимосвязей, меняющихся во времени в условиях внешних воздействий, целесообразно применять аппарат динамических графов – при построении графов конфигураций $G_{\text{конф}}$ СДСС НПМ БР для возможности их дальнейшего изменения – реконфигурирования. При решении прикладных задач мониторинга и построения частных моделей СДСС НПМ БР также рассматриваются подклассы динамических графов – предфрактальные, иерархические, кластерные графы, обладающие специальными свойствами – самоподобия, иерархичности и кластеризации. Такой специальный подкласс динамических графов может быть расширен другими графами, обладающими специальными свойствами, необходимыми для построения модели СДСС НПМ БР и решения соответствующей задачи мониторинга.

Преимуществом предфрактальных графов является возможность задавать правила построения (порождения) и характеристики на подграфах, и далее сохранять эти характеристики на графах большой размерности. Что крайне важно в таких прикладных задачах как мониторинг экосистем, в частности за лесным массивом. Система мониторинга за лесным массивом в заданной области осуществляет слежение за температурой и уровнем влажности и предоставляет данные центру, принимающему решение об оперативных действиях – противопожарных мерах или мерах по тушению пожаров. При этом изменение параметров окружающей обстановки требует динамического изменения структуры связей – реконфигурирования СДСС НПМ БР.

На рисунке 2.3 изображены два предфрактальных графа G_3 с одинаковыми подграфами (треугольником – начальным графом первого уровня G_1), но разными конфигурациями.

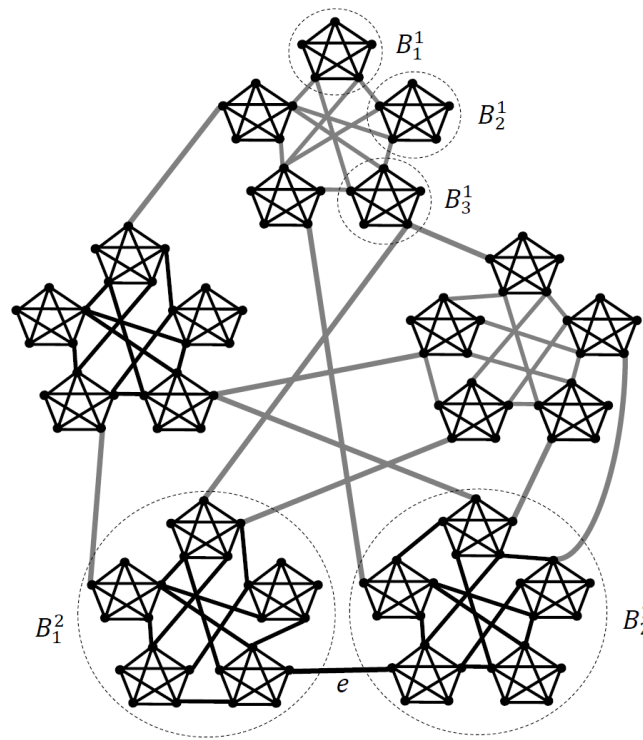


Источник: составлено автором.

Рисунок 2.3 – Предфрактальный граф G_3 в двух конфигурациях

В первой конфигурации, смежность старых ребер сохраняется, что обеспечивает сохранение характеристик, связанных с высокой доступностью вершин – минимальными кратчайшими путями между любой парой вершин. Во второй конфигурации старые ребра не пересекаются, что снижает значения характеристик, связанных центральностью, в том числе снижает возможность распространения деструктивных воздействий по структуре посредством увеличения длин кратчайших путей. В каждой конфигурации формируется свой набор характеристик. То есть, посредством конфигурирования задаются начальные параметры СДСС НПМ БР.

На рисунке 2.4 представлен граф конфигурации $G_{\text{конф}} = G_3$ с произвольной смежностью старых ребер. Малыми пунктирными окружностями обведены блоки первого ранга B_L^1 , а большими окружностями – второго ранга B_L^2 . Блоки второго ранга B_1^2 и B_2^2 являются смежными через ребро e .

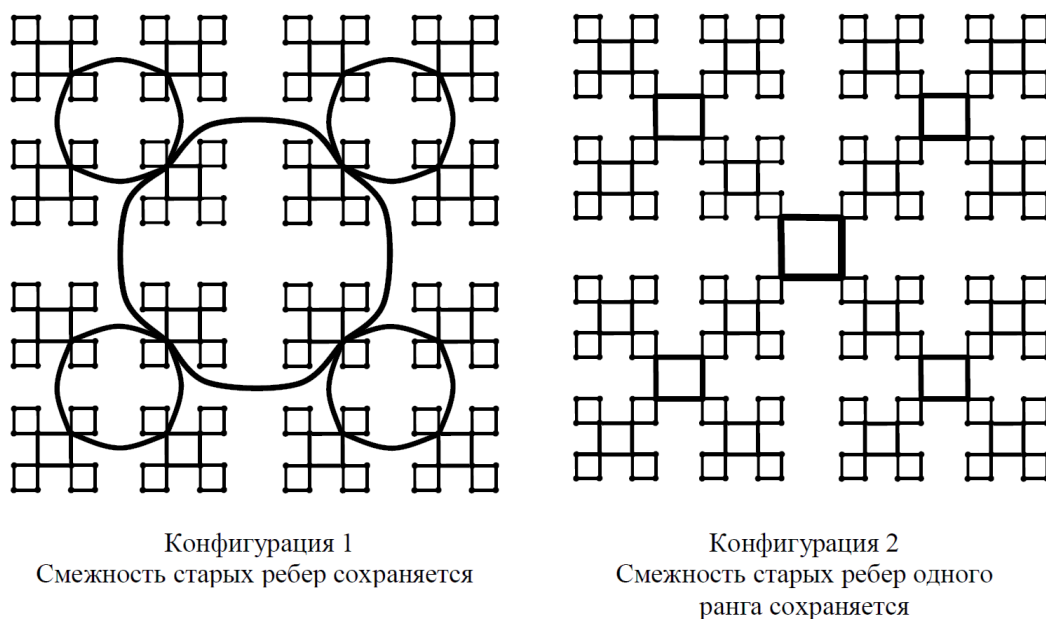


Источник: составлено автором.

Рисунок 2.4 – Граф $G_{\text{конф}} = G_3$ с произвольной смежностью

На рисунке 2.5 изображены два графа конфигурации $G_{\text{конф}}^1$ и $G_{\text{конф}}^2$, порожденных 4-вершинным циклом, но с разными правилами порождения: $G_{\text{конф}}^1$ – с сохранением смежности всех старых ребер, а $G_{\text{конф}}^2$ – с сохранением смежности старых ребер только одинакового ранга. Очевидно характеристики каждой конфигурации будут отличаться. Например, радиус $G_{\text{конф}}^1$ меньше радиуса $G_{\text{конф}}^2$ в силу доступности вершин первого. При одинаковой нумерации вершин в первой конфигурации сумма кратчайших путей (по количеству ребер) меньше, чем во второй конфигурации.

Конфигурирование СДСС НПМ БР – построение графа конфигурации означает задание свойств и характеристик, обеспечивающих выполнение данной задачи мониторинга. При этом могут существовать различные конфигурации с характеристиками, полностью или частично покрывающими заданные требования (параметры) задачи мониторинга. В смысле задачи конфигурирования – необходимо выбрать такую конфигурацию (граф конфигурации), которая обеспечивает задачу мониторинга в соответствии с заданными параметрами (условиями внешней обстановки).



Источник: составлено автором.

Рисунок 2.5 – Предфрактальный граф G_4 в двух конфигурациях

Конфигурирование предполагает формирование свойств, присущих подсистеме связи или в целом системе мониторинга. Среди них следующие свойства:

- своевременность передачи данных между средствами мониторинга или в центры управления (обработки информации) в заданные сроки, отражает весовые функциональные характеристики системы мониторинга (например, пропускная способность каналов связи);
- достоверность передачи данных, которая характеризует требуемую точность передачи данных между средствами мониторинга или центрами управления (обработки информации);
- полнота информации (набора данных), обеспечивается составом и объемом информации (набора данных) достаточным для принятия решения.

В соответствии с требованиями данной задачи мониторинга указанные свойства необходимо включить в состав модели СДСС НПМ БР посредством построения графа конфигурации. Предложенный набор свойств не является исчерпывающим и определяется постановкой задачи мониторинга. Перечисленные выше свойства – своевременности, достоверности и полноты информационного обмена, а далее требования к составу модели СДСС НПМ

БР можно объединить в одном обобщенном свойстве – *качество мониторинга*. При этом качество мониторинга, как было сказано ранее, возможно расширить в зависимости от постановки задачи мониторинга. Задача мониторинга задает требование к модели СДСС НПМ БР в виде качества мониторинга, что отражается в свойствах графа конфигурации. В процессе функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий качество мониторинга может снижаться. Под *штатным функционированием* СДСС НПМ БР – в настоящей работе понимается функционирование СДСС НПМ БР с заданным качеством мониторинга.

Описанные свойства модели СДСС НПМ БР выражаются в виде структурных и функциональных характеристик графа конфигурации или метрик $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n$. Метрика m_i графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ СДСС НПМ БР должна быть не хуже заданного значения метрики $\hat{m}_i$ или по-другому допустимого значения.

Модель СДСС НПМ БР включает в себя не только граф конфигурации, как структуру связей средств мониторинга, а также набор требований задачи мониторинга – представленный набором метрик, их описаний и допустимых значений. Итогом построения графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ и фактически наполнением модели СДСС НПМ БР является конфигурация, соответствующая заданным значениям $\hat{m}_i$ метрик m_i . Набор метрик $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ сформирован из множества метрик $\{m_i\}$. Такое множество метрик является открытым в смысле возможности добавления известных или новых метрик.

Тогда граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ *построен в соответствии с требованиями* $\hat{M} = (\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_n)$. При этом требования могут быть составлены таким образом, что не существует такой конфигурации, которая удовлетворяет всем условиям $m_i \leq \hat{m}_i$ из M . Или по-другому существуют графы конфигурации, удовлетворяющие одним требованиям $m_i \leq \hat{m}_i$ и не удовлетворяющие другим требованиям, то есть, $m_j > \hat{m}_j$. Конфигурации, для которых нельзя улучшить одни значения метрик без ухудшения других,

называем далее несравнимыми или альтернативными конфигурациями относительно требований $\hat{M}$. Всевозможные графы конфигураций относительно метрик M обозначаем $G_{\text{конф}}(M)$, а конкретные реализации графов конфигураций относительно требований $\hat{M}$ обозначаем $G_{\text{конф}}(\hat{M})$ или $G_{\text{конф}}^k(\hat{M})$.

Таким образом модель СДСС на этапе конфигурирования позволяет формировать граф конфигурации с заданными свойствами в соответствии с задачей мониторинга.

Функционирование структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий

Для обеспечения функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий необходимо определение параметров, определяющих статус функционирования. Параметры могут быть выявлены на основе структурно-функциональных характеристики СДСС НПМ БР.

Как было показано, принципиальной задачей СДСС НПМ БР является штатное функционирование в условиях деструктивных воздействий, то есть – сохранение заданных свойств в процессе функционирования, в частности сохранения качества мониторинга. Деструктивные воздействия на СДСС НПМ БР, представленные воздействиями на структуру связей, свойства и характеристики – выражаются в ухудшении значений метрик, то есть выводе значений за допустимые пределы.

Для обеспечения штатного функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий, необходима формализация деструктивных воздействий, представления текущего состояния СДСС НПМ БР, а также управляющих воздействий – реконфигурирования СДСС НПМ БР для сохранения свойств и допустимых значений метрик (характеристик).

Согласно задаче мониторинга, СДСС НПМ БР должна осуществлять непрерывный мониторинг, а подсистема управления в составе СДСС НПМ БР выполнять ряд оптимизационных задач, среди которых удержание параметров

системы в заданных пределах, сохранение целостности и устойчивости системы, сохранение вычислительного баланса при решении сложных оперативных задач, оптимизация численных алгоритмов и повышение точности решений оптимизационных задач [180]. При этом каждая из этих задач предполагает использование своего набора параметров (метрик и показателей) [181; 182].

Модель подсистемы управления СДСС НПМ БР является частной моделью, обеспечивающей функционирование в соответствии с входными параметрами задачи мониторинга.

Необходимо отметить, что СДСС НПМ БР в процессе функционирования подвергается деструктивным воздействиям, как естественного, так и искусственного характера, что влияет на ее структурно-функциональные характеристики [174]. *Деструктивные воздействия* – это внешние и внутренние факторы различной природы (физические, информационные и другие), направленные на СДСС НПМ БР и приводящие к частичному или полному нарушению ее работоспособности. Различают следующие виды таких воздействий:

- 1) воздействия на средства мониторинга и проводные каналы связи;
- 2) воздействия на радиоканалы или радиосети (-подсети) в составе СДСС НПМ БР средствами радиоэлектронного подавления, воздействия на средства мониторинга средствами функционального поражения электромагнитным излучением;
- 3) информационно-технические воздействия на средства мониторинга и каналы связи на разных уровнях центров управления и на протоколы маршрутизации;
- 4) информационно-психологические воздействия на пользователей, в случае вхождения в состав СДСС НПМ БР.

Деструктивное воздействие распространяется как на отдельные элементы – узлы (вершины) и каналы (ребра) связи, так и на подсистемы (подграфы со множеством ребер и графов). Результатом деструктивного воздействия является ухудшение или нарушение структурно-функциональных характеристик двух видов:

- частичное (функциональное) нарушение (снижение весовых характеристик, например, пропускной способности канала связи);
- структурное нарушение (удаление ребер и вершин графа).

Процесс восстановления структурно-функциональных параметров системы до допустимых значений осуществляется путем ее реконфигурирования – применения управляющих воздействий на граф конфигурации. С помощью операций над динамическими графами можно формализовать процесс деструктивного воздействия и реконфигурирования.

В первом случае сохранение общей функциональности системы обеспечивается частичным перераспределением потоков информации, повторной настройкой системы, решением многокритериальной задачи маршрутизации и др. [183-185]. Во втором случае нарушается структура системы (удаление ребер и вершин). При сохранении связности системы (графа) решается задача резервирования и перераспределения потоков. При отсутствии связности – формировании несвязных сетей (графов) необходимо решение задачи структурного восстановления и формирования новых связей с оптимальными критериями (время формирования канала-ребра, пропускная способность, надежность и др.) [186-190].

При этом в случае изменения структурно-функциональных характеристик сети следует говорить об адаптивных (динамических) сетях. Весовые и структурные характеристики элементов и подграфов сети G_L меняются в зависимости от ранга $l = 1, 2, \dots, L$ и коэффициента подобия $\theta \sim l$. Постановка оптимизационной задачи на динамическом графе сохраняется, но очевидно – решение задачи может измениться. В таком случае x_t^0 – решение индивидуальной многокритериальной задачи в момент времени t .

Граф текущей конфигурации $G_{\text{конф}}$ сконструирован по заданным метрикам $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n$, что соответствует структурно-функциональным характеристикам СДСС. Далее вне зависимости от коннотации «деструктивные» – «не деструктивные», воздействия задаются *графом воздействий* $G_{\text{возд}} \subseteq G_{\text{конф}}$. Граф воздействий, являясь подграфом

графа текущей конфигурации, определяет множество элементов, на которые направлено воздействие, и «силу» воздействия посредством весов вершин или ребер $G_{\text{возд}}$. При этом веса элементов графа воздействий меньше весов соответствующих элементов графа конфигурации $w(v, e \in G_{\text{возд}}) \leq w(v, e \in G_{\text{конф}})$. В случае если вес какого-то элемента графа воздействий равен весу соответствующего элемента графа конфигурации, означает полный выход из строя элемента системы. А в случае строгого неравенства $w(v, e \in G_{\text{возд}}) < w(v, e \in G_{\text{конф}})$, вес элемента графа конфигурации уменьшается на вес соответствующего элемента графа воздействия. Графы воздействий проявляемые во времени обозначаем $G_{\text{возд}}^t$, где время t – представляет собой топологическое время, если не оговаривается иное.

Для функционирования СДСС НПМ БР в штатном режиме и решения задачи мониторинга необходимо по результатам любых воздействий сохранять (или восстанавливать) качество мониторинга, то есть, ее структурно-функциональные характеристики m_i в заданных пределах $\hat{m}_i$. На каждое воздействие $G_{\text{возд}}^t$ необходимо изменение конфигурации $G_{\text{конф}}^t \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+1}$ для восстановления характеристик СДСС НПМ БР.

Процесс функционирования СДСС НПМ БР можно представить в виде последовательности переходов (2.1):

$$G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{возд}}^{t+1} \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+2} | G_{\text{возд}}^{t+2} \rightarrow \dots \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+n}. \quad (2.1)$$

После каждого воздействия $G_{\text{возд}}^t$ на граф конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ необходимо реконфигурировать его в виде $G_{\text{конф}}^{t+1}$ для восстановления структурно-функциональных характеристик в заданных пределах, то есть восстановить качество мониторинга, а в ряде случаев в целом задачу мониторинга. По сути необходимо применять управляющие воздействия по реконфигурированию СДСС НПМ БР, направленные на восстановление эффективности ее функционирования (2.2):

$$G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{возд}}^{t+1} \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+2} | G_{\text{возд}}^{t+2} \xrightarrow{\text{УВ}} \dots \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+n}. \quad (2.2)$$

При этом нулевым воздействием считается пустой граф $G_{\text{возд}}^t = \emptyset$, а переход во времени к следующему шагу в последовательности происходит при $G_{\text{возд}}^t \neq \emptyset$.

Управляющие воздействия $\xrightarrow{\text{УВ}}$ это применение графа воздействия, но направленное на восстановление характеристик графа конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ после воздействия $G_{\text{возд}}^t$ (2.3):

$$G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t = G_{\text{КВ}}^t | G_{\text{УВ}}^t = G_{\text{конф}}^{t+1}, \quad (2.3)$$

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, после применения которого получается граф конфигурации $G_{\text{конф}}^{t+1}$ с восстановленными структурно-функциональными характеристиками в заданных пределах.

Для сохранения структурно-функциональных характеристик в заданных пределах необходимо отыскание такого $G_{\text{УВ}}^t$, которое приводит $G_{\text{КВ}}^t$ к состоянию (конфигурации) $G_{\text{конф}}^{t+1}$.

В условиях последовательных деструктивных воздействий на СДСС НПМ БР, то есть существования последовательности переходов, появляются следующие дополнения.

1) Переход к $G_{\text{конф}}^{t+1}$ может потребовать не одного $G_{\text{УВ}}^t$, а больше управляющих воздействий.

2) Множество допустимых решений одной или повторяющейся (динамической) задачи поиска $G_{\text{УВ}}$ состоит из всевозможных подграфов $G_{\text{УВ}} \subseteq G_{\text{конф}}^{t_0}$, где $G_{\text{конф}}^{t_0}$ представляет собой начальный граф конфигурации после завершения этапа конструирования. Из чего также следует, что множество всевозможных воздействий состоит из подграфов $G_{\text{возд}} \subseteq G_{\text{конф}}^{t_0}$.

Описанные воздействия, деструктивные и управляющие, являются структурными. Процесс функционирования СДСС НПМ БР представлен в виде чередования воздействия деструктивных воздействий и далее восстановление допустимых значений характеристик посредством управляющего воздействия, что соответствует последовательности графов – траектории динамического графа. Операции воздействия на текущий граф переводят динамический граф к следующей реализации графа в траектории. Таким образом инструментарий динамических графов позволяет в полной мере описать процесс функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий.

Также функциональные воздействиями рассматриваются для взвешенных графов конфигураций и соответственно взвешенных графов воздействий, где $w(v, e \in G_{\text{возд}}) \leq w(v, e \in G_{\text{конф}})$. Случаи, при которых $w(v, e \in G_{\text{возд}}) > w(v, e \in G_{\text{конф}})$ не рассматриваются, так как применение чрезмерных усилий не целесообразно и по сути сводится к случаю $w(v, e \in G_{\text{возд}}) \leq w(v, e \in G_{\text{конф}})$.

Таким образом, последовательность графов конфигураций является формализацией процесса функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий. Последовательность графов или динамический граф конфигурации представляет собой частную модель функционирования СДСС НПМ БР, которая обеспечивает сохранение структурно-функциональных характеристики и соответственно выполнение задачи мониторинга.

Разрушение структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Задача мониторинга определяет время мониторинга за окружающей обстановкой и соответственно штатного функционирования СДСС НПМ БР. То есть наблюдение за окружающей обстановкой в зависимости от задачи мониторинга проводится в заданный ограниченный временной промежуток. В случае значительного временного промежутка мониторинга, измеряемого

месяцами, годами или десятилетиями, наступают периоды завершения срока эксплуатации, функциональности отдельных элементов или всей системы в целом, происходит моральное, техническое или технологическое устаревание. В таком случае старую систему мониторинга *деактивируют* (демонтируют) и *активируют* (разворачивают) новую систему мониторинга. Вне зависимости от задачи мониторинга и средств мониторинга – новая система мониторинга считается независимой от старой, если не оговаривается иное. В этом случае следует говорить об этапе жизненного цикла СДСС НПМ БР – о ее разрушении или завершении функционирования.

Разрушением графа конфигурации СДСС НПМ БР является структурное разрушение графа конфигурации СДСС НПМ БР без возможности его восстановления. Разрушение может быть управляемым при помощи управляющих воздействий или контролируемым в процессе естественных воздействий окружающей среды. Разрушение может происходить также в результате единичного или множественных деструктивных воздействий. В обоих случаях это означает ухудшение структурно-функциональных характеристик СДСС НПМ БР, препятствующее решению задачи мониторинга.

Таким образом, процесс разрушения начинается в момент времени t продолжающимися деструктивными воздействиями (2.4):

$$G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{возд}}^{t+1} \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+2} | G_{\text{возд}}^{t+2} \rightarrow \dots \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+n}. \quad (2.4)$$

В последовательности $G_{\text{конф}}^t, G_{\text{конф}}^{t+1}, \dots, G_{\text{конф}}^{t+n}$ на каждом последующем шаге ухудшаются характеристики СДСС НПМ БР без возможности или нецелесообразности их восстановления.

СДСС НПМ БР считается разрушенной (в состоянии полного разрушения) с момента прекращения выполнения задачи мониторинга и невозможности восстановления работоспособности СДСС НПМ БР за приемлемое или заданное время.

Временем разрушения СДСС НПМ БР – а именно разрушения графа конфигурации является число графов воздействий с момента времени t . В последовательности $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{возд}}^{t+1} \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+2} | G_{\text{возд}}^{t+2} \rightarrow \dots \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+n}$, время разрушения равно n . То есть, используется топологическое время равное количеству переходов от текущего графа конфигурации до состояния полного разрушения.

Как было определено выше, к разрушению СДСС НПМ БР могут приводить не только целенаправленные деструктивные воздействия, но и управляющие воздействия. Управляющие воздействия для разрушения СДСС НПМ БР применяются в целях пошагового вывода из строя и завершения штатного функционирования в случае завершения срока эксплуатации системы мониторинга, отдельных ее составляющих или других технологических задач. В этом случае целесообразно описывать последовательность воздействий в виде (2.5):

$$G_{\text{конф}}^t | G_{\text{УВ}}^t \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{УВ}}^{t+1} \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+2} | G_{\text{УВ}}^{t+2} \rightarrow \dots \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+n}. \quad (2.5)$$

На этапе разрушения СДСС НПМ БР осуществляется завершение функционирования посредством управляющих воздействий.

Противодействием процессу разрушения в условиях деструктивных воздействий является реконфигурирование СДСС НПМ БР в целях сохранения штатного функционирования в заданных параметрах задачи мониторинга. Таким образом метод реконфигурирования отвечает за сохранение штатного функционирования СДСС НПМ БР.

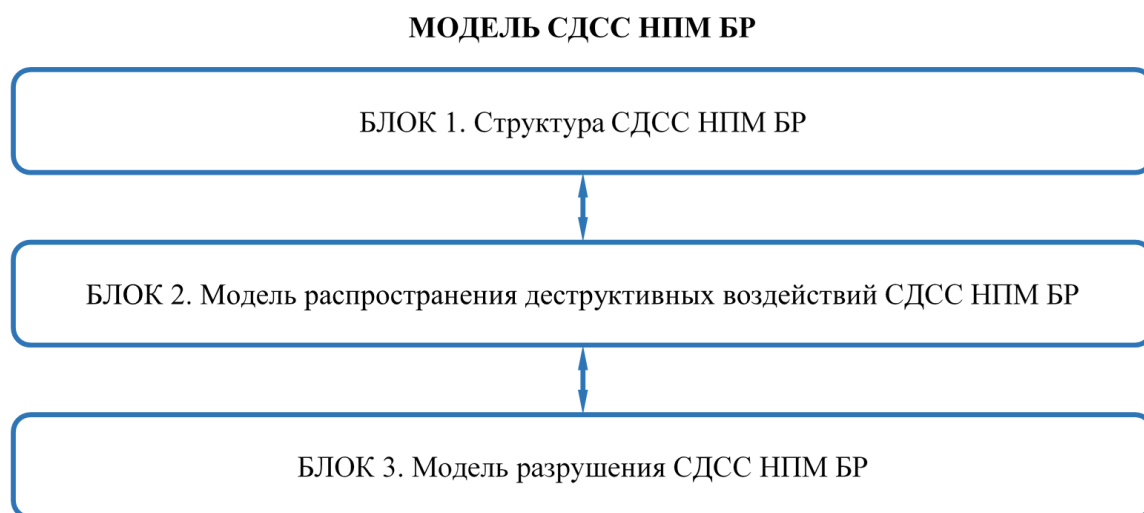
Все три этапа жизненного цикла – конфигурирование, функционирование и разрушение СДСС НПМ БР формализуются на основе графов конфигураций и обеспечивают синтез метода реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий.

Вместе с тем, как было показано ранее, большая размерность СДСС НПМ БР – с большим количеством составных элементов (средств мониторинга и связей между ними) приводят к задачам с высокой вычислительной сложностью. Решение таких задач возможно за счет свойств специальных классов графов – иерархических, предфрактальных, самоподобных и др.

2.3 Теоретико-графовая модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Важной особенностью СДСС НПМ БР является ее большая размерность, то есть большое количество элементов (средств) мониторинга, что накладывает дополнительные требования к разработке модели [191]. Модель должна учитывать большую размерность и позволять решать задачи на всех этапах жизненного цикла.

В соответствии с жизненным циклом модель СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий состоит из трех взаимосвязанных блоков. Укрупненная схема модели представлена на рисунке 2.6.



Источник: составлено автором.
Рисунок 2.6 – Укрупненная схема модели СДСС НПМ БР

Первый блок описывает непосредственно структуру СДСС НПМ БР. В основе модели в этом блоке лежат методы и подходы теории динамических графов [192-194].

Структура СДСС НПМ БР представляется в графовом виде $G = (V, E)$ и включает следующие элементы:

$V = \{v_i\}$ – множество сенсоров сети;

$E = \{e_{ij}\}$ – множество каналов связи;

$|V| = n$ – общее количество узлов $v_i, i = 1, 2, \dots, n$;

$|E| = m$ – общее количество каналов связи e_{ij} между всеми узлами;

α – алгоритм, как элемент математического обеспечения жизненного цикла СДСС НПМ БР;

$A = \{\alpha\}$ – множество алгоритмов решения оптимизационных задач на всех этапах жизненного цикла СДСС НПМ БР;

$A_I \subset A$ – множество алгоритмов конфигурирования или построения структурно-функционального представления СДСС НПМ БР;

$A_{II} \subset A$ – множество алгоритмов реконфигурирования структурно-функционального представления СДСС НПМ БР;

$l = 1, 2, \dots, L$ – уровень (иерархия) функционирования подсистемы СДСС НПМ БР;

$A_l \subset A$ – множество алгоритмов, функционирующих на уровне l СДСС НПМ БР;

S – множество состояний (конфигураций) СДСС НПМ БР;

$S_{\text{конф}}$ – текущая конфигурация СДСС НПМ БР, определяющая ее структурно-функциональное состояние;

АТИ – агрегированный топологический индекс, отражающий структурно-функциональное состояние СДСС НПМ БР.

Второй блок представлен моделью распространения влияния деструктивных воздействий по структуре СДСС НПМ БР. В третьем блоке представлена модель структурного разрушения сети передачи данных СДСС НПМ БР с расчетом возможных сценариев разрушения при различных критериях.

В каждом из блоков учитывается большая размерность СДСС НПМ БР, что соответствует большой размерности графа конфигурации. Так как применяется аппарат динамических графов, в том числе специальных классов – иерархических и предфрактальных, то на всем протяжении жизненного цикла СДСС НПМ БР будут использованы преимущества этого аппарата.

Модели второго и третьего блоков интегрированы с моделью многоуровневого непрерывного мониторинга СДСС НПМ БР, и в совокупности образуют модель многоуровневого СДСС НПМ БР в условиях

деструктивных воздействий. Модели распространения деструктивных воздействий и структурного разрушения сети, обладающие универсальностью и масштабируемостью, позволяют применять их для исследования влияния деструктивных воздействий на сетевые системы.

Модель многоуровневой структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Существующие и перспективные средства мониторинга в рамках их технических возможностей для охвата значительных территорий, как правило, объединяются в системы с иерархической структурой [195-197]. Это позволяет обеспечить функциональность системы для решения стоящих перед ней задач. С инженерной точки зрения «объединение в систему» средств мониторинга, построенных на различных физических принципах, с учетом их базирования – сложная технологическая задача, направленная на обеспечение связи между средствами мониторинга. Оговоримся, что технологическая задача по обеспечению связи между средствами мониторинга на различных уровнях выходит за рамки настоящего исследования.

Подвижность средств мониторинга при выполнении тактических задач приводит к постоянным изменениям топологии связей системы. Для обеспечения в реальном времени надежной передачи информации между всеми элементами необходимо поддерживать оптимальность маршрутов передачи данных с учетом изменений в топологии сетевой системы. Подобные модели особенно востребованы для динамических сред, поскольку должны учитывать все возможные изменения в их структуре.

Современные системы мониторинга представляют собой, как отмечалось и ранее, структурно-сложные иерархические системы [193; 198]. Ключевыми элементами таких систем являются подвижные средства мониторинга, объединенные в сети (в понимании и инженерном [199; 200], и математическом [201-203]). Сами средства мониторинга могут также выполнять функции ретрансляторов в сети. На различных уровнях иерархии не исключается наличие элементов, выполняющих исключительно функции ретрансляции. Подвижность средств мониторинга системы приводит к

изменениям в топологии (структуре) сети, объединяющей средства мониторинга в систему. Среди требований, предъявляемым к топологии сети, ключевым является связность сети как в целом, так и на различных ее уровнях иерархии.

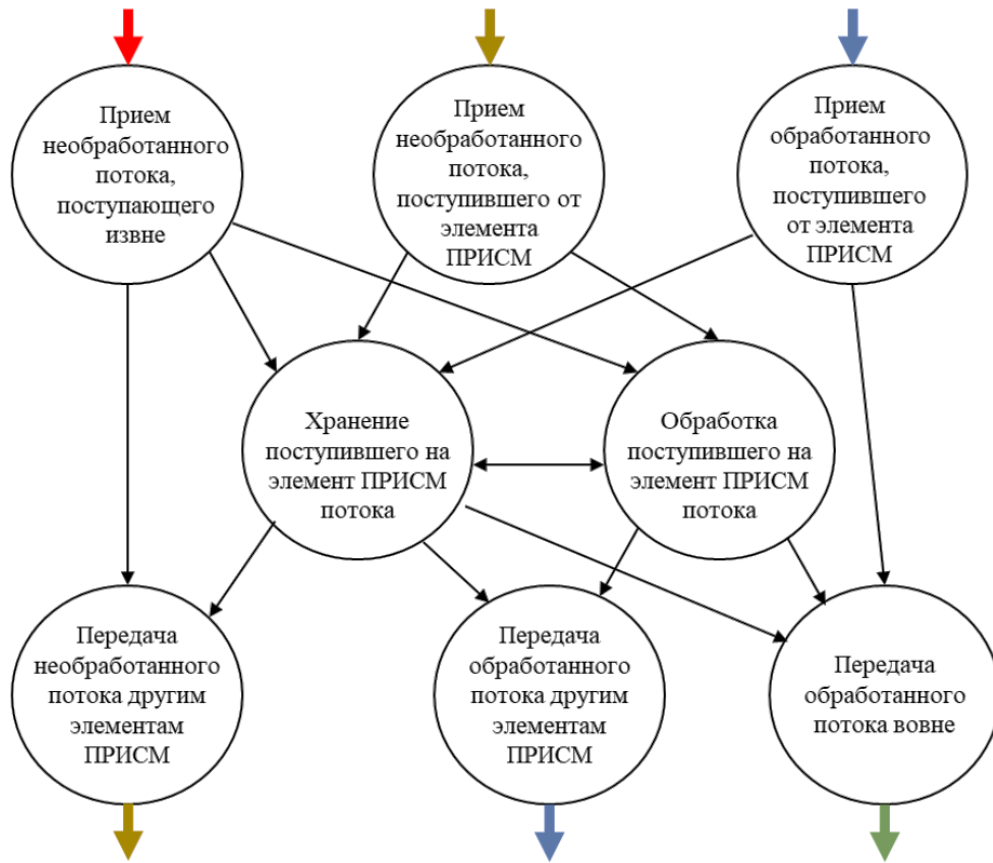
Как было показано в 2.1, аппарат динамических графов применяется для построения модели иерархической многоуровневой системы большой размерности с подвижными элементами [204].

Модель СДСС НПМ БР представляет собой иерархический граф G_L , состоящий из подграфов разных рангов G_l . Граф $G_L = (V_L, E_L)$ – отражает структуру связей сети. Каждое ребро l -го ранга $e^{(l)} \in E_L$ взвешено M , $M \geq 1$ числами, где $l = \overline{1, L}$ – отражает уровни подграфов (подсетей).

В общем виде рассматривается граф $G = (V, E)$ СДСС. Множество вершин $V = \{v_i\}$ состоит из узлов сети, а 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 . Наличие канала связи подразумевает кабельную, радиоэлектронную, лазерную или другие виды физической связи.

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} . Таким образом в одном канале физической связи могут присутствовать несколько цифровых каналов связи. В качестве примера можно привести различные протоколы связи, применяемые на одном физическом канале связи глобальной сети Интернет. $|E_k|$ – общее количество цифровых каналов связи e_{ij}^k между всеми средствами мониторинга v_{i_k} . В частном случае $|E_k| = |E|$, когда для одного физического канала связи задан один вид цифровой связи.

Варианты функциональных взаимосвязей между средствами СДСС НПМ БР, на примере ПРИСМ с большим количеством разнородных информационных средств, показаны на рисунке 2.7.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2.7 – Функциональные взаимосвязи между средствами СДСС НПМ БР

Характеристики цифровых каналов связи e_{ij}^k задаются 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 – надёжность (вероятность отказа);

w_{ij}^4 – стоимость использования канала (ресурсы, энергия и т.д.);

...

w_{ij}^k – любое другое значимое свойство канала.

В частном случае w_{ij}^k представляют собой описания протоколов из множества $\{\pi_s\}$. 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. В общем случае Λ – информационная структура, определяющая задействованную подсеть СДСС НПМ БР, передачи данных между средствами мониторинга, в частном случае узлами системы, t – время функционирования СДСС НПМ БР, то есть дискретное время, в частном понимается топологическое время, соответствующее изменению структурно-функционального состояния системы, t_0 – начальный момент функционирования СДСС НПМ БР, до начала функционирования в жизненном цикле рассматривает этап конструирования или построения системы.

Наложение матрицы Λ_t на граф G отражает информационную структуру СДСС на момент времени t [205]. Придание или назначение весов вершинам (узлам) и ребрам (каналам связи) также называется процедурой взвешивания графа конфигурации, а сам граф конфигурации – взвешенным.

Конфигурация $S_t = \{\Lambda_t, G\}$ отражает состояние СДСС НПМ БР с заданными структурными и весовыми значениями элементов графа G 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.

Каждый уровень иерархии СДСС НПМ БР также представим в виде динамических графов $G^l = (V^l, E^l)$, $l = 1, 2, \dots, L$ – номер уровня иерархии. Тогда $G^l \subseteq G$, $V = \bigcup_{l=1}^L V^l$, $E = \bigcup_{r=1}^L E^l E^{lr}$, $l \neq r$, где E^{lr} – множество ребер, соединяющие вершины уровней l и r . А также для графов $G_t^l = (V_t^l, E_t^l)$, из траектории G_t , $t = 1, 2, \dots$ будут справедливы выражения $G_t^l \subseteq G^l$, то есть $V_t = \bigcup_{l=1}^L V_t^l$, $E_t = \bigcup_{r=1}^L E_t^l E_t^{lr}$.

Структурная динамика СДСС НПМ БР вследствие деструктивных воздействий представляется в виде динамического графа $G_t = (V_t, E_t)$. Дискретный момент времени t соответствует топологическому моменту

времени графа, когда структура графа меняется под влиянием воздействий, таких как:

- добавление новых узлов или каналов;
- удаление старых узлов или каналов;
- изменение весов ребер в зависимости от нагрузки или внешних воздействий.

Изменения в структуре графа происходят в зависимости от:

- «крупных событий»: таких как сбои, атаки, изменения конфигурации системы или внешние факторы (например, географические изменения или инфраструктурные обновления);
- «инфраструктурных изменений»: изменения, связанные с добавлением новых узлов или каналов связи, выходом из строя оборудования или отключением определённых компонентов системы.
- «внешние деструктивные воздействия»: которые могут приводить к непредсказуемым изменениям в топологии сети [206].

Рассматриваемые предфрактальные графы обладают следующими специальными свойствами:

- кластеризация, где каждая вершина или подгруппа вершин может быть организована в структуры (кластеры), что добавляет свойство масштабируемости в сетевую архитектуру;
- иерархичность, где граф представляется в виде многоуровневой сети и на каждом ее уровне происходит самоподобное разделение на подгруппы узлов и каналов [207; 208].

Существует два типа временных шкал, описывающих изменения в сети:

- топологическое время, описывающее редкие, но существенные изменения в структуре графа;
- операционное время, охватывающее частные, менее значительные изменения параметров ребер и узлов, такие как изменения пропускной способности или задержки.

Исходя из этого, наиболее подходящим методом решения задачи многокритериальной оптимизации является иерархическая

многокритериальная оптимизация с недетерминированными весами [209; 209], которая позволяет:

- учитывать многокритериальность системы, где необходимо оптимизировать несколько показателей (задержка, надёжность, пропускная способность и т.д.);
- обрабатывать недетерминированность весов, вызванную изменениями характеристик рёбер и топологии сети [211-213];
- интегрировать обе временные шкалы, обеспечивая эффективную адаптацию на операционном уровне и устойчивость на топологическом уровне, обеспечивать устойчивость решений к наихудшим сценариям изменений.

Также следует отметить о наличии большой размерности СДСС НПМ БР, что требует применения специальных свойств – предфрактального графа для разработки быстрых алгоритмов решения оптимизационных задач.

На каждом уровне предфрактального графа структура связи может отличаться, как и характеристики ребер, такие как пропускная способность, задержка, надёжность и стоимость. Следовательно, веса ребер для каждого уровня l изменяются с учетом обеих временных шкал и неопределенности.

Для каждого уровня l определим свою многокритериальную функцию $F^{(l)}$, учитывающую характеристики рёбер, временные изменения и неопределённость [214; 215]. Индивидуальная задача с тремя критериями представляется в виде (2.6):

$$F^l(G_F^{(l)}(t, T)) = \begin{bmatrix} F_1^l \left((G_F^{(l)}(t, T)) \right) \\ F_2^l \left((G_F^{(l)}(t, T)) \right) \\ F_3^l \left((G_F^{(l)}(t, T)) \right) \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

где $G_F^{(l)}(t, T)$ – отражает состояние системы на уровне l с учетом обеих временных шкал;

F_1^l – пропускная способность;

F_2^l – задержка;

F_3^l – надежность.

Агрегированная многокритериальная функция оптимизационной задачи формулируется в виде (2.7):

$$\min_x \max_{w \in W} \left\{ \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \lambda_i^{(l)} F_i^l \left(x, w_{ij}^{(l)}(t + \Delta t), w_{ij}^{(l)}(T + \Delta T) \right) \right\}, \quad (2.7)$$

где x – вектор решений (например, маршрутов);

W – множество возможных значений весов, определяемое на основе неопределённости 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.

В качестве примера оптимизации на разных уровнях с учётом двух временных шкал, и наличием большой размерности рассмотрим следующий сценарий. Система мониторинга включает 3 уровня связи:

Уровень 1: локальные узлы с высокой скоростью и низкой задержкой, которые подвержены частым операционным изменениям.

Уровень 2: региональные узлы с умеренной пропускной способностью и средней задержкой, подверженные как операционным, так и топологическим изменениям.

Уровень 3: центральные узлы с высокой надёжностью, но более высокой задержкой и стоимостью, где топологические изменения оказывают значительное влияние.

Моделирование весов с учётом двух временных шкал для уровня 2 представляется следующим образом:

– операционные изменения:

$$w_{ij}^{(2)}(t + \Delta t) = 0,7w_{ij}^{(2)}(t) + 0,2w_{ij}^{(1)}(t) + \varepsilon_{ij}^{2, \text{op}}(t);$$

– топологические изменения:

$$w_{ij}^{(2)}(T + \Delta T) = 0,5w_{ij}^{(2)}(T) + 0,3w_{ij}^{(3)}(T) + \varepsilon_{ij}^{2, \text{top}}(T).$$

Выбор $\lambda_i^{(l)}$ играют важную роль. Например, если на уровне 1 важна минимизация задержки, то $\lambda_2^{(1)}$ будет иметь больший вес, тогда как на уровне 3 может быть приоритетной надежность, что увеличит значение $\lambda_3^{(3)}$.

Решением задачи оптимизации является x , которое минимизирует максимальное значение целевой функции при наихудших сценариях изменений весов на обеих временных шкалах. Изменения на двух временных шкалах соответствуют функциональным и структурным деструктивным воздействиям, то есть снижению весовых значений одних ребер и разрушению других ребер. В условиях большого числа средств мониторинга – представленный пример позволяет снижать трудоемкость оптимизационной задачи.

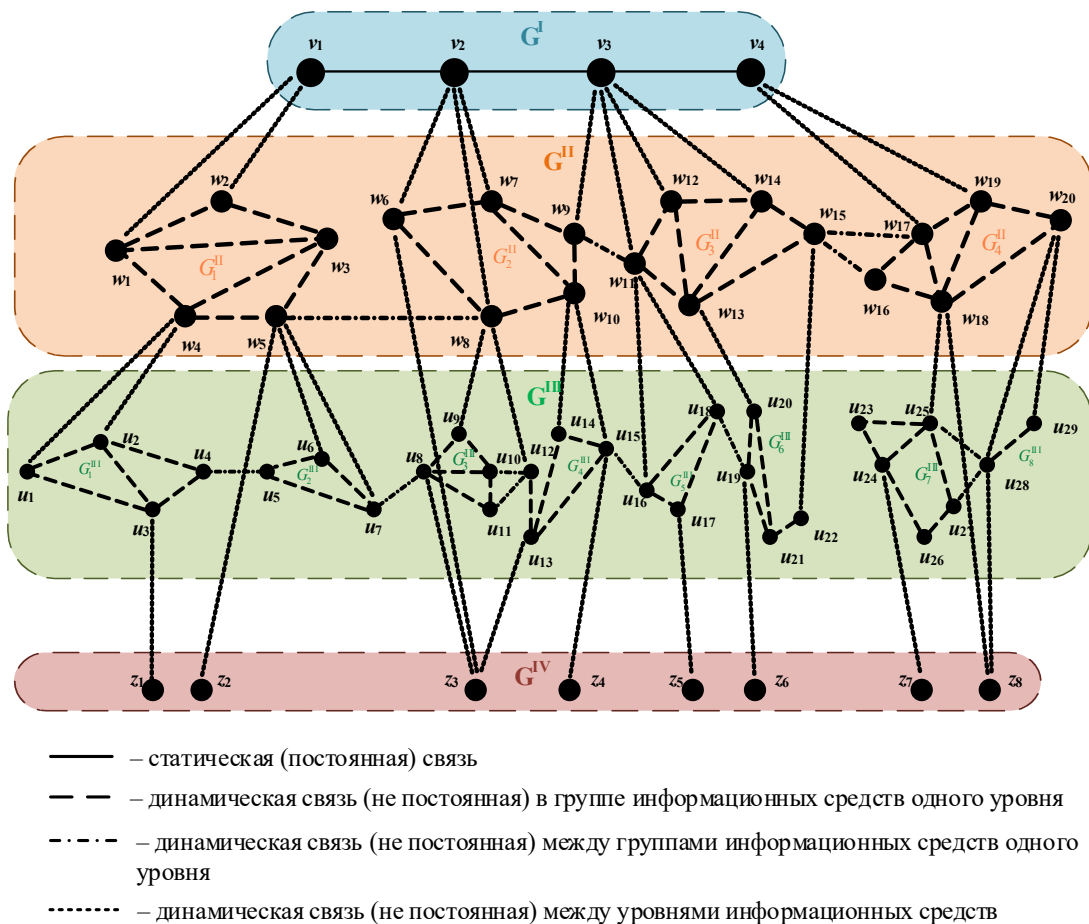
Интеграция рассмотренного подхода и двух временных шкал, включая явный учет топологической временной шкалы в многокритериальной оптимизации, позволяет эффективно управлять сложной структурной динамикой системы с иерархической структурой. Это обеспечивает ряд важных преимуществ [216]:

- система быстро реагирует на частые и мелкие изменения в характеристиках рёбер, поддерживая высокую производительность и эффективность в условиях динамичной среды;
- надежность системы сохраняется при редких, но существенных изменениях структуры сети, что критически важно для долгосрочной стабильности и непрерывности работы;
- повышается надежность принимаемых решений за счёт моделирования наихудших сценариев и учета вариативности параметров, что позволяет минимизировать риски и нежелательные последствия изменений.
- интеграция влияния разных уровней и временных шкал способствует оптимизации системы в целом, а не только ее отдельных частей, обеспечивая гармоничную и эффективную работу всей структуры.

Таким образом, сочетание подхода с двухвременными шкалами в многокритериальной оптимизации создаёт баланс между адаптивностью к

быстрым изменениям и устойчивостью к крупным событиям. Это приводит к повышению общей эффективности и надёжности системы, позволяя ей эффективно функционировать в условиях сложной и изменчивой среды, характерной для систем с предфрактальной структурой. Согласованное управление на всех уровнях и временных шкалах: интеграция влияния разных уровней и временных шкал позволяет оптимизировать систему в целом, а не только её отдельные части.

На рисунке 2.8 в качестве примера представлена иерархическая модель СДСС НПМ БР на основе динамического графа $G = (V, E)$, у которого множество $V = \{v_i, w_j, u_k, z_l\}$ вершин соответствует средствам мониторинга, а множество $E = \{e_m\}$ ребер отражает взаимодействие (связи) как между средствами мониторинга различных уровней системы, так и внутри отдельных групп. В качестве $G^I, G^{II}, G^{III}, G^{IV}$ – обозначены уровни сетевой системы.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2.8 – Иерархическая модель СДСС НПМ БР на основе динамического графа

Как показывает практика [184] инженерные решения в области обеспечения связи между подвижными средствами мониторинга с точки зрения качества и эффективности наделены рядом функциональных ограничений (требований). В значительной степени они связаны с ограниченностью энергетических ресурсов. К таким требованиям относятся и расстояние между носителями средств в сети, и количество носителей-ретрансляторов при передаче информации между средствами мониторинга в сети, и количество каналов связи отдельного средства с другими.

Траектория динамического графа $G_t = (V_t, E_t)$ иерархической модели сетевой системы мониторинга соответствует всевозможным изменениям в ее структуре взаимосвязей. Применение динамических графов для моделирования структуры сетевой системы с подвижными средствами мониторинга позволят также учесть в траектории изменения топологии связей и при деструктивных воздействиях на саму систему.

В представленной многоуровневой модели СДСС НПМ БР описана связь средств мониторинга как на одном уровне, так и между уровнями иерархии. В основе подхода лежит принцип децентрализованной передачи информационных потоков [217; 218].

В качестве примера структурной динамики СДСС НПМ БР на рисунке 2.9 представлена сеть, в которой циркулирует два потока информации – управления и текущих данных мониторинга обстановки. Каждое средство системы характеризуется объемом хранимой информации $V_i, i = \overline{1,8}$, интенсивностью ее обработки $k_{i\sigma}$, где $i = \overline{1,8}$ – номер элемента сети, $\sigma \in [p, c]$ – тип информации (p – информация управления, c – данные мониторинга) и передачи $w_{ij\sigma}$, где $i = \overline{1,8}, j = \overline{1,8}, i \neq j$. Информация о текущей обстановке поступает на вход системы через средства 1 и 7, обрабатывается (средствами 1-4, 7 и 8 с интенсивностью $\varphi_i\sigma$), распределяется 5-м средством и доводится по потребителя информации (средство 6).

внутренних требований. Эта структура характеризуется многоуровневыми и взаимосвязанными элементами, что способствует лучшему управлению и координации различных аспектов мониторинга. Гибкость такой архитектуры важна для многокритериальной оптимизации, так как позволяет системе эффективно интегрировать и анализировать информацию по множеству критериев, которые могут меняться со временем.

Во-вторых, пространственная распределенность системы мониторинга обеспечивает эффективное распределение ресурсов и оперативный доступ к данным, что особенно важно для многокритериальной оптимизации. Распределенная архитектура позволяет системе эффективно обрабатывать и анализировать информацию, поступающую из различных источников и регионов, что способствует более точному и своевременному принятию решений. Приоритизация информационных каналов в такой системе позволяет сосредоточить внимание на наиболее критичных аспектах, улучшая общую эффективность мониторинга и оптимизации.

В-третьих, предфрактальная структура способствует лучшему управлению сложными взаимосвязями и взаимодействиями между различными элементами системы. Это позволяет системе мониторинга учитывать и моделировать сложные зависимости и влияния, что особенно важно в условиях многокритериальной оптимизации. Способность системы учитывать и анализировать сложные данные и их взаимосвязи способствует более глубокому пониманию и управлению многокритериальными задачами, что повышает точность и эффективность оптимизации.

В-четвертых, приоритизация каналов связи в пространственно-распределенной системе позволяет эффективно управлять потоками данных, фокусируя ресурсы на наиболее важных и актуальных задачах. Это улучшает структурно-функциональную устойчивость системы, обеспечивая её способность адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям, сохраняя при этом высокую эффективность и надежность.

Таким образом, модель СДСС НПМ БР с предфрактальной динамической структурой представляет собой мощный инструмент описания

параметров мониторинга, а также для разработки метода оптимального реконфигурирования, в том числе решения задач многокритериальной оптимизации. Ее способность обеспечивать гибкость, эффективное распределение ресурсов, учет сложных взаимосвязей и выделения информационных каналов связи позволяет существенно повысить структурно-функциональную устойчивость системы, что в свою очередь способствует более эффективному и точному решению оптимизационных задач в сложных и изменяющихся условиях.

Как было показано, модель многоуровневой СДСС НПМ БР позволяет описывать сложно-структурированную связь средств мониторинга с отношениями подчиненности. Далее рассматривается модель распространения или влияния деструктивных воздействий, в частном случае посредством импульсного воздействия.

Модель распространения деструктивных воздействий по структурно-динамической сетевой системе непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Влияние деструктивных воздействий на элементы графа конфигурации имеет как прямой, так и косвенный характер. Изменение пропускной способности одного элемента негативно влияет на функциональность связанных с ним компонентов графа. Поэтому при моделировании учитываются как сами воздействия, так и механизмы их распространения по системе.

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. Таким образом, построим модель распространения деструктивных воздействий по структуре сетевой системы.

Направление распространения воздействия между элементами системы задается *ориентированным ребром*. Ограф моделируемой СДСС НПИМ 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, поэтому распространение импульсного воздействия происходит в моменты $t = 1, 2, \dots$.

На основе этой модели можно задать критерии (признаки) достижения предельного состояния системы. Например, система считается достигшей

предельного состояния, если надежность любого ее значимого элемента опускается ниже *критического уровня* его надежности. Это значение разделяет докритическое (работоспособное) и закритическое (неспособное выполнять функции) состояние элемента.

Модель распространения деструктивных воздействий по системе определяется представлением системы в виде взвешенного ориентированного графа $G = (V, E)$ и описанием внешних влияний как автономных импульсных воздействий.

Целью исследования модели является анализ распространения внешнего воздействия по структуре системы и его влияния на состояние ее элементов. Для этого вводятся параметры, оценивающие уязвимость элемента в зависимости от его структурного положения в системе.

Структурная уязвимость $vl(u)$ вершины $u \in V$ определяется числом путей в графе, которые завершаются в вершине u . Этот показатель характеризует безопасность расположения элемента в структуре системы в моменты воздействий.

Для оценки итогового состояния системы вводится понятие *предельной надежности* $br(u)$ вершины u – это надежность элемента в момент окончания воздействия. Данный показатель отражает конечное состояние элемента системы после деструктивных воздействий. *Мерой структурной уязвимости* $rs(u)$ вершины u определяется как сумма длин всех путей, заканчивающихся в этой вершине. *Конденсация* графа $G = (V, E)$ – преобразование графа G , при котором каждый контур стягивается в одну вершину, что дает граф $G^* = (V^*, E^*)$.

Как показано в параграфе 2.2, существует такой этап жизненного цикла системы, при котором происходит ее разрушение, и восстановление и функционирование СДСС НПИМ БР становится невозможным или нецелесообразным. Модель распространения деструктивных воздействий позволяет оценить структурную уязвимость отдельных элементов и определить то критическое состояние системы, при котором начинается ее необратимое разрушение.

Модель структурного разрушения структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Рассматриваемая теоретико-графовая модель структурного разрушения сетевых систем [219] направлена на анализ ключевых сценариев распространения деструктивных воздействий, которые приводят к деградации или полному отказу системы. Основной фокус внимания в данной работе уделяется исследованию зависимости времени разрушения от количества эпицентров (внешних воздействий).

Структура сетевой системы задается графом $G = (V, E)$, не имеющего ориентированных и параллельных ребер, где V – множество вершин (элементов системы), а E – множество ребер (связей между элементами). Каждой вершине $v \in V$ сопоставлены веса, отражающие *текущую* $w(v) \in [a, b]$ и *предельную* $\bar{w}(v) \in [\bar{a}, \bar{b}]$ *загрузки* элемента системы, значения которых определяются случайно по закону непрерывного равномерного распределения, причем должно выполняться условие $b \leq \bar{a}$.

Момент достижения значения текущей загрузки $w(v)$ значения предельного загрузки $\bar{w}(v)$ в процессе разрушения структуры, элемент выходит из строя. Для случая невозстанавливаемого отказа работы системы функциональная нагрузка отказавшего узла передается другим элементам системы. Логично предположить, что в терминах модели предельная загрузка вышедшего из строя элемента системы перераспределяется между непосредственно связанными с ним элементами. Соответственно, такой нагрузке подвергаются вершины графа G , смежными с отказавшей. Таким образом, выход элемента из строя формально соответствует операции удаления из графа вершины и инцидентных ей ребер.

Структурное разрушение – динамический процесс, описываемый в дискретном времени. Не нарушая общности, будем считать, что $w_t(v)$ – текущая загрузка вершины $v \in V$ в момент времени $t = 0, 1, 2, 3, \dots, T$. Если через $\tilde{V}_t = \{\tilde{v}_j^t\} \subseteq V$, $j = 1, 2, 3, \dots, |\tilde{V}_t|$, обозначить множество вершин

вышедших из строя в момент времени t , то есть те, у которых $w_t(v_j) \geq \bar{w}(v_j)$, а через $\xi(\tilde{v}_j^t) = \{v_{i_j}^j\}$ – окружение вершины $\tilde{v}_j^t$ (или множество вершин, смежных с вершиной $\tilde{v}_j^t$), $|\xi(\tilde{v}_j^t)| = \deg \tilde{v}_j^t$, $i_j = 1, 2, 3, \dots, |\xi(\tilde{v}_j^t)|$, то процесс структурного разрушения формально описывается следующим образом.

В момент времени $t = 0$ необходимо произвести проверку по всем вершинам $v \in V$, и сформировать множество $\tilde{V}_1$ из вершин, для которых справедливо $w_0(\tilde{v}_j) \geq \bar{w}(\tilde{v}_j)$. Во все последующие моменты времени $t = 1, 2, 3, \dots, T, \dots$ следует воспользоваться правилом (2.8):

$$w_{t+1}(v_{i_j}^j) = w_t(v_{i_j}^j) + \varepsilon_j \cdot \bar{w}(\tilde{v}_j), i_j = 1, 2, \dots, |\xi(\tilde{v}_j^t)|, j = 1, 2, \dots, |\tilde{V}_t|, \quad (2.8)$$

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

Параметром распределения загрузки является коэффициент ε_j , зависящий от различных факторов. Например, в простейшем случае загрузка распределяется равномерно: для каждой вершины $\tilde{v}_j$ вычисляется $\varepsilon_j = \frac{1}{\deg \tilde{v}_j^t}$.

Равномерным назовем структурное разрушение при параметре распределения загрузки ε_j .

Определение условий перехода системы в критическое состояние, означающее начало процесса разрушения без полного отказа системы, является основной целью моделирования структурного разрушения сетевой системы. Система считается вышедшей из строя при выполнении определенных критериев отказа. *Время T_{cr} структурного разрушения*, показывающее длительность процесса разрушения, является одной из ключевых характеристик в модели структурного разрушения [220].

Для моделирования структурного разрушения сетевых систем имеет смысл использовать один из следующих критериев отказа [221]: критерий полного разрушения $\sigma_0(k)$, критерий связности $\sigma_1(k)$, компонентный критерий $\sigma_2(k, m)$, диаметральный критерий $\sigma_3(k, D)$, где k – входной параметр, число вершин, удаленных из структуры системы в начальный момент времени, m – максимально допустимое число компонент связности,

образующихся при разрушении, D – минимально допустимый диаметр компоненты системы при ее разрушении.

Множество $\Phi(G)$ вышедших из строя элементов в начальный момент времени $t = 0$ считается *эпицентрами структурного разрушения*, то есть для всех критериев $|\Phi(G)| = k$.

Таким образом, используя параметры разрушения определяется текущее состояние системы, указывающее на предполагаемое разрушение системы, даже в условиях противодействия – метода реконфигурирования посредством управляющих воздействий.

Модель многоуровневой СДСС НПМ БР, модель распространения деструктивных воздействий по ее структуре и модель структурного разрушения составляют общую теоретико-графовую модель СДСС НПМ БР, описывающую все этапы функционирования жизненного цикла.

Выводы к главе 2

Теоретико-графовая модель СДСС НПМ БР позволяет описывать допустимое множество состояний системы (эффективное пространство состояний). Жизненный цикл СДСС НПМ БР начинается с этапа формирования системы, представленного процедурой конструирования графа конфигурации, и продолжается до этапа ее деградации, в том числе контролируемого разрушения. Этап конструирования СДСС НПМ БР соответствует построению графа конфигурации с заданными свойствами и начальными весовыми значениями элементов.

На этапе функционирования СДСС НПМ БР – выполнения задачи мониторинга группировкой средств мониторинга на нее влияют деструктивные воздействия естественного и искусственного происхождения. Деструктивное воздействие на СДСС НПМ БР, и формально на ее модельное представление – граф конфигурации, выражается в изменении состояния графа конфигурации.

Текущий граф конфигурации строится с учетом параметров – структурно-функциональных метрик, заданных в некоторых пределах требований. Требования представляют собой интервалы допустимых

значений для каждой из используемых метрик. Теоретико-графовая модель СДСС НПМ БР, а именно граф конфигурации позволяет описать пространство эффективных состояний системы в условиях деструктивных воздействий. Для оперативной реконфигурации необходимо представление всего множества эффективных состояний СДСС НПМ БР. Для оценки текущего состояния СДСС НПМ БР и возможности ее реконфигурации предлагается использовать метрики, отражающие структурно-функциональные характеристики графа конфигурации.

Научным результатом, полученным во второй главе, является теоретико-графовая модель СДСС НПМ. В рамках основного научного результата получены следующие частные результаты.

1) С учетом особенностей функционирования СДСС НПМ БР сформулированы задачи, которые должна решать модель, в том числе определять параметры для динамического 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. Конфигурирование СДСС НПМ БР осуществляется посредством инструментария динамических графов, который позволяет строить на текущем этапе альтернативные графы с заранее заданными свойствами и характеристиками, а в дальнейшем реконфигурировать в условиях деструктивных воздействий. Такие графы являются основой для общей модели СДСС НПМ БР и ее частных моделей для прикладных задач мониторинга.

3) Для обеспечения функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий представлены параметры, определяемые на основе зависимостей модели. Полученные параметры необходимы для разработки метода реконфигурирования и обеспечения функционирования СДСС НПМ БР. Принципиальной задачей является штатное функционирование в условиях деструктивных воздействий, то есть –

сохранение заданных свойств в процессе функционирования. Для обеспечения штатного функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий, предложена формализация деструктивных воздействий, а также управляющих воздействий – обеспечивающих реконфигурирование для сохранения свойств и допустимых значений характеристик.

4) Определено понятие разрушения графа конфигурации СДСС НПМ БР, как структурное разрушение графа конфигурации без возможности его восстановления. Разрушение может быть управляемым при помощи управляющих воздействий или контролируемым в процессе естественных воздействий окружающей среды. Разрушение может происходить также в результате единичного или множественных деструктивных воздействий. В обоих случаях это приводит к ухудшению структурно-функциональных характеристик СДСС, препятствующее решению задачи мониторинга.

5) Обоснована и получена теоретико-графовая модель СДСС НПМ БР. Каждый из трех блоков, составляющих модель многоуровневой модели, в условиях деструктивных воздействий может быть использован автономно для оценки функционирования системы. Второй (модель распространения деструктивных воздействий по структуре сетевой системе) и третий (модель структурного разрушения сети передачи данных СДСС НПМ БР) блоки позволяют описать различные сценарии влияния деструктивных воздействий различной природы на основные структурных и количественных параметров модели первого блока, что в конечном итоге формирует интенсивность и время задержки трафика во всей СДСС НПМ БР.

6) Для модели распространения деструктивных воздействий по структуре сетевой системы установлены аналитические зависимости времени окончания распространения простого импульсного воздействия по структуре системы, а также зависимость предельных значений характеристик элементов системы от автономных импульсных воздействий с заданным начальным импульсом. Введение таких характеристик решает две ключевые задачи: позволяет оптимизировать резервирование наиболее уязвимых элементов и служит основой для планирования реконфигурации всей системы в условиях деструктивных воздействий.

7) Для модели структурного разрушения сети передачи данных СДСС НПИМ БР сформулированы и обоснованы графодинамические соотношения, устанавливающие зависимость времени структурного разрушения от класса графов, критериев разрушения, и размещения эпицентров на самом графе. Наиболее подробно представлены графодинамические соотношения классов графов – цепей и деревьев, которые соответствуют текущим каналам связи в СДСС НПИМ БР.

Разработанная, обоснованная и исследованная в настоящей главе модель многоуровневого информационного взаимодействия СДСС НПИМ БР в условиях деструктивных воздействий создает основу для построения методов, методик и алгоритмов управления информационным взаимодействием средств мониторинга на основе реконфигурирования ее структуры с учетом заданных параметров задачи мониторинга.

Глава 3

Комплексный показатель эффективности функционирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

3.1 Структурно-функциональные характеристики структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий

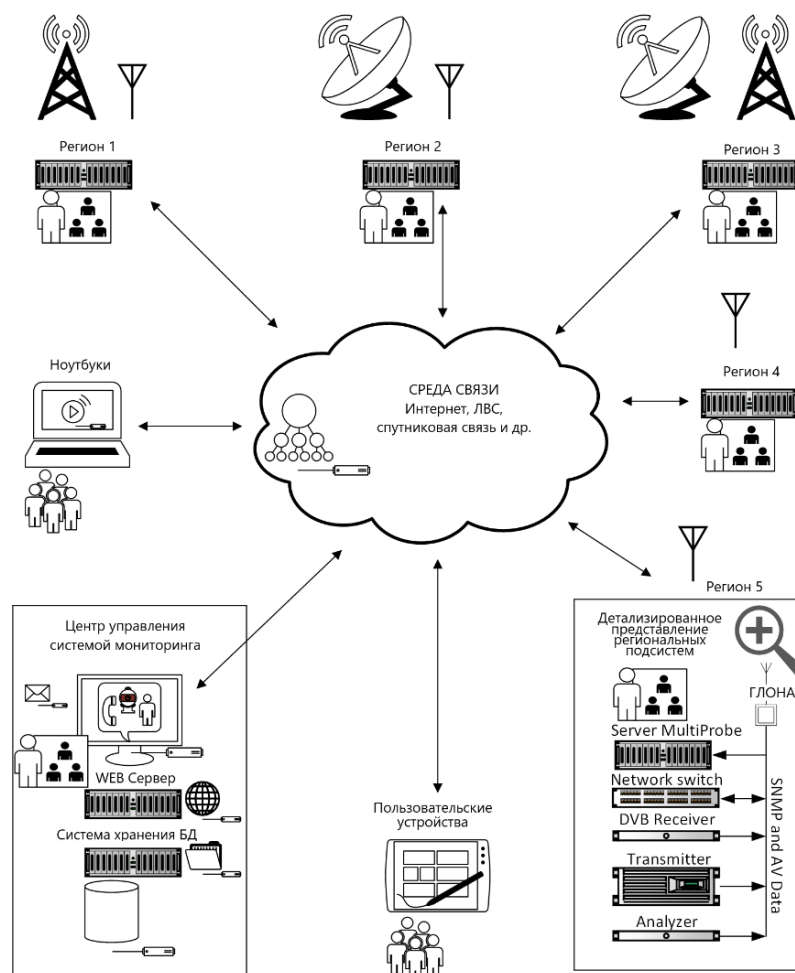
Современные технологии связи и передачи данных позволяют формировать СДСС НПМ БР со значительным количеством разнородных информационных средств, образующих ГСПД и позволяющих выполнять различные задачи мониторинга [222]. Примерами подобных систем являются [223; 224]:

- комплексная система мониторинга качества окружающей среды (реализуется в рамках Государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 № 326) и национального проекта «Экология»);

- комплексная система распределенного мониторинга и записи теле- и радиовещания (реализуется в рамках контрольно-надзорной деятельности территориальных органов и мониторинга средств массовой информации и массовых коммуникаций в части соблюдения законодательства Российской Федерации в сфере связи). На рисунке 3.1 представлена общая структурная схема комплексной системы распределенного мониторинга и записи теле- и радиовещания.

При проектировании и исследовании функционирования подобных сложных систем, как правило, процессы информационного и сетевого взаимодействия рассматриваются отдельно. Это приводит к разработке и

использованию различных показателей оценки информационного и сетевого взаимодействия [225-228]. Подвижные элементы системы могут, благодаря своим техническим характеристикам, одновременно совмещать функции – сенсоров, приемно-передающих устройств, и устройств центрального управления.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3.1 – Комплексная система распределенного мониторинга и записи теле- и радиовещания

Однако, организация информационно-сетевого взаимодействия между элементами системы требуют единого рассмотрения с точки зрения ее работоспособности [229]. То есть передачи конкретной информации между элементами системы с учетом организации структуры ГСПД посредством подвижных средств мониторинга (сенсоров, приемно-передающих устройств, центров управления или центров мониторинга). Существенными

характеристиками процесса передачи информации являются ее полнота (объем), достоверность (доля искажения) и своевременность (скорость доведения), которые в свою очередь зависят от множества внешних и внутренних факторов [230]:

- большое количество слабо формализуемых и зачастую противоречивых целей функционирования, определяемых предметной областью системы, с одновременной их изменчивостью во времени;
- конфликтный и многоаспектный характер функционирования при значительном влиянии человеческого фактора;
- преимущественно понятийный и противоречивый характер исходных описаний условий функционирования и возможных ограничений.

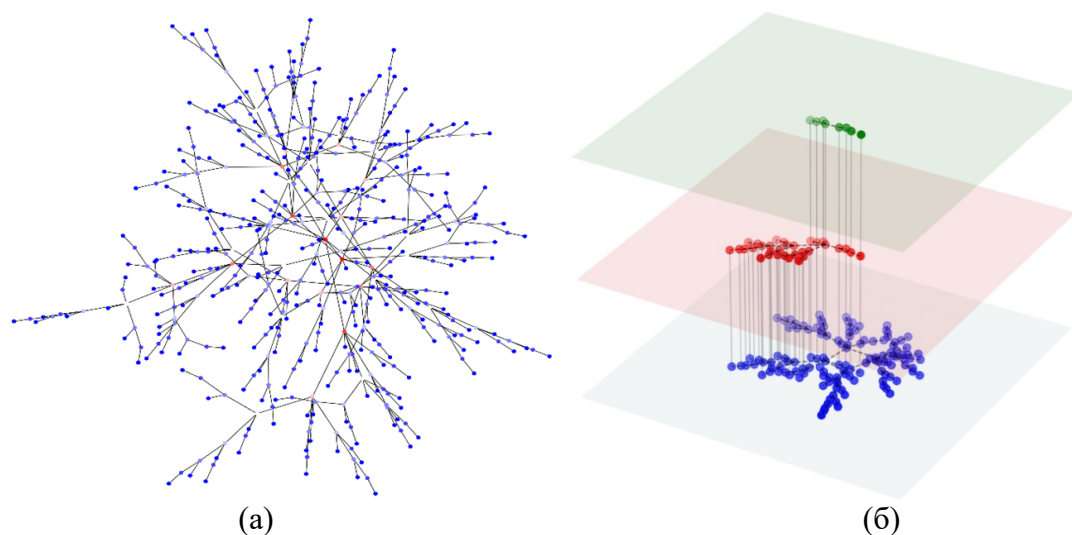
Влияние перечисленных факторов на работу системы может проявляться как в изменении структурно-функционального состояния ГСПД путем разрушения процессов информационного взаимодействия, так и целостности системы путем нарушения сетевого взаимодействия [231; 232].

Одним из путей снижения влияния данных факторов на работу СДСС НПМ БР является гибкое распределение ее ресурсов, предусматривающее выбор способа применения, объем и интенсивность использование элементов системы и многих других параметров, максимизирующих эффективность ее работы [233-235].

Поиск рациональной конфигурации предполагает анализ состояния системы по большому количеству параметров, в том числе и в режиме реального времени [236]. На рисунке 3.2 представлен текущий граф конфигурации иерархической СДСС НПМ БР телекоммуникационной сети [237] в условиях деструктивных воздействий. На первом уровне это выделенные каналы связи национального и региональных операторов связи с высокой пропускной способностью и надежностью, на втором – телекоммуникационные системы с едиными характеристиками, а на третьем – вторичные сети и сети абонентского доступа.

В связи с наличием беспроводных каналов связи (радиоканалы, сотовые и другие мобильные передвижные сети связи), в процессе

функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий меняется ее структура [238]. В этом случае применение аппарата динамических графов позволяет отражать структуру СДСС НПМ БР во времени.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3.2 – Графа конфигурации телекоммуникационной сети (а), представление графа конфигурации в виде иерархий системы (б)

Анализ характеристик сложных многоэлементных структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Одними из возможных характеристик, отражающих структурно-функциональное состояние системы, рассматриваются следующие [239-244].

1) Показатель связности узлов сети $K(G_L) = (\sum_{v \in V_L} k(v)) / |V_L|$ представляет собой средневзвешенный показатель порядка узлов $k(v)$. Порядок узла $k(v) = \deg v / |V_L|$, где $\deg v$ степень вершины $v \in V_L$, а $|V_L|$ – общее число вершин G_L и значения $k(v) \in [0; 1]$. Показатель $K(G_L) = 1$, когда все вершины смежные и граф полный. Другой крайний противоположный случай, если граф не связный и все вершины изолированные: $K(G_L) = 0$.

2) Показатель реберной связности $R(G_L) = \lambda(G_L) / |E_L|$, где число реберной связности $\lambda(G_L)$ определяется минимальным количеством

удаленных ребер, приводящих к нарушению связности графа, а $|E_L|$ – общее число ребер G_L . Показатель лежит на отрезке $R(G_L) \in (0; 1)$.

3) Диаметр графа $D(G_L)$ вычисляется как максимальная длина среди всех кратчайших цепей между двумя вершинами $u, v \in V_L$:

$$D(G_L) = \max_{u \in V} \max_{v \in V} d(u, v).$$

4) Показатель смежности подграфов $K(G_l)$, где G_l представляют собой кластеры, подграфы с ребрами одинакового ранга (затравки в терминологии специальных графов со свойствами самоподобия), иерархии в многоуровневых графах (системах) и т.д. Индекс l указывает на ранг (уровень) подграфа. Этот показатель формируется аналогично показателю связности узлов. Вначале проводится операция стягивания подграфов G_l графа G_L в вершины, полученный граф обозначается G_{L-1} , далее вычисляется порядок узла $k(v) = \frac{\deg v}{|V_{L-1}|}$, где $\deg v$ степень вершины $v \in V_{L-1}$, а $|V_{L-1}|$ – общее число вершин G_{L-1} и значения $k(v) \in [0; 1]$. $K(G_l) = K(G_{L-1}) = (\sum_{v \in V_{L-1}} k(v)) / |V_{L-1}|$.

5) Распределение степеней $P(k)$ определяется как доля вершин графа G_L со степенью k : $P(k) = n_k/n$, где n_k – количество вершин степени k , $n = |V_L|$ – общее количество вершин.

6) Общий показатель посредничества вершин графа $C(G_L) = (\sum_{v \in V_L} c(v)) / |V_L|$ представляет собой средневзвешенный показатель степени посредничества отдельных вершин $c(v) = \sum_{ij \in V_L} (d_{ij}(v) / d_{ij})$, где d_{ij} – общее количество кратчайших путей между вершинами i и j , $d_{ij}(v)$ – количество кратчайших путей, проходящих через вершину v . Нормализация показателя посредничества вершин графа осуществляется, как $\text{normal } C(G_L) = (\sum_{v \in V_L} \text{normal } c(v)) / |V_L|$, где $\text{normal } c(v) = \frac{c(v) - \min c}{\max c - \min c}$, $\text{normal } c(v) \in [0; 1]$.

7) Запас структурной надежности (ресурс по связям):

$$E(G_L) = \frac{|E|}{|V|-1} - 1.$$

В тоже время для систем, характеризующихся гетерогенностью и динамической структурой, известные показатели состояния оказываются недостаточными, что требует разработки комплексного показателя. Необходимо учитывать функциональные, структурные и в целом структурно-функциональные параметры состояния системы. Рассматриваются характеристики состояния СДСС НПМ БР трех видов, каждый из которых вносит вклад в понимание особенностей СДСС НПМ БР и определяет состав комплексного показателя.

1) Функциональная характеристика связана с техническими характеристиками отдельных элементов и подсистем системы мониторинга. Функциональные характеристики отражают способность этих компонентов выполнять свои задачи, такие как сбор, обработка и передача данных, при изменении условий эксплуатации. Например, надежность сенсора может быть выражена как вероятность безотказной работы в текущий момент времени. Для подсистемы функциональная характеристика представляется, например, пропускной способностью. Однако такие показатели не учитывают взаимосвязь элементов в сети и представляют собой в основном весовые значения элементов СДСС НПМ БР.

2) Структурная характеристика отражает способность системы сохранять структурно-топологические свойства графа СДСС НПМ БР $G = (V, E)$. Этот вид характеристики определяет состояние системы при разрывах связей или потере узлов, и связан с такими метриками, как связность и устойчивость к фрагментации. Например, показатель доли вершин в наибольшей связной компоненте. Однако такой показатель не отражает динамику изменений структуры или функциональные последствия утраты связности, что делает его недостаточно гибким для определения состояния СДСС НПМ БР с подвижными средствами мониторинга.

3) Структурно-функциональная характеристика объединяет функциональные и структурные аспекты в процессе изменения топологии СДСС НПМ БР и определяет их влияние на выполнение задач мониторинга. Например, потеря канала связи (структурное нарушение) может снизить

скорость доставки данных (функциональное нарушение). Структурно-функциональные характеристики могут быть представлены как сумма характеристик с весовыми коэффициентами. Однако такие характеристики остаются частными и не учитывают гетерогенность, иерархичность и динамику СДСС НПМ БР, что подчёркивает необходимость определения сложного комплексного показателя. Это особенно важно для повышения оперативности принятия решений о реконфигурации СДСС НПМ БР с сохранением ее структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий

Традиционные показатели [245] имеют ряд ограничений при применении к сложным многоэлементным СДСС, так как рассматривают отдельные аспекты систем. Функциональные характеристики сосредоточены на отдельных элементах или подсистемах, игнорируя их взаимосвязь в общей структуре сети. Например, сбой одного сенсора из состава средств мониторинга может быть компенсирован ретрансляцией через другой, но это не учитывается в показателе.

Структурные характеристики, например, перколяционный порог – оценивают топологию статически, не учитывая подвижность средств мониторинга, динамические изменения сети передачи данных или важность доставляемой информации. Комбинированные показатели часто используют упрощенные комбинации, которые не адаптированы к сложным многоэлементным иерархическим СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий и необходимостью оперативной реконфигурации для восстановления работоспособности в заданных пределах. Эти ограничения особенно критичны для СДСС НПМ БР, в частности ПРИСНМ, где внешние факторы (помехи, атаки) и внутренние (сбои оборудования) требуют комплексного подхода, учитывающего как устойчивость элементов, так и сети в целом.

В результате для снижения последствий возможных деструктивных воздействий, а также прогнозирования поведения СДСС НПМ БР необходим структурно-функциональный показатель эффективности информационного

взаимодействия средств в составе системы [245]. При этом для оперативного слежения за текущим состоянием показатель должен учитывать:

- 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.

Метрики структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий

На каждом этапе жизненного цикла СДСС НПМ БР, представленной графом конфигурации $G_{\text{конф}}$, её состояние отражается в текущих значениях *структурно-функциональных характеристик*. Следует определить взаимосвязь понятий – свойства, характеристики и метрики. Свойства зависят от абстрактной структуры и имеют более масштабное значение. Нередко свойства выражаются словесными формулировками: свойство самоподобия, свойства иерархичности и др. Характеристики – это свойства, которые могут быть выражены значениями или формулами. Характеристики представлены *числовыми* и *структурными* значениями. Например, числовые – число вершин или ребер, хроматическое число, степень вершины и другие, структурные – количество компонент связности, полнота графа и др. Характеристика может состоять из нескольких метрик, а под метриками понимаются конкретные численные значения выбранного графа. Характеристика может состоять из одной метрики, но не наоборот. Таким образом, имеется следующая соподчиненность от общего к частному: свойства – характеристики – метрики. Помимо признаков структурные или числовые используется признак – *функциональные*, означающий применение весов ребер или вершин в определении свойств, характеристик или метрик. Определение признака – структурный или функциональный не всегда представляется возможным, а также в какой степени он структурный или функциональный, также могут

быть смешанные признаки. Поэтому далее применяются сокращенные термины – свойство, характеристики, метрика, а в случае необходимости указывается их принадлежность с структурным, функциональным или числовым признакам.

Метрика обозначается через $m_i, i = 1, 2, \dots, n$. *Набор метрик* для графа конфигурации СДСС НПМ БР обозначается $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$. Функционирование СДСС НПМ БР в штатном режиме, то есть, выполнение задачи мониторинга в соответствии с заданным качеством означает выполнение требований к метрикам $\hat{M} = (\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_n)$: $m_1 \leq \hat{m}_1, m_2 \leq \hat{m}_2, \dots, m_n \leq \hat{m}_n$.

Требования или *набор требований* $\hat{M} = (\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_n)$ определяет допустимые значения для набора метрик $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ текущего графа конфигурации $G_{\text{конф}}$. Значения $\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_n$ считаются нормализованными относительно $m_1, m_2, \dots, m_n$ для выполнения неравенств $m_1 \leq \hat{m}_1, m_2 \leq \hat{m}_2, \dots, m_n \leq \hat{m}_n$.

В условиях деструктивных воздействий на СДСС НПМ БР меняются значения метрик $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$. Вне зависимости от вида воздействий значения $m_1, m_2, \dots, m_n$ могут уменьшаться или увеличиваться. В этом случае целесообразно рассматривать требования сверху и требования снизу – верхние допустимые значения $\hat{M} = (\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_n)$ и нижние допустимые значения $\check{M} = (\check{m}_1, \check{m}_2, \dots, \check{m}_n)$, или требования $\dot{M} = (\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_n)$, $\dot{M} = [\check{M}; \hat{M}] = ([\check{m}_1; \hat{m}_1], [\check{m}_2; \hat{m}_2], \dots, [\check{m}_n; \hat{m}_n])$. При этом неравенство $M \leq \dot{M}$ означает, что значения $m_i \leq \dot{m}_i$ лежат в заданных пределах на отрезке: $m_i \in [\check{m}_i; \hat{m}_i]$, $\dot{m}_i = [\check{m}_i; \hat{m}_i], i = 1, 2, \dots, n$.

Далее рассматриваются свойства устойчивости, целостности и надежности применительно к СДСС НПМ БР [246; 247].

Особенности функционирования СДСС НПМ БР показали, что её важнейшими характеристиками являются устойчивость, целостность и надежность, в том числе отдельно подсистем как составных частей.

Изменение графа конфигурации СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий, отражается на её характеристиках, в том числе на

устойчивости, целостности и надежности. Помимо указанных характеристик существует и другие характеристики, которые применяются в той или иной предметной области. Несмотря на то, что характеристики устойчивости, целостности и надежности в разных предметных областях имеют различия, являются общепринятыми и рассматриваются в настоящей работе в качестве *базовых*. При этом эти характеристики могут являться сложносоставными, состоящими из нескольких компонент – метрик.

В настоящей работе под *устойчивостью* понимается свойство СДСС НПМ БР, при котором воздействие $G_{\text{возд}}$ на граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ не нарушает условие $M_{\text{KB}} \leq \dot{M}$.

В целом свойство устойчивости отражает способность системы мониторинга выполнять задачу мониторинга в условиях деструктивных воздействий, ухудшающих характеристики $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$.

Под *целостностью* понимается свойство СДСС НПМ БР, при котором воздействие $G_{\text{возд}}$ на граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ не нарушает доступность элементов системы в заданных требованиях $M_{\text{KB}} \leq \dot{M}$.

Свойство целостности отражает сохранение беспрепятственного доступа к средствам мониторинга в условиях деструктивных воздействий при заданных требованиях. Если свойство устойчивости отвечает за качество мониторинга и сохранение характеристик в заданных пределах, то свойство целостности отвечает за работоспособность подсистемы связи – сети информационного обмена между средствами мониторинга.

Под *надежностью* понимается свойство СДСС НПМ БР, при котором последовательность воздействий $G_{\text{возд}}^t, G_{\text{возд}}^{t+1}, \dots, G_{\text{возд}}^T$ на граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ не превышает заданные требования $M_{\text{KB}} \leq \dot{M}$ для каждого $G_{\text{KB}}^t, G_{\text{KB}}^{t+1}, \dots, G_{\text{KB}}^T$.

В данном случае понимается последовательное воздействие на текущий граф конфигурации: $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{возд}}^{t+1} \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+2} | G_{\text{возд}}^{t+2} \rightarrow \dots \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+T}$ без операций управляющего воздействия.

Операции управляющего воздействия необходимы для восстановления характеристик в пределах заданных требований $\dot{M}$. В общем случае последовательность имеет вид (3.1):

$$G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{возд}}^{t+1} \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+2} | G_{\text{возд}}^{t+2} \xrightarrow{\text{УВ}} \dots \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+T}, \quad (3.1)$$

где $\xrightarrow{\text{УВ}}$ это управляющее воздействие в виде операции $G_{\text{КВ}}^t | G_{\text{УВ}}^t = G_{\text{конф}}^{t+1}$.

Свойство надежности отражает способность системы сохранять во времени структурно-функциональные характеристики в установленных пределах.

Для каждого из свойств возможно задать свой набор характеристик или метрик M из множества $\{M\}$ и соответствующих требований $\dot{M} \in \{\dot{M}\}$. Отдельной задачей оптимизации является подбор такого набора метрик $M \in \{M\}$ и требований $\dot{M} \in \{\dot{M}\}$, которые одновременно отражали бы свойства устойчивости, целостности и надежности СДСС НПМ БР.

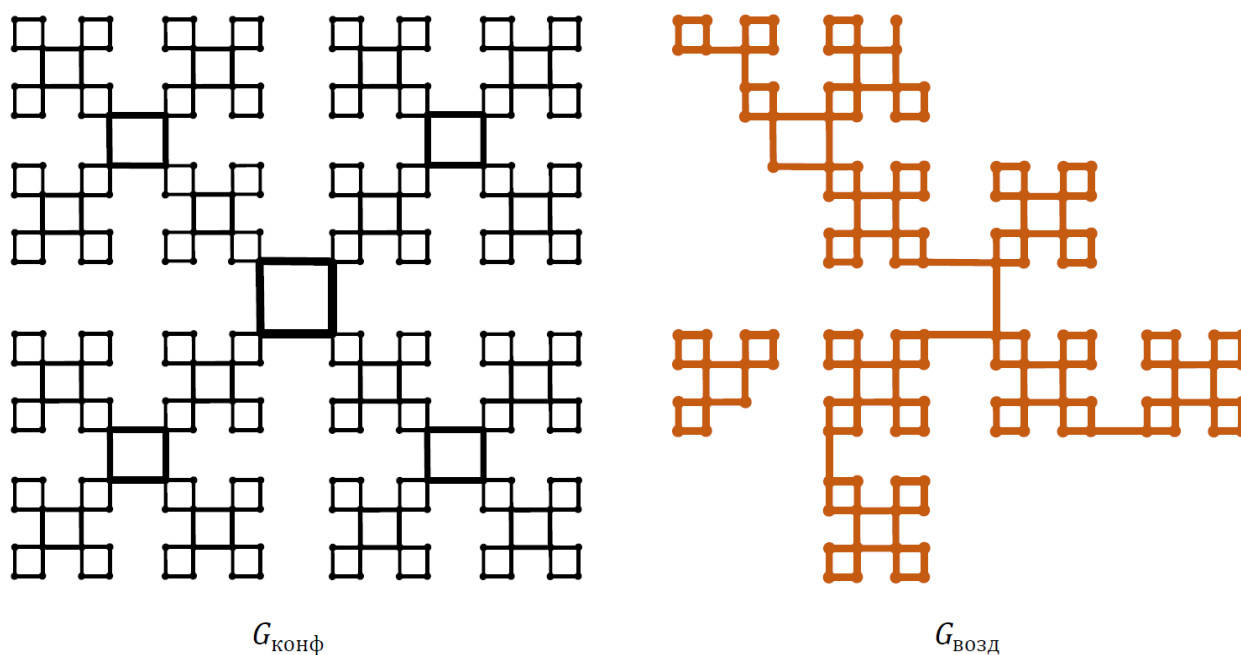
Таким свойством является живучесть системы, которое определяет способность системы функционировать с заданными параметрами в условиях деструктивных воздействий. Свойство *живучести* представляет собой совокупность свойств устойчивости, целостности и надежности СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий. Анализ и оценка живучести в составе сложно-структурированных изменяющихся во времени распределенных систем осуществляется посредством динамических графовых структур [248].

Механизм осуществления воздействий структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Представленная ранее теоретико-графовая модель СДСС НПМ БР направлена на обеспечение требуемого качества мониторинга для выполнения задачи мониторинга в условиях деструктивных воздействий посредством сохранения значений устойчивости, целостности, надежности и в целом живучести в заданных пределах. Для выполнения задачи мониторинга

требуется комплексная оценка состояния СДСС НПМ БР посредством единого комплексного показателя.

Граф воздействий $G_{\text{возд}}$ является каким-либо подграфом графа текущей конфигурации: $G_{\text{возд}} \subseteq G_{\text{конф}}$. На рисунке 3.3 представлен граф текущей конфигурации $G_{\text{конф}} = G_4$ и граф воздействия $G_{\text{возд}} \subseteq G_4$.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3.3 – Граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ и граф воздействия $G_{\text{возд}}$

Так как граф $G_{\text{возд}}$ является подграфом $G_{\text{конф}}$, то значения применяемых метрик в текущий момент могут коррелировать или иметь одинаковые значения. Открытым для анализа остается вопрос применения указанной особенности при прогнозировании поведения комплексного показателя до или в процессе деструктивного воздействия при условии распознавания $G_{\text{возд}}$. Например, распознавание $G_{\text{возд}}$ с выраженным воздействием на кратный центр $G_{\text{конф}}$, может быть полезно для принятия управленческих решений – управляющих воздействий.

Граф G_4 представляет собой предфрактальный граф, порожденный затравкой $H = (W, Q)$, $|W| = n = 4$, $|Q| = q = 4$. Смежность старых ребер одинакового ранга сохраняется, при этом смежность ребер разного ранга произвольная, а в текущей конфигурации старые ребре разного ранга не

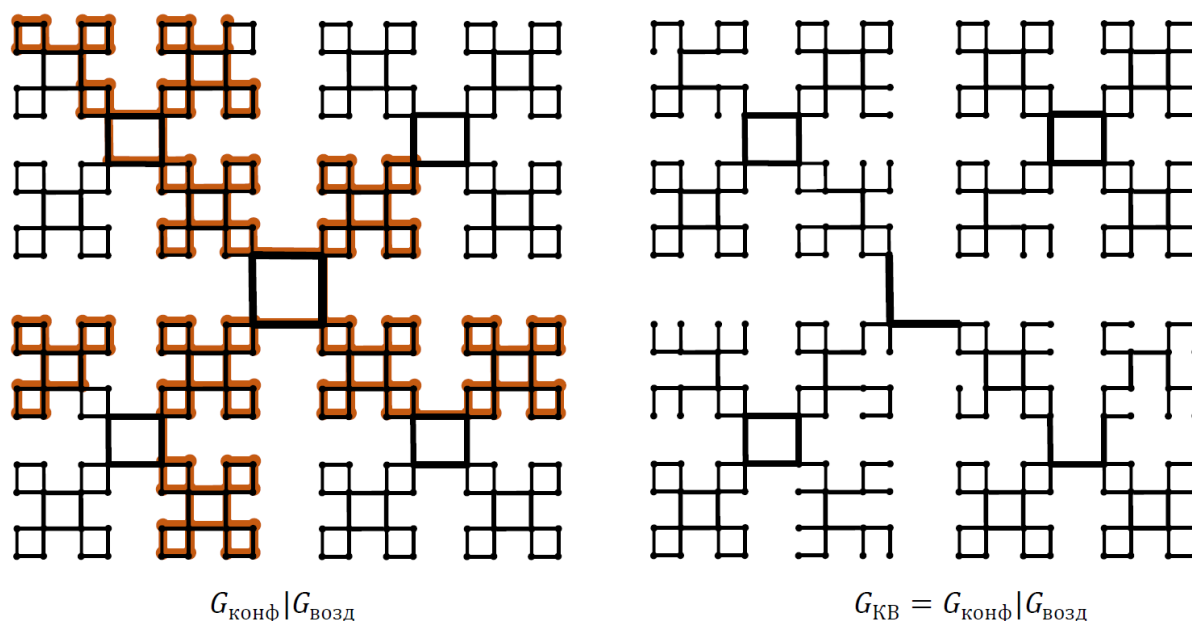
пересекаются. Это говорит о наличии кратного центра, вершины которого инциденты ребрам первого и отдельно второго рангов. Рассмотрим частный случай метрик $M = (m_1, m_2)$ для текущего графа конфигурации $G_{\text{конф}} = G_4$, где m_1 – количество вершин кратного центра, инцидентных ребрам первого ранга и второго ранга; m_2 – количество компоненты связности. Для текущей конфигурации заданы требования сверху $\hat{M} = (\hat{m}_1 = 5, \hat{m}_2 = 1)$. Так как количество вершин и компонент не может быть отрицательным, требования снизу $\check{M} = (\check{m}_1 = 0, \check{m}_2 = 0)$, тогда требования $\dot{M} = [\check{M}; \hat{M}] = ([\check{m}_1; \hat{m}_1] = [0; 5], [\check{m}_2; \hat{m}_2] = [0; 1])$: $0 \leq m_1 \leq 5$ и $0 \leq m_2 \leq 1$. Применение графа воздействия $G_{\text{возд}} \subseteq G_4$ ухудшает характеристики текущей конфигурации.

Для принятия решений по реконфигурированию в условиях деструктивных воздействий необходим комплексный показатель, отражающий в совокупности состояние СДСС НПМ БР. Комплексный показатель формируется под требования текущей СДСС НПМ БР и других условий.

На рисунке 3.4 представлены результаты воздействия $G_{\text{возд}}$ на граф конфигурации $G_{\text{конф}}$: $G_{\text{КВ}} = G_{\text{конф}} | G_{\text{возд}}$. Следует отметить, что воздействия $G_{\text{возд}}$ привели к разделению графа $G_{\text{КВ}}$ на две несвязные компоненты. Таким образом воздействия имели характер как функционального воздействия – снижение весовых характеристик графа $G_{\text{конф}}$, так и структурного воздействия – удаление ребер (снижение веса ребер до нуля), что привело к структурному разрушению в смысле связности графа конфигурации.

Для графа, подвергнувшемуся воздействию, $G_{\text{КВ}}$ получены следующие характеристики $M_{\text{КВ}} = (5; 2)$. Значение $m_1 = 5$ осталось в пределах требований $[0; 5]$, а значение $m_2 = 2$ вышло за пределы требований $[0; 1]$. В данном случае нарушена структурная целостность графа, вершины из одной компоненты не доступны вершинам другой компоненты, что в целом влияет на живучесть системы.

Граф воздействий может быть не связным и состоять из множества компонент связности. Напротив, граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ для функционирования в штатном режиме должен быть связным.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3.4 – Результаты $G_{\text{КВ}} = G_{\text{конф}} | G_{\text{возд}}$ воздействия на граф конфигурации

Для восстановления целостности графа необходимо применить управляющие воздействия, которые позволят восстановить связность графа конфигурации. Полученный ущерб может говорить о деструктивных воздействиях искусственного характера, так как были снижены весовые характеристики каналов связи, что привело к разделению графа на несвязные компоненты. При этом на средства мониторинга (узлы графа) СДСС НПМ БР не было оказано воздействие, они не получили ущерба и продолжают функционировать.

В условиях деструктивных воздействий системе наносится *структурно-функциональный ущерб* (далее сокращенно – *ущерб*). Нанесение ущерба приводит к ухудшению характеристик системы и в целом к снижению ее живучести.

Далее в главе о реконфигурации СДСС НПМ БР описываются последствия получения ущерба – снижения живучести системы, накоплении данных мониторинга в несвязных компонентах, времени восстановления штатного функционирования и безвозвратные потери элементов или подсистем. Также предлагается методика классификации деструктивных воздействий в смысле их естественного или искусственного происхождения и их влияние на живучесть системы.

Ущерб от воздействия $G_{\text{возд}}$ на граф $G_{\text{конф}}$ выражается в ухудшении характеристик текущего графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ и в разнице метрик графа, подвергнувшемуся воздействию $G_{\text{КВ}}$, в виде (3.2):

$$M_{\text{ущ}} = M_{\text{конф}} - M_{\text{КВ}}, \quad (3.2)$$

где $M_{\text{конф}} = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ – значения метрик текущей конфигурации;
 $M_{\text{КВ}}$ – значения метрик в результате получения ущерба.

Значения элементов $M_{\text{ущ}}$ могут быть отрицательными, что говорит об увеличении значений соответствующих метрик, которое может вывести значения за пределы требований $\dot{M}$ в сторону их увеличения.

Ущерб считается *допустимым*, если $M_{\text{КВ}} \leq \dot{M}$, то есть значение каждой метрики не вышло за пределы допустимого $m_i \leq \dot{m}_i$: $m_1 \in [\check{m}_1; \hat{m}_1]$, $m_2 \in [\check{m}_2; \hat{m}_2]$, ..., $m_n \in [\check{m}_n; \hat{m}_n]$. Ущерб в целом влияет на свойство живучести системы. При допустимом ущербе свойство живучести сохраняется.

Граф воздействия $G_{\text{возд}}$, приводящий к допустимому ущербу $M_{\text{КВ}} \leq \dot{M}$, называется графом *допустимого воздействия* $G_{\text{ДВ}}$. Всевозможные графы воздействий $G_{\text{возд}}$, приводящие к допустимому ущербу $M_{\text{КВ}} \leq \dot{M}$, составляют *множество допустимых воздействий* $\{G_{\text{ДВ}}\}$, $G_{\text{ДВ}} \subseteq G_{\text{возд}} \subseteq G_{\text{конф}}$.

Одной из задач оптимального реконфигурирования СДСС является выделение множества допустимых воздействий $\{G_{\text{ДВ}}\}$ на граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ для определения всевозможных $G_{\text{КВ}}$, удовлетворяющих условию $M_{\text{КВ}} \leq \dot{M}$.

Следует отметить, что в случае деструктивного воздействия на граф конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ в момент времени t , граф переходит к конфигурации $G_{\text{КВ}}^t$: $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t = G_{\text{КВ}}^t$. После управляющего воздействия $G_{\text{УВ}}^t$ текущий граф конфигурации $G_{\text{конф}}^{t+1}$ в момент времени $t + 1$ может отличаться от предыдущего $G_{\text{конф}}^t \neq G_{\text{конф}}^{t+1}$, что означает структурно-функциональное

различие – в смысле изоморфизма взвешенного (в том числе ориентированного) графа. В таком случае множество допустимых воздействий $\{G_{\text{ДВ}}^t\}$ меняется вместе с графом конфигурации $G_{\text{конф}}^{t+1}$ и составляет новое множество $\{G_{\text{ДВ}}^{t+1}\}$. Вопрос сравнения множеств $\{G_{\text{ДВ}}^t\}$ и $\{G_{\text{ДВ}}^{t+1}\}$ требует дополнительного анализа. Вместе с тем при решении конкретной задачи возможно применять меру сходства $G_{\text{конф}}^t$ и $G_{\text{конф}}^{t+1}$ для определения $G_{\text{КВ}}^{t+1}$.

В противоположность допустимому ущербу, в случае ухудшения хотя бы одной метрики $M_{\text{КВ}} \not\leq \dot{M}$, то есть какой-либо $m_i^* \not\leq \dot{m}_i$: $m_i^* \notin [\tilde{m}_i; \hat{m}_i]$, тогда система получает *существенный ущерб*. Существенный ущерб, полученный системой, снижает ее живучесть и составные свойства – устойчивости, целостности и надежности.

Для понимания механизма получения ущерба рассматривается графы воздействий, соответствующие существенному ущербу. Граф воздействия $G_{\text{возд}}$, приводящий к существенному ущербу $M_{\text{КВ}} \not\leq \dot{M}$, называется графом *существенного воздействия* $G_{\text{СВ}}$. Всевозможные графы воздействий $G_{\text{возд}}$, приводящие к существенному ущербу $M_{\text{КВ}} \not\leq \dot{M}$, составляют множество существенных воздействий $\{G_{\text{СВ}}\}$, $G_{\text{СВ}} \subseteq G_{\text{возд}} \subseteq G_{\text{конф}}$. Отметим, что не применяются графы воздействий, превосходящие граф конфигурации, а рассматриваются максимально возможные графы с аналогичным ущербом. Применение графов воздействий, превосходящих граф конфигурации – соответствует случаю применения максимально возможного графа воздействия.

При получении допустимого ущерба, система мониторинга продолжает работать в штатном режиме и выполняет задачу мониторинга. При получении существенного ущерба в системе снижается качество мониторинга, возможно прекращение выполнения задачи мониторинга и требуются управляющие воздействия для восстановления характеристик, в частности метрик, в пределах допустимых значений.

На рисунке 3.4 ущерб составил $M_{\text{ущ}} = (5 - 5; 1 - 2) = (0; -1)$. Так как $M_{\text{КВ}} \not\leq \dot{M}$, то получен существенный ущерб и требуется применение управляющего воздействия для возврата метрик в пределы требований $\dot{M}$.

Таким образом для оценки текущего состояния СДСС НПМ БР и возможности ее реконфигурирования требуются анализировать характеристики графа конфигурации, в частности такого составного показателя как живучесть.

3.2 Формирование агрегированного топологического индекса структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Далее приводится обоснование и определение комплексного показателя, отражающего основные требования оперативного управления и контроля структурно-функционального состояния СДСС НПМ БР.

Одним из важнейших элементов «теории оптимального управления» является разработка высокоэффективных и качественных метрик. В связи с этим необходимо совершенствование научно-методического аппарата, направленного на решение задач по повышению эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети СДСС НПМ БР за счет синтеза комплексного показателя оперативного управления и контроля живучести.

Для понимания текущего состояния и происходящих изменений в СДСС НПМ БР, а также оперативного управления необходимо отслеживать изменения базовых параметров – устойчивости, целостности и надежности. По сути они являются *свойствами* СДСС НПМ БР и каждое из них может состоять, как сказано выше из метрик. Для описания этих свойств или конкретнее характеристик, отражающих состояние СДСС НПМ БР, в едином представлении целесообразно использовать комплексный показатель. Комплексный показатель позволит формировать состав с весовыми коэффициентами важности характеристик и при необходимости динамически менять как состав, так и весовые значения – составляя новую *компоновку*.

Таким образом, состояние СДСС НПМ БР описывается набором ее характеристик и метрик. В этом смысле необходимо описание механизма

формирования набора метрик. Комплексный показатель в свою очередь формируется или по-другому *компонуется* из элементов пространства всевозможных метрик и отражает текущее состояние СДСС НПМ БР. Следует отметить, что необходимо разработать также саму процедуру компоновки комплексного показателя, для возможности его изменения и адаптации в условиях деструктивных воздействий. В том числе необходимо описать допустимые компоновки показателя из пространства всевозможных метрик. В зависимости от условий, в которых функционирует СДСС НПМ БР, меняется весовой коэффициент метрик – *вес* метрики в текущей компоновке. Для конкретной СДСС НПМ БР формируется пространство метрик, на основе которого составляется набор метрик.

Оценка комплексных параметров или в частности – свойства живучести СДСС НПМ БР, таких как ПРИСНМ, является ключевым этапом для обеспечения их эффективного функционирования в условиях деструктивных воздействий посредством дальнейшего реконфигурирования. Свойство живучести отражает способность системы сохранять возложенные на нее функции при внешних и внутренних воздействиях.

Свойство живучести, представленное комплексным показателем, на основе свойств устойчивости, целостности и надежности, позволяет охватить ключевые характеристики состояния СДСС НПМ БР. В качестве такого комплексного показателя, учитывающего разносторонние характеристики, предлагается агрегированный топологический индекс (АТИ), реализующий в себе основные требования оперативного управления и контроля живучести СДСС НПМ БР.

Таким образом АТИ составляется из структурно-функциональных метрик, сведенных в единое нормированное пространство, и отражает текущее состояние СДСС НПМ БР. Изменения в соответствии с текущей обстановкой отражаются, как в составляющих метриках, так и в целом в самом АТИ. АТИ непрерывно сообщает о статусе СДСС НПМ БР – о состоянии в пределах требований. В случае отклонения значений АТИ от требуемых по его составным метрикам выявляется в какой части произошло отклонение.

Рассматривается как равномерное отклонение всех составляющих или значительное отклонение одной или нескольких метрик АТИ.

Задача мониторинга СДСС НПМ БР усложняется во времени, как с точки зрения изменения структуры связей, так и наполнения узлов и каналов связи. В этом смысле теоретико-графовая модель может использовать инструментарий больших динамических графов с иерархической структурой. Иерархичность позволяет учитывать важность рангов (уровней) системы, а размерность графа (большой граф) – значительное количество узлов и связей между ними. Теоретико-графовая модель позволяет представить формализованное представление структурного положения СДСС НПМ БР во времени, а АТИ и его метрики отражает структурное состояние в заданный момент времени. Однако, для синтеза рациональных количественных и качественных конфигураций СДСС НПМ БР необходима разработка алгоритмов оптимизации, направленных на улучшение структурно-функционального состояния в условиях деструктивных воздействий различной интенсивности.

В процессе функционирования СДСС НПМ БР на нее постоянно оказываются деструктивные воздействия, меняющие свои структурные представления – графы воздействий. Для динамического АТИ необходимо рассчитывать значения на каждый момент времени. В целях снижения времени (вычислительной сложности) используются специальные свойства, присущие большим иерархическим сетям со специальными свойствами [249; 250]. Задача вычисления m_i выполняется не на всей сети СДСС НПМ БР, а разделяется на подсети (подграфы), и далее результаты объединяются на верхней иерархии (уровне). Такой подход позволяет снижать вычислительную сложность для ряда метрик на порядок. В частности, составляющие АТИ могут учитывать уровни и характеристики подграфов. Свойства иерархичности позволяет разделять вычисление АТИ в том числе в смысле параллельного вычисления для ускорения расчетов. Число разбиения структуры связей на иерархии, по сути отражает коэффициент ускорения расчетов АТИ в иерархическом графе.

Для оперативного управления состоянием СДСС НПМ БР – АТИ должен состоять из набора структурно-функциональных метрик m_i , и ее линейной свертки. В случае нелинейной свертки появляются дополнительные требования к вычислительным ресурсам, а также накопление искажений в процессе итерационных расчетов. Также в случае решения оптимизационной задачи – указанные метрики выступают в виде критериев оптимизации. Рассмотрение нелинейной свертки заслуживает отдельного анализа и дополнительного исследования [251].

Для каждой составляющей метрики задается уровень важности $a_i \in [0; 1]$: $ATI = a_1 m_1 + a_2 m_2 + \dots + a_k m_k$. Приближение значений АТИ к нижнему значению отрезка $(0; 1)$ говорит о снижении структурно-функциональной живучести, а достижение $ATI = 0$ о его фактически структурном разрушении. Значение $ATI = 1$ соответствует «идеальному» состоянию с высоким уровнем структурно-функциональных характеристик, в том числе живучестью. При этом, так как сеть СДСС НПМ БР является адаптивной (динамический граф), то во времени меняется и топологический индекс $ATI_t = a_1 m_{1t} + a_2 m_{2t} + \dots + a_k m_{kt}$. Индекс ATI_t является инструментом управления структурно-функциональными характеристиками сети в момент времени t , в случае управления составляющими $a_i m_{it}$. Если же фиксировать значения $a_i m_{it}$, то ATI_t выступает в качестве инструмента анализа состояния (поведения) сети во времени.

Далее вне зависимости от рассматриваемых метрик, в качестве m_i принимаются нормализованные значения приведенные к шкале $[0; 1]$, где значение «1» означает наилучшее значение для текущей конфигурации, а «0» – наихудшее значение. А оригинальные не нормализованные значения метрик обозначаются $\tilde{m}_i$, а значения $m_i = [0; 1]$. Нормализация метрик также может проводится относительно области их всевозможных значений, о чем оговаривается отдельно. Например, для метрики $\tilde{m}$ – количество связанных компонент текущего графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ всевозможные значения находятся на области $[0; N]$, где N – количество вершин $|G_{\text{конф}}| = N$, а

значение 0 соответствует графу без вершин и ребер: $|V_{\text{конф}}| = 0$, $|E_{\text{конф}}| = 0$. Тогда для $\dot{m} = [0; 1]$, $m = 1$ – означает наличие N компонент связности текущего графа.

В режиме реального времени анализ все составляющих метрик m_i для лица, принимающего решение, затруднителен. Кроме этого, задача мониторинга СДСС НПМ БР усложняется во времени, как с точки зрения изменения структуры связей, так и наполнения узлов и каналов связи. В частности, так как структура СДСС НПМ БР является адаптивной (динамический граф), то во времени меняется и $АТІ_t = a_1 m_{1t} + a_2 m_{2t} + \dots + a_k m_{kt}$, а его составляющие могут учитывать уровни и характеристики подграфов (подсистем), например, коэффициенты смежности подграфов $K(G_l)$. В таком случае, показатель $АТІ_t$ является инструментом управления структурно-топологическими характеристиками сети в момент времени t , а также управления ее составляющими $a_i m_{it}$ (3.3):

$$АТІ_t = \sum_{i=1}^n a_i m_{it}, \quad (3.3)$$

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

m_{it} – метрика сети в момент времени t .

Изучая каждую из метрик m_i и применяя к анализу СДСС НПМ БР предложенный набор АТИ, необходимо оценить механизм информационного взаимодействия между средствами мониторинга, как с точки зрения структуры и ее качества, так и с точки зрения характера информационного обмена во времени.

Следует отметить, что отдельной задачей является оптимизация времени вычисления АТИ. Время расчета АТИ равно сумме расчетов его составляющих компонент m_i . Но применение алгоритмических возможностей теоретико-графовой модели СДСС НПМ БР позволяет значительно ускорить расчет как отдельных метрик, так и самого АТИ. Для динамического $АТІ_t$ необходимо рассчитывать значения на каждый момент времени t . В целях

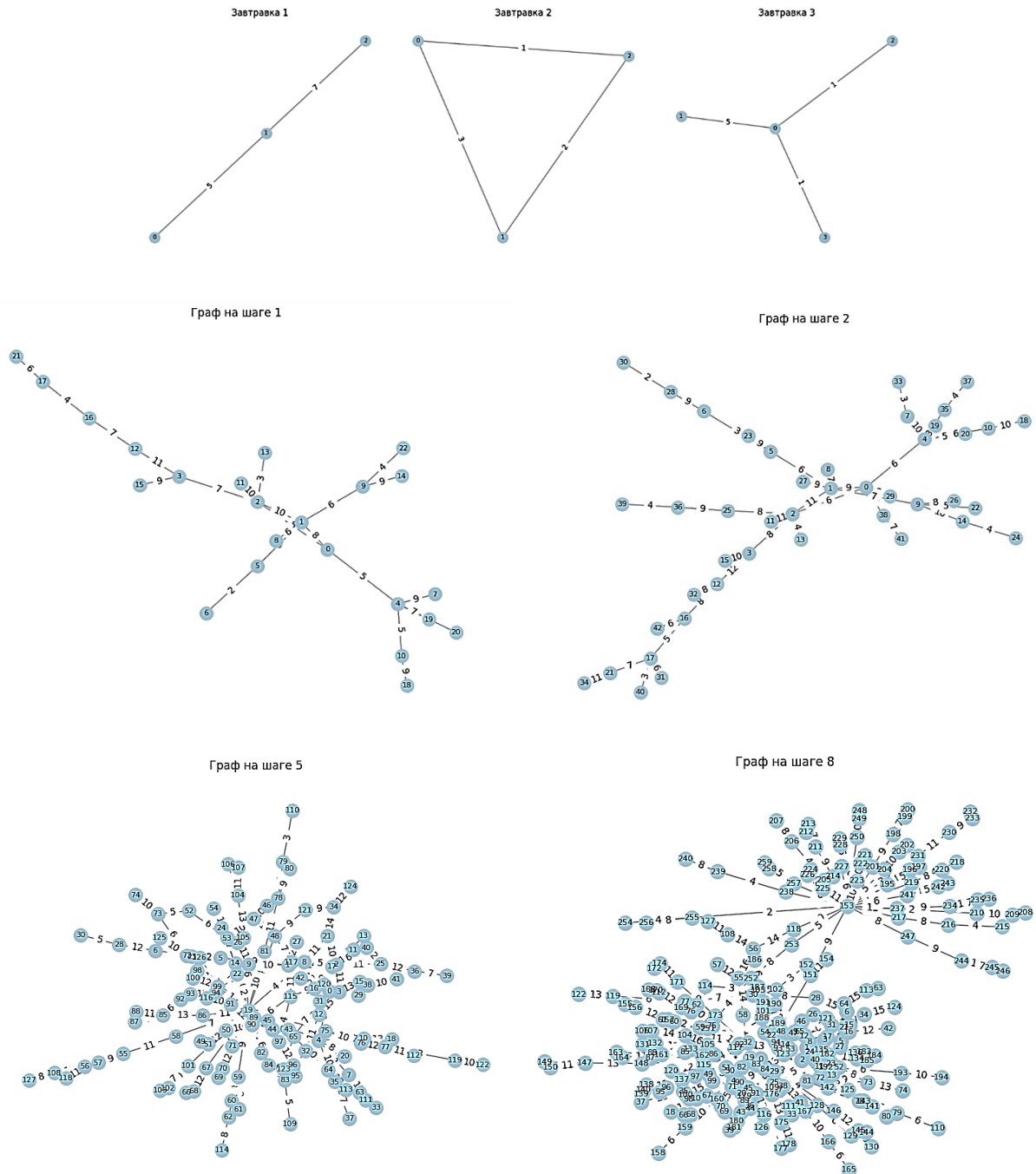
снижения времени (вычислительной сложности) используются специальные свойства, присущие большим иерархическим сетям. Задача вычисления m_i выполняется не на всей СДСС НПМ БР, а разделяется на подсети (подграфы), и далее результаты объединяются на верхней иерархии (уровне). Такой подход позволяет снижать вычислительную сложность для ряда метрик на порядок.

Если же фиксировать значения $a_i m_{it}$ в конкретные моменты времени t , то ATI_t выступает в качестве инструмента анализа состояния сети СДСС НПМ БР в момент времени t . В качестве составляющих m_i , включенных в АТИ, могут выступать различные характеристики сети, такие как число центров и медиан, коэффициент кластеризации, количество кратчайших путей, плотность графа и многие др. Качественная компоновка АТИ представляет отражение тех или иных обобщенных характеристик СДСС НПМ БР. В этом случае для формального отличия *компоновок* АТИ дополнительно вводится верхний индекс k в виде ATI_t^k .

В качестве примера, демонстрирующего эффективность АТИ для оценки структурно-функциональной живучести СДСС НПМ БР, рассмотрим траекторию динамического графа G_L , где каждый последующий граф отличается от предыдущего набором однотипных операций, при этом порождаемые графы являются связными. На рисунке 3.5 в виде минимальных подграфов (затравок) представлены графы – 3-вершинная цепь, треугольник и 4-вершинная звезда, и динамический граф на некоторых этапах порождения. Для операций роста графа использованы операции: добавление новых вершин; добавление новых рёбер; замена вершины затравкой.

На каждом шаге производилось 20 однотипных операций для обеспечения значительных изменений структуры. Ребра каждого графа имели случайно назначенные веса в диапазоне от 1 до 10. При добавлении новых ребер вес устанавливался случайным образом.

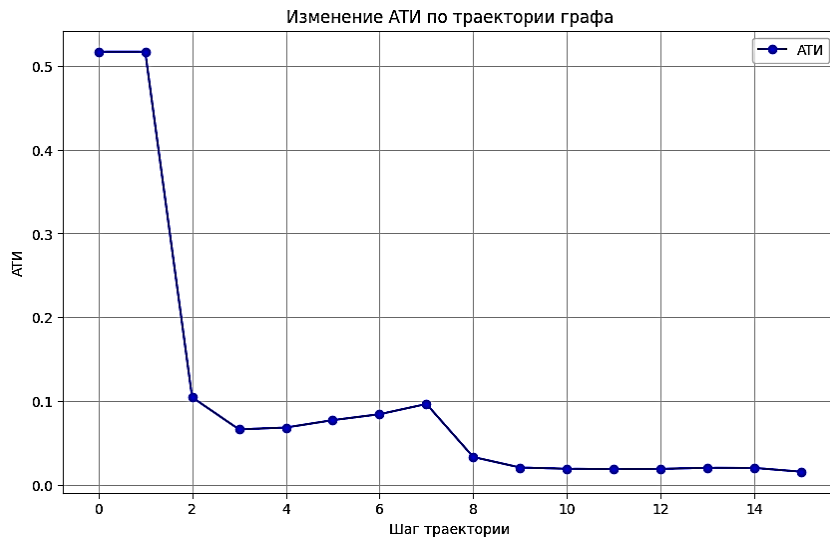
На рисунке 3.6 для каждого графа G_L в траектории $L = 1, 2, \dots, 16$ рассчитан АТИ с различными весовыми коэффициентами.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3.5 – Граф-затравки и траектория динамического графа G_L

В качестве метрик использованы показатель связности узлов и ребер графа, смежности его подграфов, а также распределение степеней вершин и их посредничество. Исходя из графика видно, что значение АТИ снижается по мере перехода между итерациями порождения графа, при этом изменение весовых коэффициентов не приводит к изменению данной тенденции, что позволяет определять наиболее значащие метрики, влияющие на структуру ССДС НПМ БР.



(a)

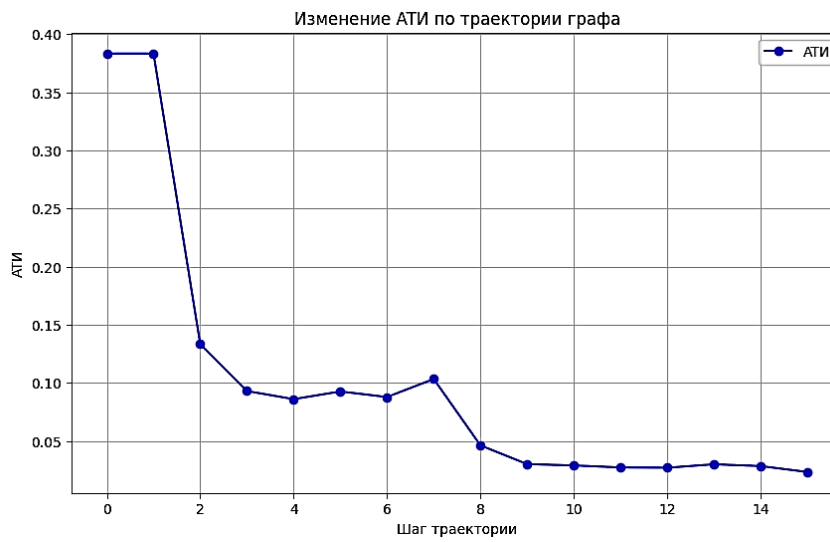
$$w_1 = 0,4,$$

$$w_2 = 0,1,$$

$$w_3 = 0,1,$$

$$w_4 = 0,1,$$

$$w_5 = 0,3$$



(б)

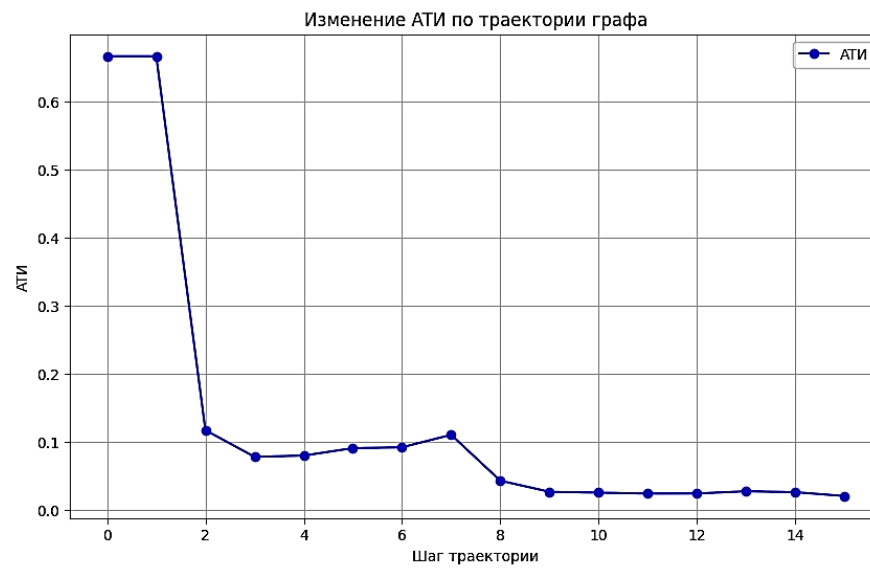
$$w_1 = 0,1,$$

$$w_2 = 0,1,$$

$$w_3 = 0,1,$$

$$w_4 = 0,3,$$

$$w_5 = 0,4$$



(в)

$$w_1 = 0,1,$$

$$w_2 = 0,3,$$

$$w_3 = 0,2,$$

$$w_4 = 0,3,$$

$$w_5 = 0,1$$

Источник: составлено автором.

Рисунок 3.6 – Изменение АТИ в траектории динамического графа, сохраняющему тенденцию вне зависимости от весов

Таким образом, практическое применение АТИ включает мониторинг СДСС НПМ БР, оценку ее эффективности и выявление точек отказа. Использование специальных графов со свойствами самоподобия, иерархичности и другие для расчета АТИ улучшает точность анализа, создавая основу для оптимизации больших динамических сетей.

Связь агрегированного топологического индекса с многокритериальной оптимизацией на графах

Вычисление значения АТИ в момент времени t отражает оценку состоянию СДСС НПМ БР в момент времени t . С другой стороны, АТИ позволяет интегрировать результаты многокритериальных задач в единый показатель, облегчающий принятие управленческих решений.

С точки зрения оптимизационной задачи – выбора составных частей АТИ, вычисление метрик соответствует поиску оптимальных значений критериев многокритериальной задачи. Записи вида $ATI = a_1 m_1 + a_2 m_2 + \dots + a_n m_n$ 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 $a_i m_i$. Задачу поиска значения АТИ можно представить в виде (3.4):

$$ATI = \sum_{i=1}^n a_i f_i(G), \quad (3.4)$$

где значения функции $f_i(G)$ – соответствуют метрикам m_i графа G .

Так как a_i – численные значения, представляющие собой постоянные в фиксированный момент времени, то опускаем их в критериях $F_i(x)$ без дополнительных обозначений (3.5):

$$ATI_t | F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_n(x)), \quad (3.5)$$

в которой критерии соответствуют метрикам (3.6-3.7):

$$\text{обр.норм } m_i: F_i(x) = op[\omega_i(e)] \rightarrow extr, i = 1, 2 \dots M, \quad (3.6)$$

$$\text{обр.норм } m_i: F_i(x) = op[\psi_i(v, e)] \rightarrow extr, i = M + 1, M + 2, \dots, M + T, \quad (3.7)$$

где op – операция над функциями вида max , min , sum , определяющая метрику m_i .

Для критериев $F_i(x)$ указаны обратно-нормированные метрики m_i , это значит, что для вычисления АТИ используются нормированные значения $F_i(x)$: $ATI = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \text{норм} F_i(x)$, то есть $m_i = \text{норм} F_i(x)$.

Для принятия решений, в том числе оптимального реконfigurирования СДСС НПМ БР применение единого АТИ предпочтительнее оценки множественных составляющих его метрик.

Также как и для общей постановки многокритериальной задачи критерии $F_i(x)$, $i = \overline{1, M}$ называем *числовыми (функциональными)* критериями и являющимися функциями от весовых характеристик, а критерии $F_i(x)$, $i = \overline{M+1, M+T}$ – *топологическими (структурно-топологическими)*, построенными на основе топологических (структурных) характеристик графа. А вместе все представленные критерии – структурно-функциональными критериями, отражающими значения структурно-функциональных метрик m_i .

Таким образом, вычисление АТИ в момент времени t отождествляется с оптимизацией многокритериальной функции $F(x)$ или решением задачи: $ATI_t | F(x)$ [252]. Значение АТИ в начальный момент времени соответствует записи $ATI_{t=0} | F(x)$. Чтобы не перегружать дополнительными обозначениями $ATI_t | F_t(x)$, обозначение t для функции $F_t(x)$ опускается: $ATI_t | F(x)$. В случае необходимости обозначение t вводится, о чем оговаривается заранее.

Для эффективного использования АТИ проводится его параметризация, то есть анализ его допустимых значений, зависимость составляющих метрик и др. [253]. АТИ представляет собой сложной инструмент – который необходимо настраивать для конкретной системы, оптимизировать состав и количество метрик, понимать изменения его состояний, что взаимосвязано напрямую с состоянием СДСС.

Параметризация агрегированного топологического индекса в задачах оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

В отличие от вычисления текущих значений АТИ в конкретные моменты времени ATI_t , отдельной сложной задачей является его оптимизация [254] (3.8):

$$ATI = f(G) = \sum_{i=1}^n a_i f_i(G) \rightarrow opt. \quad (3.8)$$

В зависимости от состава и назначения АТИ можно говорить о следующих видах его оптимизации:

максимизация $ATI \rightarrow 1$;

минимизация $ATI \rightarrow 0$;

стабилизация $ATI \rightarrow 0,5$.

Направление оптимизации зависит от целевой постановки оператора или лица, принимающего решение. Например, необходимо усилить живучесть системы в периоды деструктивных воздействий или ослабить характеристики для проведения тестирования и настройки СДСС НПМ БР посредством АТИ.

Если в состав АТИ включены метрики, связанные с устойчивостью, целостностью, связностью, то он максимизируется. Если в состав включены метрики, связанные со снижением распространения деструктивных операций, то АТИ минимизируется. При сбалансированном составе АТИ необходимо стабилизировать его значение.

Процесс оптимизации АТИ непосредственно связан с процессом реконфигурирования СДСС НПМ БР, то есть с динамическим изменением его структуры, представленным в виде траектории динамического графа. Посредством серии последовательных управляющих воздействий на граф конфигурации – система реконфигурируется для оптимизации АТИ, проводя его настройку.

Задача $ATI = \sum_{i=1}^n a_i f_i(G) \rightarrow opt$ представляет собой подбор таких значений $f_i(G)$, при которых АТИ принимает оптимальное значение [255]. Оптимизация АТИ предполагает выбор таких конфигураций $G_{\text{конф}}$ СДСС НПМ БР, которые улучшают значения $f_i(G) = f_i(G_{\text{конф}})$.

С другой стороны, оценка текущего состояния СДСС НПМ БР, то есть поиск значения АТИ при текущей конфигурации $ATI_{\text{конф}}$ подразумевает решение многокритериальной задачи $ATI|F(x) = ATI_{\text{конф}}|F(x)$. Конфигурация $G_{\text{конф}}$ СДСС НПМ БР при которой АТИ достигает наилучшего значения является оптимальной при заданных условиях (3.9):

$$ATI_{\text{опт}} = ATI_{\text{опт}}|F(x) = F_{\text{опт}}(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_n(x)). \quad (3.9)$$

Изменение конфигурации $G_{\text{конф}}$ приводит к изменению $f_i(G)$ и необходимости нового расчета $F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_n(x))$.

Конфигурация СДСС НПМ БР в виде $G_{\text{конф}}$ представляет набор параметров динамического графа, состоящий из количества вершин и ребер, структуре связей и весовыми значениями элементов графа.

Решению задачи $ATI_{\text{опт}} = ATI_{\text{опт}}|F(x) = f(G_{\text{опт}})$ соответствует такая конфигурация, которая дает наилучшее (оптимальное) значение $f_{\text{опт}}(G_{\text{конф}})$.

Многократное в постоянном режиме решение многокритериальной задачи $F(x)$ требует значительных вычислительных ресурсов, а для СДСС НПМ БР, то есть больших динамических графов задача становится нерешаемой за приемлемое время. Для класса NP задач поиск точного решения невозможен даже для графов средней или малой размерности.

Таким образом, поиск $ATI_{\text{опт}}$ является сложной задачей, в смысле ее решения за приемлемое время. Например, задача поиска гамильтонового цикла даже с одним критерием является трудноразрешимой, не говоря о многокритериальных постановках. Поиску $ATI_{\text{опт}}$ соответствует многокритериальная задача со многими параметрами (весами ребер или вершин), решить подобную задачу невозможно за требуемое время, используя стандартные методы и алгоритмы.

Следует отметить, возможны случаи, когда в качестве оптимизируемых выступают не отдельные критерии, а индивидуальные постановки многокритериальных ВЦФ $F^1(x), F^2(x), \dots, F^n(x)$, каждая из которых представляет собой $F^i(x) = (F_1^i(x), F_2^i(x), \dots, F_{M+T}^i(x))$. Значение $M + T$ соответствует числу весовых и топологических критериев текущей ВЦФ. Тогда оценка текущего состояния СДСС НПМ БР и поиск значения АТИ при текущей конфигурации $ATI_{\text{конф}}$ подразумевает решение многоцелевой задачи $ATI|F(x) = ATI_{\text{конф}}|F(x)$, где $F(x) = (F^1(x), F^2(x), \dots, F^n(x))$. Сложность такой задачи значительно увеличивается. Сама задача требует дополнительного изучения и выходит за рамки настоящего исследования, и упоминается в случае необходимости.

Для эффективного использования АТИ, учитывающего различные характеристики состояния СДСС НПМ БР, необходим анализ ее конфигураций, при которых изменяется АТИ и его составляющие. При решении задачи $F(x)$ при конкретной конфигурации $G_{\text{конф}}$ функции $F_i(x)$ принимают свои оптимальные значения и выступают в роли параметров F_i (без указания переменной x).

Необходимо найти совокупность значений параметров F_i , при которых АТИ принимает свое оптимальное значение $ATI_{\text{опт}}$. Для простоты предположим, что $ATI_{\text{опт}} = 1$, тогда необходимо решить обратную задачу $a_1 f_1(G) + a_2 f_2(G) + \dots + a_i f_i(G) + \dots + a_n f_n(G) = 1$ в виде (3.10):

[illegible]

При этом значения $f_1(G), f_2(G), \dots, f_n(G)$ могут быть противоречивыми, конфигурации СДСС дающие оптимальное значение $f_i(G)$, не позволяют достичь оптимальных значений $f_j(G)$, $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$. В таком случае можно говорить об оптимальных значениях одних $f_i(G)$ и оценках значений других $f_j(G)$.

В случае многокритериальной задачи, невозможности найти единые оптимальные значения для всех $f_i(G)$, предлагается использовать методику параметризации АТИ с оценками параметров и методику определения весовых коэффициентов – как выделения парето-оптимального решения с параметрами.

Методика параметризации агрегированного топологического индекса в задачах оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Далее предлагается методика M_{31} параметризации агрегированного топологического индекса с оценками параметров, которая решает задачу оптимизации состава ее метрик и является частью метода оптимизации АТИ.

Методика M_{31} состоит из следующих этапов.

Шаг 1. Выявление попарной зависимости составляющих АТИ.

На данном шаге предполагается выявление зависимостей между составляющими АТИ. То есть, каким образом изменение параметров F_j и соответственно значений $f_j(G)$ влияет на $f_i(G)$. Все параметры j принимаются за независимые переменные, а параметр i зависимый от параметров j .

Для простоты применяется попарное нахождение зависимостей, когда все параметры $j_1, j_2, \dots, j_{n-2}$ фиксируются, например на крайних значениях 0 или 1, меняется только один параметр j , от которого зависит параметр i .

Нахождение параметров F_i при текущей конфигурации $G_{\text{конф}}$ для оптимизации $f_i(G)$, $i = 1, 2, \dots, n$:

$$F_i|G_{\text{конф}}: f_i(G) \rightarrow \text{opt}, f_j(G) = f_{\text{оценка}}(G), j \in \{1, 2, \dots, n\}, i \neq j.$$

Шаг 2. Выявление зависимости параметров F_i от конфигураций $G_{\text{конф}}$.

На данном шаге методики выясняется какая конфигурация $G_{\text{конф}}$ приводит к требуемым значениям параметров F_i , $i = 1, 2, \dots, n$:

$$G_{\text{конф}}: F_i(G_{\text{конф}}) \rightarrow F_i.$$

Шаг 3. Управляющие реконфигурации.

Для достижения требуемых значений АТИ, или хотя бы одного из его составляющих m_i , может потребоваться последовательность реконфигураций: $G_1, G_2, \dots, G_k$.

Такая параметризация позволяет значительно ускорять время оптимизации АТИ в условиях деструктивных воздействий и ограниченных вычислительных ресурсов.

Методика настройки весовых коэффициентов агрегированного топологического индекса в задачах оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Одним из этапов настройки АТИ $\in [0; 1]$ является выбор таких параметров $a_i \in [0; 1]$, которые наилучшим образом описывают состояние системы при заданных требованиях $\dot{M} = (\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_i, \dots, \dot{m}_n)$. Значения a_i утверждает лицо, принимающее решение, тем не менее необходимо представить анализ для возможности принятия такого решения. В выражении

$ATI = a_1 m_1 + a_2 m_2 + \dots + a_i m_i + \dots + a_n m_n$ коэффициенты a_i определяют долю каждой метрики m_i в индексе АТИ. В зависимости от состава и свойств $G_{\text{конф}}$ СДСС НПМ БР метрики m_i могут значительно или не значительно меняться во времени t . Для того чтобы сбалансировать метрики m_i относительно данной задачи мониторинга в СДСС НПМ БР, необходимо определить их чувствительность во времени [256].

Далее предлагается методика M_{32} настройки весовых коэффициентов.

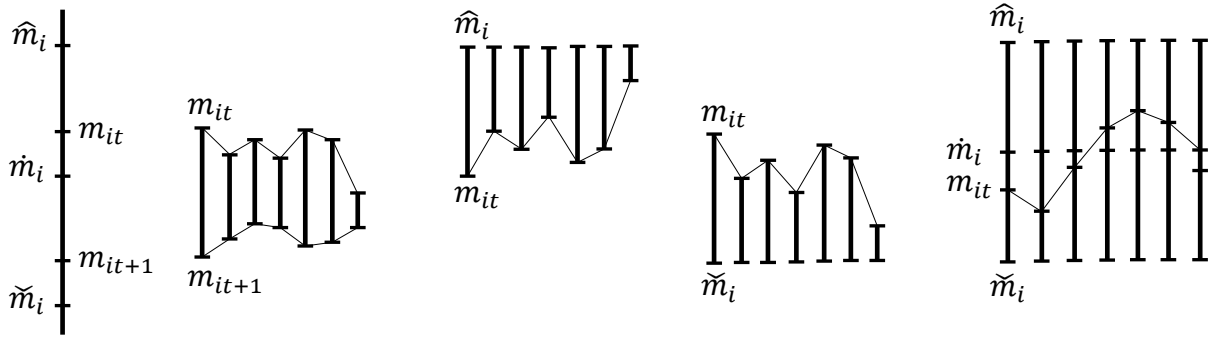
Для этого составляется (генерируется) проверочная последовательность конфигураций G_t^* , $t = 1, 2, \dots, T$. Далее вычисляются значения m_{it} для каждого графа конфигурации G_t^* в проверочной последовательности. Рассматривается показатель чувствительности $\check{a}_i$ метрики m_{it} двух типов:

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

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

Если метрика m_i стремится к нижним значениям требований $\check{M}$, тогда целесообразно использовать выражение $\check{a}_i(m_i) = \left(\sum_{t=1}^T \frac{\min(m_{it}, \check{m}_i)}{\max(m_{it}, \check{m}_i)} \right) / T$. С учетом нижних и верхних значений требований $\dot{M}$ применяется выражение $\dot{a}_i(m_i) = \left(\sum_{t=1}^T \frac{\min(m_{it}, \dot{m}_i)}{\max(m_{it}, \dot{m}_i)} \right) / T$, где $\dot{m}_i = [\check{m}_i; \hat{m}_i]$. В общем случае для приведения $\dot{m}_i$ к действительному значению используется равновзвешенная линейная свертка интервала $[\check{m}_i; \hat{m}_i]$. Следует отметить, что могут использоваться и другие правила интервальной арифметики для операций над интервальными числами. На рисунке 3.7 представлена визуализация вычисления показателя чувствительности $\check{a}_i$ для разных случаев.

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 $\check{a}_i = (\check{a}_i^I + \check{a}_i^{II}) / 2$. Состав и количество типов чувствительности может меняться в зависимости от постановки задачи мониторинга, требований $\dot{M}$ и графа конфигурации СДСС НПМ БР.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3.7 – Вычисление показателя чувствительности $\check{a}_i$

Чувствительность $\check{a}_i$ метрики m_i отражает поведение m_i в процессе смены конфигураций СДСС НПМ БР. Чем выше значение $\check{a}_i$, тем выше чувствительность m_i . В общем случае весовые коэффициенты a_i принимают значения (3.11):

$$a_i = 1 - \text{норм}\check{a}_i, \quad (3.11)$$

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

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

$$\sum_i a_i = 1.$$

Что означает, чем выше чувствительность метрики m_i , тем ниже ее составная доля a_i в АТИ. В зависимости от постановки задачи мониторинга весовые коэффициенты могут приниматься $a_i = \text{норм}\check{a}_i$, о чем оговаривается дополнительно.

В случае отсутствия проверочной последовательности конфигураций G_t^* или невозможности создания таковой, либо в связи с необходимостью повторной настройки в процессе функционирования СДСС НПМ БР, чувствительность метрик вычисляется в режиме «реального» времени 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 .

На каждом шаге t настройки коэффициентов a_i вычисляются значения $\text{норм} \check{a}_i, i = 1, 2, \dots, n$. Как только достигается значение $\max_i \text{норм} \check{a}_i \geq D$, процесс настройки завершается и АТИ фиксирует значения весовых коэффициентов: $\text{АТИ} = \sum_i (1 - \text{норм} \check{a}_i) m_i$. 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 $\max_i \text{норм} \check{a}_i \geq D$.

В зависимости от постановки задачи можно использовать другие соотношения для допуска. В настоящей работе придерживаемся указанного выше соотношения и соответственно уменьшение его значения.

В случае рассмотрения в качестве АТИ свойства живучести, весовые коэффициенты фактически задают важность составляющих его характеристики устойчивости, целостности и надежности.

3.3 Применение агрегированного топологического индекса в составе модели структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Рассмотрим частные постановки задачи оптимизации АТИ.

Пример 1. Задан взвешенный предфрактальный граф $G_L = (V_L, E_L)$. Кратные центры $\{x\}$ на G_L образуют МДР $X = X(G_L) = \{x\}$. На МДР x определяется ВЦФ и ее критерии (3.12):

$$\begin{aligned} F(x) &= (F_1(x), F_2(x), F_3(x), F_4(x)), \\ F_1(x) &= s(x) \rightarrow \min, \\ F_2(x) &= \sum_{k=1}^p \rho_k \rightarrow \min, \\ F_3(x) &= h \rightarrow \min, \\ F_4(x) &= p \rightarrow \min, \end{aligned} \tag{3.12}$$

где $s(x)$ – число разделения;

ρ_k – радиус k -вершины p -центра;

h – количество типов центров разного ранга;

p – количество вершин кратного центра.

Необходимо найти текущее значение АТИ на графе G_L , представляющего собой фиксированную конфигурацию СДСС НПМ БР:

$$ATI = \sum_{i=1}^4 a_i f_i(G_L) = a_1 f_1(G_L) + a_2 f_2(G_L) + a_3 f_3(G_L) + a_4 f_4(G_L).$$

Что соответствует решению задачи:

$$ATI|F(x) = ATI_{\text{конф}}|F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x), F_4(x)).$$

Критерии $F_1(x)$ и $F_2(x)$ являются функциональными, зависящими от весов G_L , а критерии $F_3(x)$, $F_4(x)$ – структурными, определяющими структурные характеристики решения на G_L .

Так как $F(x)$ – многокритериальная функция, то решением является паретовское множество несравнимых альтернатив.

Выбрав значение $p = 1$, решаем задачу выделения единственного центра G_L . АТИ в этом случае отражает состояние СДСС НПМ БР с точки зрения наличия единственного структурного центра и функциональных характеристик этого центра.

Тогда одно из решений паретовского множества $x_1^* \in x^*$ дает следующие значения критериев: $F_4(x_1^*) = 1$; $F_3(x_1^*) = 1$; $F_1(x_1^*) = s(x_1^*) = s_1$; $F_2(x_1^*) = \rho_1$.

И значение АТИ: $ATI = a_1 \cdot \text{норм} F_1(x_1^*) + a_2 \cdot \text{норм} F_2(x_1^*) + a_3 \cdot \text{норм} F_3(x_1^*) + a_4 \cdot \text{норм} F_4(x_1^*)$.

Для случая равных весовых коэффициентов a_i : $ATI = 0,25_{\text{норм}} F_1(x_1^*) + 0,25_{\text{норм}} F_2(x_1^*) + 0,25_{\text{норм}} F_3(x_1^*) + 0,25_{\text{норм}} F_4(x_1^*)$.

Изменение текущей конфигурации $G_{\text{конф}}$ СДСС означает необходимость пересчета $ATI_{\text{конф}}$ и соответственно решение многокритериальной задачи $ATI|F(x) = ATI_{\text{конф}}|F(x)$. Напомним, что под изменением конфигурации СДСС НПМ БР понимается структурное либо функциональное изменение графа G , то есть, изменение как характера связей,

так и весовых значений его элементов. В дальнейшем, будем считать изменение индекса t в случае изменения текущей конфигурации $G_{\text{конф}}$ и обозначать $ATI_t|F(x)$. Изменение в режиме реального времени будет оговариваться отдельно при необходимости.

Изменение конфигурации G_t к G_{t+1} приводит к возможному изменению структурно-функционального состояния СДСС НПМ БР и необходимости пересчета $ATI_{t+1} = \sum_{i=1}^n a_i f_i(G_{t+1})$ и решению многокритериальной задачи $ATI_{t+1}|F(x)$ на графе G_{t+1} .

Траектории динамического графа, а по сути последовательности конфигураций G_l , $l = 1, 2, \dots, L$ соответствует последовательность ATI_l , $l = 1, 2, \dots, L$. В каждый момент времени l необходимо решать задачу $ATI_l|F(x)$. Значение ATI_l отражает состояние СДСС НПМ БР для конкретной конфигурации l .

АТИ рассматривается как универсальный показатель состояния СДСС НПМ БР и отдельных его структурных и функциональных характеристик [257]. Параметризация АТИ предлагает также решение задачи оптимизации АТИ, то есть, изменение параметров F_i для улучшения значений составляющих m_i и всего $ATI(m_i)$.

Метрики m_i отражают ключевые или по другому наблюдаемые характеристики сети – такие как связность, центральность, кластеризация, надежность и др. [258]. Предложенный механизм АТИ применим для мониторинга состояния сети в режиме реального и топологического времени и выявления узких мест, требующих оперативных действий.

АТИ служит комплексным показателем эффективности функционирования СДСС НПМ БР [259]. Далее АТИ применяется в теоретико-графовой модели СДСС НПМ БР, представленной предфрактальным графом, для оценки устойчивости, целостности и оптимального доведения информации в различных сценариях функционирования. Рассматриваются примеры расчетов и визуализация результатов, демонстрирующие практическую применимость АТИ.

Пример 2. Теоретико-графовая модель СДСС НПМ БР представлена предфрактальным графом $G = (V, E)$, где V – множество вершин, представляющих средства мониторинга (СМ) и потребителей информации (ПИ), $|V| = 10^3$ (900 СМ и 100 ПИ). E – множество ребер, соответствующих каналам связи, $|E| = 10^3$, с начальной средней степенью $k = 6$. Граф G обладает свойствами самоподобия с фрактальной размерностью $d_f \approx 2,5$, что также отражает иерархичность и самоподобие СДСС НПМ БР с подвижными СМ.

Граф G представляет структуру СДСС НПМ БР и в частности подсистему передачи данных в статическом состоянии, но с учетом динамики (изменений множества связей во времени E_t). Задача оптимального доведения информации предполагает доставку данных от СМ к ПИ с учетом важности $V_i(t)$ и времени передачи $T_{ij}(t)$.

АТИ в частном случае для рассматриваемого примера представляется в виде (3.13):

$$АТИ = w_1 \cdot \lambda + w_2 \cdot C + w_3 \cdot S + w_4 \cdot E_{inf} + w_5 \cdot R_{str} + w_6 \cdot D_{eff}. \quad (3.13)$$

И применяется к модели СДСС НПМ БР с весами w_i , заданными экспертным путем ($w_1 = 0,2$, $w_2 = 0,1$, $w_3 = 0,2$, $w_4 = 0,2$, $w_5 = 0,15$, $w_6 = 0,15$, при этом $\sum w_i = 1$). АТИ состоит из следующих 6 компонент:

1) связность, $\lambda = \frac{|C_{max}|}{|V|}$, где $|C_{max}|$ – размер наибольшей компоненты;

2) коэффициент кластеризации, $C = \frac{1}{|V|} \sum_v \frac{2T_v}{k_v(k_v-1)}$, где T_v – число треугольников вокруг вершины v ;

3) показатель подобия, $S = 1 - \frac{|d_f(G) - d_f(G_{ideal})|}{d_f(G_{ideal})}$, где $d_f(G_{ideal}) = 2,5$;

4) эффективность информационного взаимодействия, $E_{inf} = \frac{T_{act}}{T_{req}}$, обрезаются при $E_{inf} > 1$.

5) структурная устойчивость, $R_{str} = 1 - \frac{\Delta|E|}{p_c \cdot |E|}$, где $p_c \approx 0,33$ для графа с $k = 6$;

б) эффективность доставки, $D_{eff} = \frac{\sum V_i(t) \cdot y_i}{\sum V_i(t)} \cdot \frac{T_{req}}{\sum T_{ij}(t) \cdot x_{ij}}$, где y_i и x_{ij} – решения задачи маршрутизации.

Далее предлагается оценка АТИ в зависимости от трех различных сценариев функционирования СДСС НПМ БР: нормальное функционирование без воздействий; деструктивное воздействие структурного характера – удаление ребер; деструктивное воздействие функционального характера – снижение весов ребер.

Сценарий 1. Нормальное функционирование

Исходные параметры: $\lambda = 0,98$ (высокий уровень связности), $C = 0,5$, $S = 0,9$ (высокий уровень самоподобия), $E_{inf} = 0,95$ ($T_{act} = 0,95 \cdot T_{req}$), $R_{str} = 1$, $D_{eff} = 0,92$ (92% важной информации доставлено вовремя).

$$АТИ = 0,2 \cdot 0,98 + 0,1 \cdot 0,5 + 0,2 \cdot 0,9 + 0,2 \cdot 0,95 + 0,15 \cdot 1 + 0,15 \cdot 0,92 = 0,904.$$

Вывод: АТИ = 0,904 находится в оптимальном диапазоне (0,7; 0,9), что указывает на высокую устойчивость и эффективность системы.

Сценарий 2. Деструктивное воздействие (удаление 40% ребер)

Параметры после удаления $|E| = 600$, $\lambda = 0,75$ (25% вершин не в составе наибольшей компоненты), $C = 0,4$, $S = 0,85$, $E_{inf} = 0,8$, $R_{str} = 1 - \frac{600}{0,33 \cdot 3000} \approx 0,39$, $D_{eff} = 0,65$ (задержки в доставке).

$$АТИ = 0,2 \cdot 0,75 + 0,1 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,85 + 0,2 \cdot 0,8 + 0,15 \cdot 0,39 + 0,15 \cdot 0,65 = 0,676.$$

Вывод: АТИ = 0,676 ниже порога 0,7, что сигнализирует о необходимости реконфигурации системы (добавления или перераспределение связей).

Сценарий 3. Снижение пропускной способности на 30%

Параметры: $\lambda = 0,95$, $C = 0,45$, $S = 0,9$, $E_{inf} = 0,7$ ($T_{act} = 1,3 \cdot T_{req}$), $R_{str} = 0,9$, $D_{eff} = 0,8$.

$$АТИ = 0,2 \cdot 0,95 + 0,1 \cdot 0,45 + 0,2 \cdot 0,9 + 0,2 \cdot 0,7 + 0,15 \cdot 0,9 + 0,15 \cdot 0,8 = 0,81.$$

Вывод: $ATI = 0,81$ в оптимальном диапазоне, но снижение E_{inf} и D_{eff} требует оптимизации маршрутизации.

Во всех трех сценариях отражается влияние деструктивных воздействий на состояние СДСС НПМ БР и соответственно на оценке АТИ. Изменения значений составляющих метрик позволяет понять, какие из них подвергаются наибольшему воздействию и какие требуются реконфигурации для возвращения АТИ в заданные пределы. Далее в качестве АТИ выбрана структурно-функциональная живучесть СДСС НПМ БР и предлагается методика ее оценки.

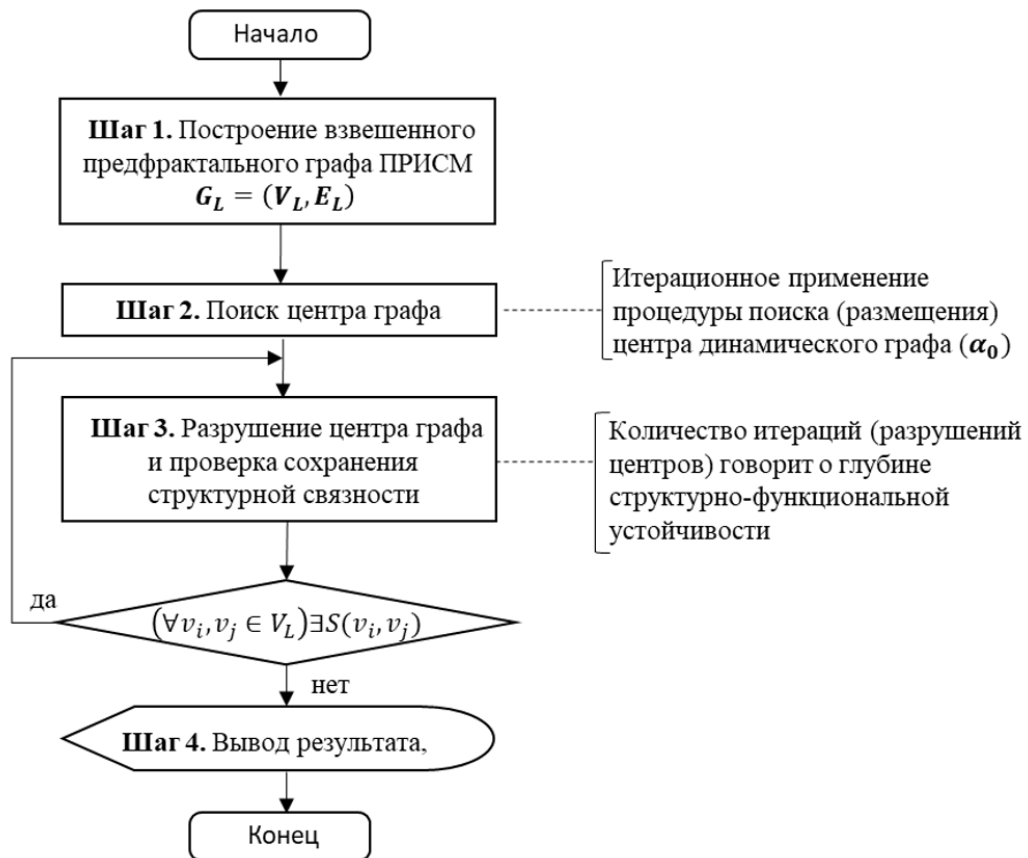
Методика оценки структурно-функциональной живучести структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Центр графа отражает вершину с лучшим набором кратчайших путей до всех остальных вершин, при этом кратный центр состоит из множества вершин. В многокритериальном случае определение кратного центра и процедура его поиска может быть расширено. По сути узлы СДСС НПМ БР, являющиеся центрами, соединяют через себя информационные маршруты. Выход из строя центра может приводит к кратковременным или фатальным перебоям работоспособности. В случае деструктивного воздействия такие узлы подвергаются наибольшему влиянию, поэтому важно понимать, какие узлы являются центрами и прогнозировать поведение СДСС НПМ БР в случае их удаления. Многократная операция удаления вершин позволяет прогнозировать последствия такого деструктивного воздействия и вычислять живучесть системы.

После итерационного поиска, центра графа удаляется и следует проверка сохранения связности. Количество итераций (разрушений центров) говорит о *глубине* живучести СДСС НПМ БР. Шаг разрушения центра, после которого нарушается структурная связность, соответствует характеристике *целостности*. Система находится в состоянии целостности, если текущий граф является связным. Как только граф распадается на несколько несвязных

компонент, целостность нарушается. Наиболее трудоемким этапом представленной методики является поиск центра динамического графа.

На рисунке 3.8 представлена блок-схема методики оценки структурно-функциональной живучести СДСС НПМ БР. Ее особенностью являются *операции размещения и разрушения центров*, которые позволяют исследовать характеристики динамических графовых структур [260].



Источник: составлено автором.

Рисунок 3.8 – Блок-схема итерационного алгоритма в условиях деструктивных воздействий

Шагу 2 методики соответствует процедура размещения центра графа конфигурации ССДС НПМ БР. В качестве процедуры размещения центра может использоваться любой из известных алгоритмов поиска центра. Далее в следующих главах предлагаются алгоритмы размещения центров на предфрактальных графах с улучшенными характеристиками вычислительной и временной сложности. Предложенные алгоритмы имеют ресурсоемкость, которая значительно ниже известных алгоритмов поиска центров в связи со

специальными свойствами самоподобия и иерархичности. В случае фиксации одного из входных параметров процедура ускоряется по сравнению с известными алгоритмами на порядок.

Структурное разрушение транспортно-логистической системы

Эффективность применения АТИ далее представлена на примере разрешения транспортно-логистической системы. Одним из управляющих параметров транспортно-логистической системы является структурно-функциональная устойчивость системы в условиях деструктивных воздействий. Понятие структурной устойчивости определяется для каждой индивидуальной задачи в результате чего появляются сложности применения известных методов в новых задачах. Дополнительным фактором, влияющим на устойчивость системы, является недетерминированность и множественность данных.

Модель транспортно-логистической системы, построенная на основе теоретико-графового инструментария, позволяет изучать структурные свойства и характеристики, решать оптимизационные и другие задачи. Необходимость формирования универсального комплексного показателя, отражающего устойчивость графовых структур, продиктована транспортно-логистическими задачами и проблемами из других сфер. Среди которых – изучение распространения информации и социальных взаимодействий, разработки мультиагентных технологий, построение систем планирования и распределения задач и многих других.

Предложенная модель транспортно-логистической системы основана на методах просачиваемости и многостокowych потоковых моделей. Рассмотрены вопросы поиска эффективного решения транспортно-логистических задач и связи таких решений с пропускной способностью системы и со значением коэффициента просачиваемости.

Если какая-то более сложная операция над графом включает в себя и другие элементарные действия, его можно разбить на структурное разрушение и побочные действия. В рамках настоящей работы рассматриваются только процессы, связанные со структурным разрушением систем [261]. Однако

нельзя не заметить, что в контексте решения транспортно-логистических задач существенным является то, что процессы структурного разрушения оказывают влияние на решения этих задач – и именно в этом заключается практический смысл исследования таких процессов. Исследовать процессы структурного разрушения в моделях транспортно-логистических систем необходимо в связи с оптимизационными задачами в этих системах.

В работе используется понятие структурного разрушения графа, что подразумевает разбиение графа на несвязные компоненты. Требуется найти оптимальное решение комбинированной транспортно-логистической задачи – поиск потоков и маршрутов. Оценка влияния структурных изменений проводится с помощью специального коэффициента, отражающего изменение решения задачи [262]. Полученные результаты представляется целесообразным использовать на этапе конструирования транспортно-логистических сетей. Исследование устойчивости к структурным разрушениям позволило понять, насколько влияет на систему отказ одного из узлов или каналов связи, и наоборот – как можно изменить структуру или граф конфигурации системы для улучшения ее живучести. Понятие *структурного разрушения* на графовой структуре определяется как совокупность элементарных действий удаления вершин и ребер графа.

В результате изменения графа конфигурации транспортно-логистической системы происходит изменение всего множества решений и оптимального решения по заданной целевой функции. В оптимизационных задачах интерес представляет изменение решений в условиях деструктивных воздействий, в частности структурного разрушения. В процессе изменения графа конфигурации, то есть при переходе $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+1}$ в результате оказанного воздействия решение x_t (в том числе можно говорить об оптимальном решении) меняется и составляет x_{t+1} . В этом случае следует говорить о влиянии структурного изменения на решение оптимизационной задачи $F(x)$. Влияние оценивается *коэффициентом влияния* $k_{\text{вл}} = \frac{F(x_{t+1})}{F(x_t)}$.

Следует отметить, что в общем случае $k_{\text{вл}}$ принимает значения в интервале $[0, +\infty)$. Рассматривая оптимальные решения по какому-либо

критерию, структурные разрушения «ухудшают» решение задачи и фактически $k_{вл} \in [0,1]$.

Для понятия *структурной устойчивости* к структурным разрушениям рассматриваются два пограничных случая ($k_{вл} = 0$ и $k_{вл} = 1$). Если удаляемые ребра никак не связаны с найденным оптимальным решением, не лежат на заданных этим решением оптимальных маршрутах и критических путях, никакого влияния на найденное решение процессы такого разрушения оказывать не будут. Оптимальное решение не изменится и система устойчива к такому виду структурных разрушений или воздействий: $k_{вл} = 1$. Если структурное разрушение приводит к отсутствию любого решения, то $k_{вл} = 0$ и система неустойчива к разрушениям подобного вида.

Случай, при котором $k_{вл} \in (0,1)$, то есть структурное разрушение меняет оптимальное решение, но оно все еще существует определяется *барьерное значение (барьер)*: $k_{бар}$. Барьер такое значение коэффициента влияния, что для любого структурного разрушения при $k_{вл} < k_{бар}$ транспортно-логистическая система считается неустойчивой, а при $k_{вл} \geq k_{бар}$ – устойчивой. Практической ценностью обладает определение структурной устойчивости по отношению к заданному виду структурных разрушений (например, удалению n ребер). В таком случае исследуются все возможные процессы разрушения такого типа на выбранной структуре и в качестве $k_{вл}$ выбирается наименьшее ее значение, что соответствует наибольшему влиянию разрушения на изменение оптимального решения.

Помимо коэффициента влияния рассматривается *коэффициент эффективности* решения представляющим собой сравнение текущего решения с «эталонным» или оптимальным решением: $k_{эфф} = \frac{F(x)}{F(x_{opt})}$.

Для транспортно-логистических задач также рассматривается *коэффициент просачиваемости* $k_{пр} = \frac{|V_P|}{|V_S|}$ равный отношению количества потоковых путей к количеству потоковых цепей.

Совокупность представленных показателей в частном случае для транспортно-логистической системы [263], представленной графом

конфигурации $G_{\text{конф}}$, составляет набор *характеристик* $M = (m_1 = k_{\text{вл}}, m_2 = k_{\text{бар}}, m_3 = k_{\text{пр}})$.

В соответствии с постановкой задачи задаются требования к транспортно-логистической системе $\hat{M} = (\hat{m}_1 = \hat{k}_{\text{вл}}, \hat{m}_2 = \hat{k}_{\text{бар}}, \hat{m}_3 = \hat{k}_{\text{пр}})$. Фактически требования $\hat{M} = (\hat{k}_{\text{вл}}, \hat{k}_{\text{бар}}, \hat{k}_{\text{пр}})$ задают начальные структурно-функциональные характеристики для конструирования графа транспортно-логистической системы. Если заданы верхние и нижние допустимые значения, то заданы требования $\dot{M} = (\dot{m}_1 = \dot{k}_{\text{вл}}, \dot{m}_2 = \dot{k}_{\text{бар}}, \dot{m}_3 = \dot{k}_{\text{пр}})$.

В соответствии с представленным аппаратом, характеристики транспортно-логистической системы составляют АТИ:

$$\text{АТИ} = a_1 m_1 + a_2 m_2 + a_3 m_3 \text{ или } \text{АТИ} = a_1 k_{\text{вл}} + a_2 k_{\text{бар}} + a_3 k_{\text{пр}}.$$

Все значения $k_{\text{вл}}, k_{\text{бар}}, k_{\text{пр}}$ лежат на отрезке $[0; 1]$, также значения весовых коэффициентов $a_1, a_2, a_3 \in [0; 1]$. Таким образом, $\text{АТИ} \in [0; 1]$ и не требуется нормализация значений составляющих метрик $k_{\text{вл}}, k_{\text{бар}}, k_{\text{пр}}$, частная компоновка АТИ транспортно-логистической системы представлена в виде $\text{АТИ} = a_1 k_{\text{вл}} + a_2 k_{\text{бар}} + a_3 k_{\text{пр}}$.

В соответствии с методикой настройки АТИ СДСС НПМ БР для ТЛС определяются значения $a_i = 1 - \text{норм} \check{a}_i$ в виде (3.14):

$$\text{АТИ} = (1 - \text{норм} \check{a}_1) k_{\text{вл}} + (1 - \text{норм} \check{a}_2) k_{\text{бар}} + (1 - \text{норм} \check{a}_3) k_{\text{пр}}, \quad (3.14)$$

где для $i = 1, 2, 3$ выполняется:

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

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

$$\sum_i a_i = 1.$$

Анализ центральности структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности с использованием агрегированного топологического индекса

Рассмотрим частную постановку индивидуальной 4-критериальной задачи выделения центра, отражающий качество центральности сети. На

основе полученных значений критериев формируются параметры, входящие АТИ в виде составляющих компонент.

Проводится конструирование (генерация) графов с разным числом вершин $|V| \in \{300, 700, 1200, 2000\}$, соответствующими диапазонами весов ребер $[0,5; 3]$, $[2; 8]$, $[1; 10]$, $[10; 20]$ [264]. Далее в каждом из графов фиксируются структурно-функциональные изменения соответственно на 5%, 10%, 15%.

АТИ используется для оценки свойства центральности СДСС НПМ БР, объединяя результаты многокритериальной оптимизации в едином показателе. Отдельным вопросом рассмотрения является выявление устойчивости АТИ к структурно-функциональным изменениям предфрактальных графов с учетом вариативных параметров.

1) Поиск центра графа. Центр определяется как вершина с минимальным эксцентриситетом – максимальным взвешенным расстоянием до любой другой вершины. Используется метод *nx.eccentricity* из *networkx* с параметром *weight = 'weight'*, применяемый к крупнейшей компоненте связности (*nx.connected_components*).

2) Вычисление АТИ. АТИ вычисляется как линейная свёртка нормированных критериев: $ATI = \sum_{i=1}^5 a_i \cdot m_i$, $m_i = \text{норм} F_i = \frac{F_i - F_i^{\min}}{F_i^{\max} - F_i^{\min}}$, $a_i = 0,25$, где $F_i^{\min} = 0$, $F_i^{\max} = 1$, что обеспечивает выполнение $ATI \in [0,1]$.

3) Структурно-функциональное изменение графа. Случайным выбором удаляется заданная доля ребер с сохранением компонент связности. Связность проверяется с помощью функции *nx.is_connected*.

4) Вычисление меры сходства. Используется коэффициент Жаккара: $Jaccard(G_1, G_2) = \frac{|E_1 \cap E_2|}{|E_1 \cup E_2|}$, где E_1, E_2 – множества рёбер графов G_1 и G_2 , $Jaccard \in [0,1]$.

5) Визуализация графа. Алгоритм *spring_layout* с $k = 0,15$ и 50 итерациями оптимизирует расположение узлов. Цвета зависят от уровня иерархии (градиент *plt.cm.Blues*) с нормализацией.

б) Вычисление параметров АТИ осуществляется через оптимизацию многокритериальной функции $F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x), F_4(x))$:

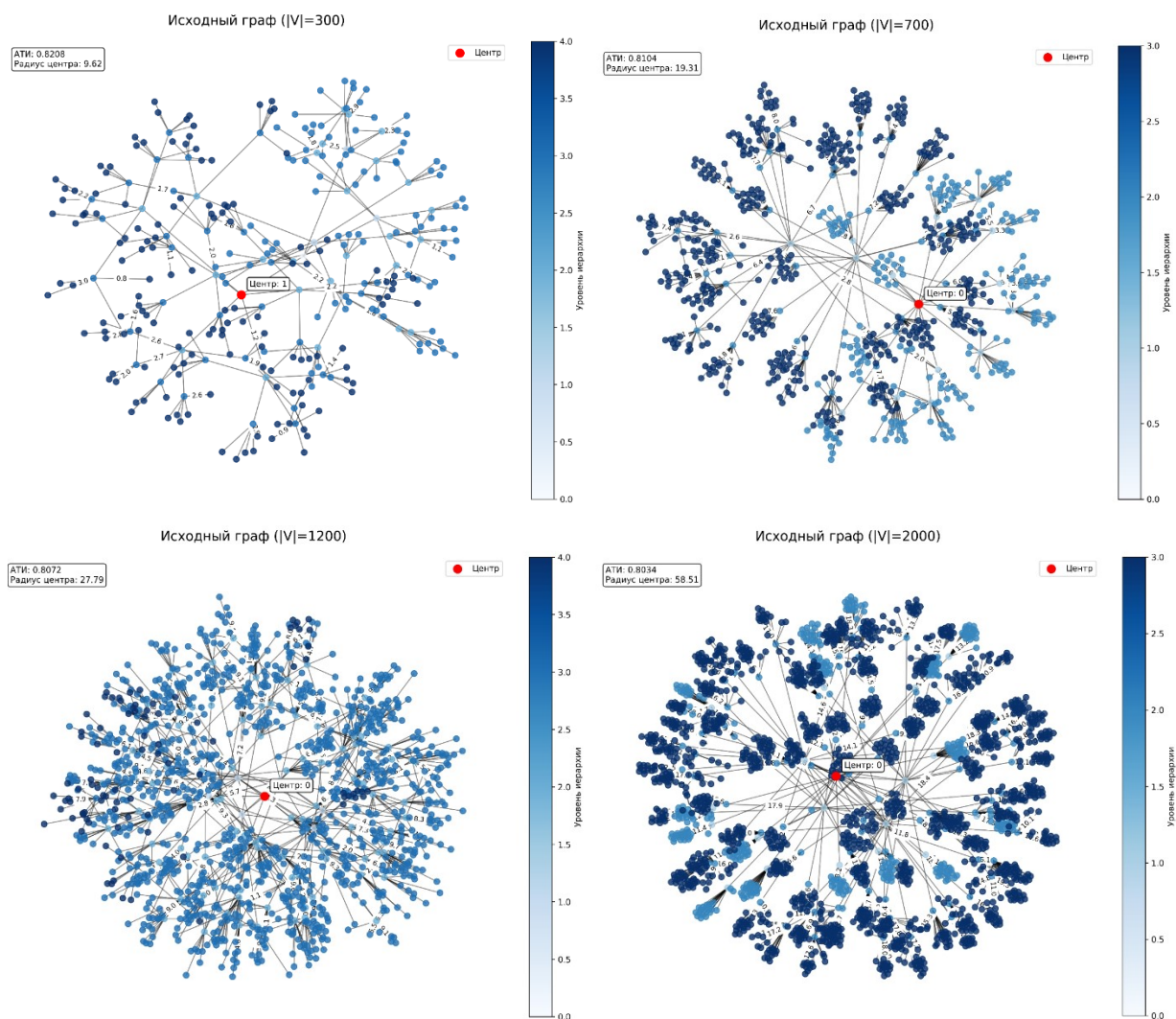
$$F_1(x) = \frac{1}{k}, \text{ где } k - \text{число компонент связности};$$

$$F_2(x) = \frac{1}{\rho}, \text{ где } \rho - \text{радиус центра};$$

$$F_3(x) = h, \text{ где } h = 1 - \text{количество типов центров разного уровня};$$

$$F_4(x) = p, \text{ где } p = 1 - \text{количество вершин кратного центра}.$$

На рисунке 3.9 сгенерированы иерархические графы $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$ в соответствии с числом их вершин $\{300, 700, 1200, 2000\}$, а числа вершин n порождающих подграфов (затравок) соответственно $\{5, 15, 10, 20\}$. Принадлежность вершин к иерархиям l указаны справа от графов в виде шкалы.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3.9 – Иерархические графы $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$

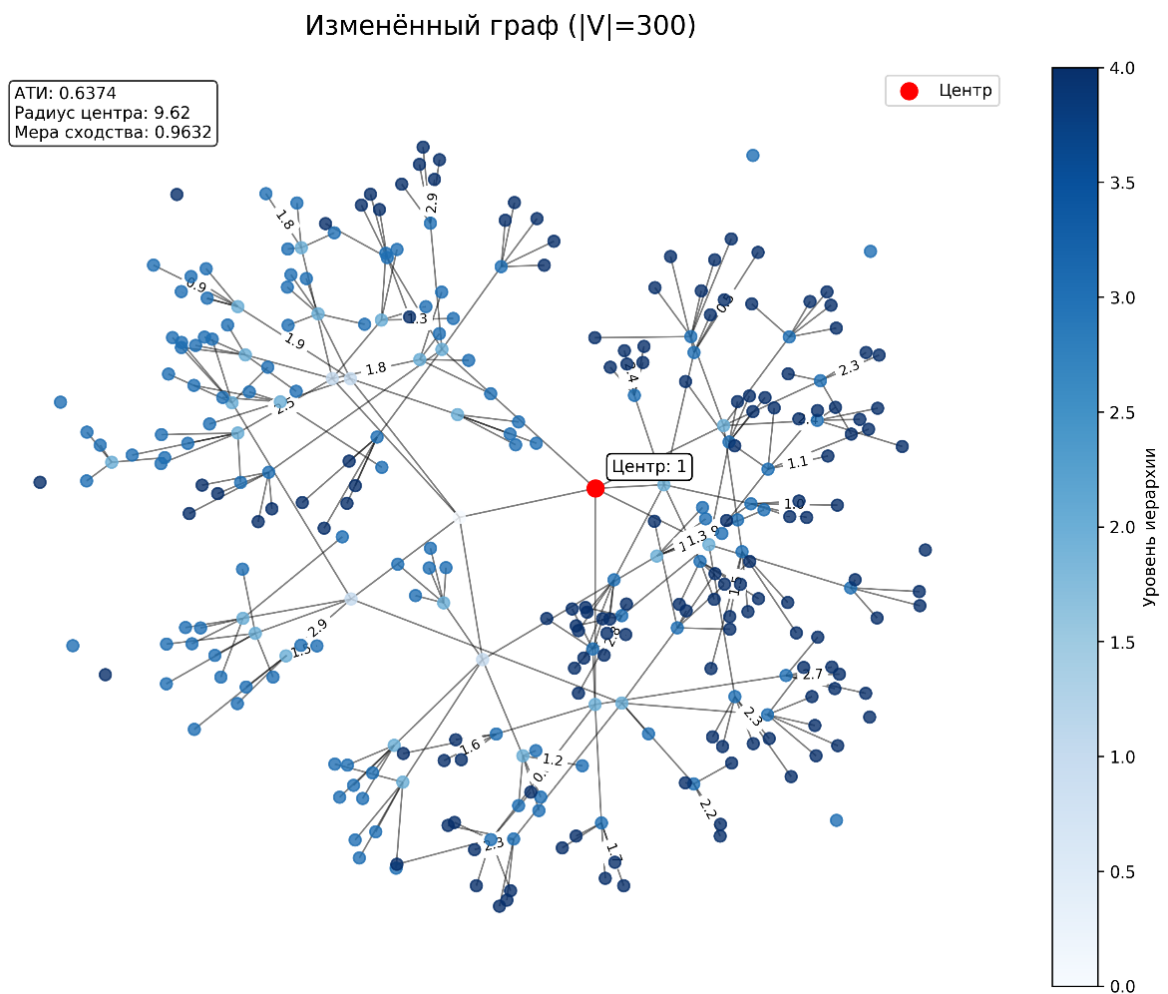
Представим далее результаты структурно-функционального изменения графов $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$, то есть изменения конфигураций СДСС НПМ БР, и влияние на показатель АТИ.

Изменение конфигурации $G_{t_1} \rightarrow G_{t_1+1} | 2\%$:

$ATI_{t_1} = 0,82; \rho_{t_1} = 9,62;$

$ATI_{t_1+1} \approx 0,64; \rho_{t_1+1} = 9,62; K_{G_{t_1}, G_{t_1+1}}^{\text{Jaccard}} \approx 0,96.$

Значительное снижение значения АТИ при неизменном радиусе указывает на изменение числа компонент связности, вызванное удалением ребер, что повлияло на параметр F_1 . На рисунке 3.10 представлены результаты изменения на графе G_{t_1+1} относительно графа G_{t_1} .



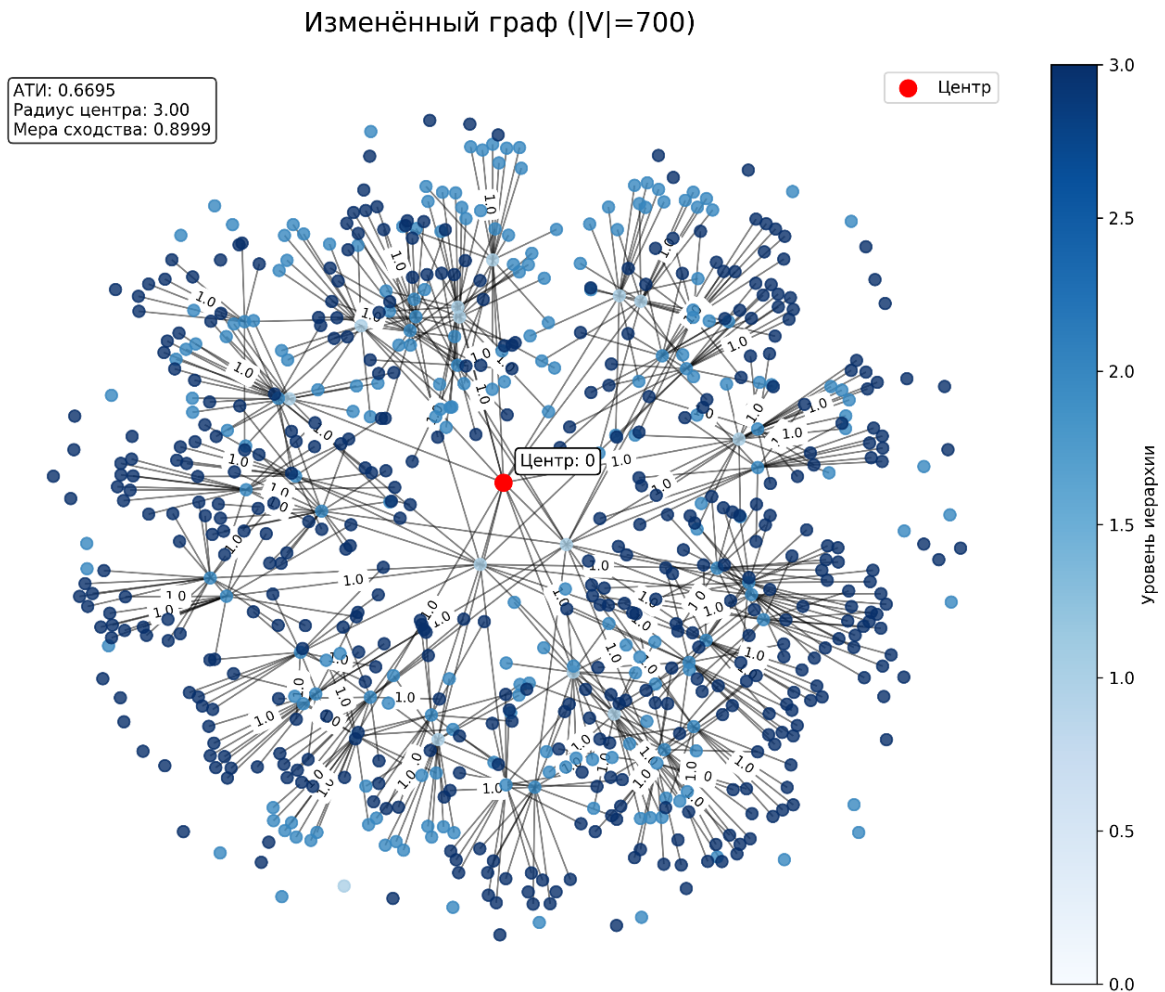
Источник: составлено автором.
Рисунок 3.10 – Конфигурация G_{t_1+1} СДСС НПМ БР

Изменение конфигурации $G_{t_2} \rightarrow G_{t_2+1} | 7\%$:

$$ATI_{t_2} = 0,81; \rho_{t_2} = 19,31;$$

$$ATI_{t_2+1} \approx 0,67; \rho_{t_2+1} = 3,00; K_{G_{t_2}, G_{t_2+1}}^{\text{Jaccard}} \approx 0,89.$$

На рисунке 3.11 представлены результаты изменения на графе G_{t_2+1} относительно графа G_{t_2} .



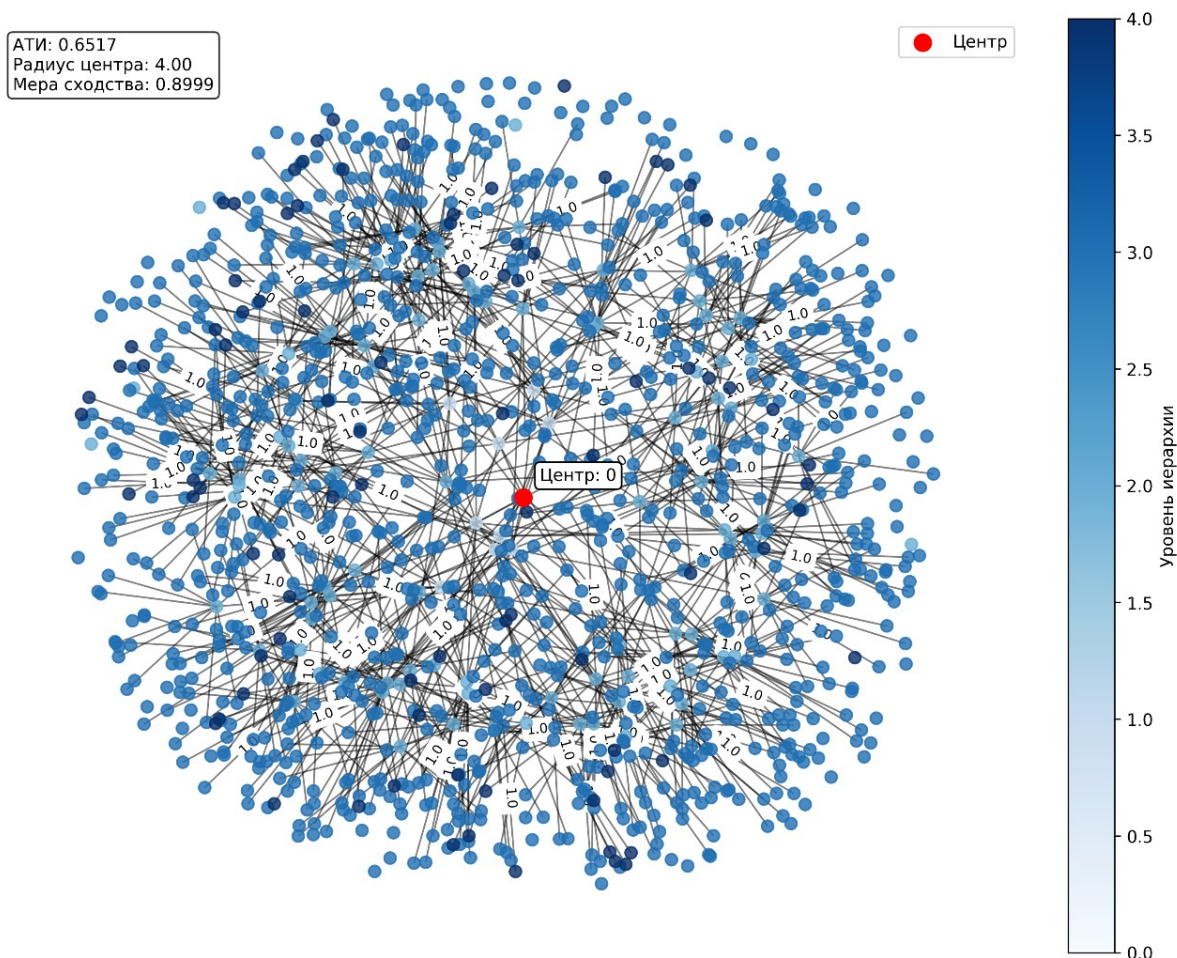
Источник: составлено автором.
Рисунок 3.11 – Конфигурация G_{t_2+1} СДСС НПМ БР

Изменение конфигурации $G_{t_3} \rightarrow G_{t_3+1} | 12\%$:

$$ATI_{t_3} \approx 0,81; \rho_{t_3} = 27,79;$$

$$ATI_{t_3+1} \approx 0,65; \rho_{t_3+1} = 4,00; K_{G_{t_3}, G_{t_3+1}}^{\text{Jaccard}} \approx 0,89.$$

На рисунке 3.12 представлены результаты изменения на графе G_{t_3+1} относительно графа G_{t_3} .

Изменённый граф ($|V|=1200$)

Источник: составлено автором.

Рисунок 3.12 – Конфигурация G_{t_3+1} СДСС НПМ БР

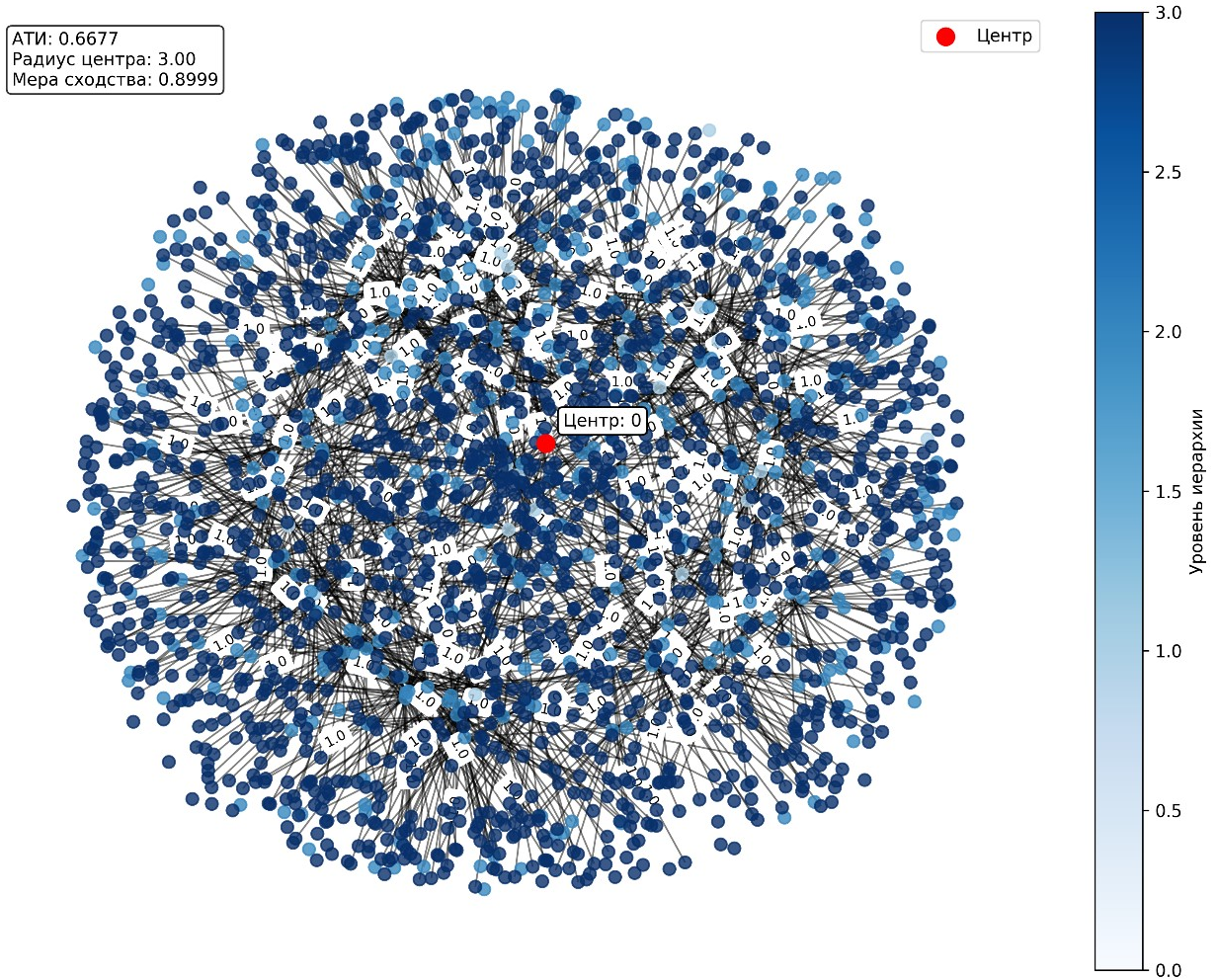
Изменение конфигурации $G_{t_4} \rightarrow G_{t_4+1} | 20\%$:

$$ATI_{t_4} \approx 0,80; \rho_{t_4} = 58,51;$$

$$ATI_{t_4+1} \approx 0,67; \rho_{t_4+1} = 3,00; K_{G_{t_4}, G_{t_4+1}}^{\text{Jaccard}} \approx 0,9.$$

На рисунке 3.13 представлены результаты изменения на графе G_{t_4+1} относительно графа G_{t_4} .

Численный расчет направлен на исследование устойчивости АТИ как показателя центральности СДСС НПМ БР при структурно-функциональных изменениях, то есть при смене конфигурации. В качестве начальных конфигураций рассмотрены четыре графа $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$ со следующими параметрами: число вершин $|V| \in \{300, 700, 1200, 2000\}$; диапазоны весов ребер – $[0,5; 3]$, $[2; 8]$, $[1; 10]$, $[10; 20]$; изменения структуры графов на 2%, 7%, 12%, 20%; число узлов на уровне иерархии ($k \in \{5, 15, 10, 20\}$).

Изменённый граф ($|V|=2000$)

Источник: составлено автором.

Рисунок 3.13 – Конфигурация G_{t_4+1} СДСС НПМ БР

В таблице 3.1 представлены результаты изменения конфигураций исследуемых графов.

Таблица 3.1 – Сравнительная таблица результатов изменений конфигураций

Переход	$ V $	$[a; b]$	%	$K_{G_t, G_{t+1}}^{\text{Jaccard}}$	l	ρ_t	ρ_{t+1}	ATI_t	ATI_{t+1}
$G_{t_1} \rightarrow G_{t_1+1}$	300	$[0,5; 3]$	2	0,96	5	9,62	9,62	0,82	0,64
$G_{t_2} \rightarrow G_{t_2+1}$	700	$[2; 8]$	7	0,90	15	19,31	3,00	0,81	0,67
$G_{t_3} \rightarrow G_{t_3+1}$	1200	$[1; 10]$	12	0,90	10	27,79	4,00	0,81	0,65
$G_{t_4} \rightarrow G_{t_4+1}$	2000	$[10; 20]$	20	0,90	20	58,51	3,00	0,80	0,67

Источник: составлено автором.

Выводы из результатов проведенных численных расчетов.

Число вершин $|V|$. С ростом числа вершин радиус центра увеличивается от 9,62 при $|V| = 300$ и до 58,51 при $|V| = 2000$), что связано

с увеличением иерархических уровней графа. После смены конфигураций радиус уменьшается до значений 3,00 – 4,00, что является следствием появления изолированных узлов и по сути уменьшающих эксцентриситет центра крупнейшей компоненты. АТИ демонстрирует тенденцию к снижению по каждой паре конфигураций, что указывает на влияние параметра – числа компонент F_1 .

Диапазон весов. Широкий диапазон весов [10; 20] ребер G_{t_4} приводит к большему исходному радиусу центра 58,51 по сравнению 9,62 при диапазоне [0,5; 3] графа G_{t_1} . После изменения конфигураций радиус снижается для всех исходных графов независимо от диапазона весов, что говорит о большем влиянии структурно-топологических изменений над весовыми (функциональными) характеристиками.

Структурные изменения. Структурные изменения исходного графа представлены в процентном выражении с 2% до 20%, что ожидаемо приводит к снижению меры сходства с 0,96 до 0,90, так как структура графа меняется сильнее.

Числа вершин n порождающих подграфов. Увеличение значения n с 5 до 20 вершин приводит к увеличению плотности графа, что также увеличивает радиус центра исходных графов.

Полученные результаты подтверждают применимость АТИ для мониторинга и управления СДСС НПМ БР, в частности ПРИСНМ, такими как телекоммуникационные сети, транспортные системы, социальные сети и др. Чувствительность АТИ к изменениям числа компонент позволяет использовать его для обнаружения разрывов связности, что особенно важно в динамических системах, где топология может меняться из-за отказов или внешних воздействий [265]. Однако снижение радиуса центра после изменений указывает на необходимость дальнейшего анализа влияния изолированных компонент на центральность.

Численный расчет показал, что АТИ является чувствительным показателем для оценки изменений топологии СДСС НПМ БР, особенно в контексте числа компонент связности. Значительное снижение АТИ при изменении структуры и снижение меры сходства демонстрируют способность метода фиксировать структурные изменения [266].

Выводы к главе 3

Научным результатом, полученным в третьей главе, является новый показатель оценки состояния СДСС НПМ БР – агрегированный топологический индекс. АТИ отличается от известных показателей учетом влияния 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. В настоящей главе в рамках основного научного результата получены следующие частные результаты.

1) Разработан понятийный аппарат метрик, характеризующих состояние СДСС НПМ БР. Даны определения метрик $m_i, i = 1, 2, \dots, n$, набора метрик $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ и процесса функционирования СДСС НПМ БР в соответствии заданными требованиями $\hat{M} = (\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_n)$. Определены свойства устойчивости, целостности и надежности СДСС НПМ БР. Для каждого из свойств предложен метрик M из множества $\{M\}$ и соответствующих требований $\dot{M} \in \{\dot{M}\}$. Отдельной задачей оптимизации является подбор такого набора метрик $M \in \{M\}$ и требований $\dot{M} \in \{\dot{M}\}$, которые одновременно отражали бы свойства устойчивости, целостности и надежности СДСС НПМ БР.

2) Разработан теоретико-графовый механизм деструктивных и управляющих воздействий СДСС НПМ БР. Определена последовательность деструктивных воздействий $G_{\text{возд}}^t, G_{\text{возд}}^{t+1}, \dots, G_{\text{возд}}^T$ на граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ в виде: $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{возд}}^{t+1} \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+2} | G_{\text{возд}}^{t+2} \rightarrow \dots \rightarrow G_{\text{конф}}^{t+T}$, а также управляющих воздействий: $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+1} | G_{\text{возд}}^{t+1} \xrightarrow{\text{УВ}} \dots \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+T}$. Определены понятия структурно-функционального ущерба $M_{\text{ущ}} = M_{\text{конф}} - M_{\text{КВ}}$ в условиях деструктивных воздействий, условия допустимого при $M_{\text{КВ}} \leq \dot{M}$ и существенного ущерба при $M_{\text{КВ}} \not\leq \dot{M}$.

3) Сформулированы определения АТИ на динамическом графе: $ATI_t = \sum_{i=1}^n a_i m_{it}$. Разработан механизм оптимизации АТИ для СДСС НПМ БР, в том числе методика параметризации АТИ и методика настройки весовых коэффициентов АТИ в задачах оптимизации СДСС НПМ БР.

4) Проведена апробация применения АТИ в составе модели СДСС НПМ БР на примере частных постановок задачи оптимизации АТИ и сценариев: «Сценарий 1. Нормальное функционирование», «Сценарий 2. Деструктивное воздействие (удаление 40% ребер)», «Сценарий 3. Снижение пропускной способности на 30%». Разработана методика оценки структурно-функциональной живучести СДСС НПМ БР и апробирована на модели структурного разрушения транспортно-логистической системы. Проведен анализ центральности СДСС НПМ БР частной постановки индивидуальной многокритериальной задачи выделения центра. На основе полученных значений критериев сформированы параметры, входящие АТИ в виде составляющих компонент.

Глава 4

Метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Представленная во второй главе теоретико-графовая модель структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности позволила формализовать этапы функционирования системы в условиях деструктивных воздействий и представить в виде частных моделей – функционирования, распространения деструктивных воздействий и разрушения СДСС НПМ БР.

Формализованные зависимости, представленные в моделях, обусловили необходимость разработки комплексного показателя – агрегированного топологического индекса, полученного объединением структурно-топологических характеристик СДСС НПМ БР и учитывающий влияние деструктивных воздействий, что позволяет корректно оценивать текущее состояние системы и принимать решения об оперативной реконфигурации для сохранения структурно-функциональных характеристик в требуемых пределах [267; 268]. Таким образом, комплексный показатель АТИ оценивает текущее состояние и отражает необходимость реконфигурации для сохранения требуемых структурно-функциональных характеристик системы.

Представленные в модели зависимости и комплексный показатель позволили определить для достижения цели исследования – заключающейся в повышении оперативности принятия решения о реконфигурировании СДСС НПМ БР с сохранением ее структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий, следующие оригинальные действия.

Метод реконфигурирования содержит в себе новые оригинальные операции, представленные следующими действиями: а) целенаправленное конфигурирование СДСС НПМ БР заданными требованиями структурно-

функциональных характеристик в условиях деструктивных воздействий; б) динамическое реконфигурирование по результатам совместной обработки текущей информации для обеспечения функционирования СДСС НПМ БР в требуемом диапазоне АТИ; в) определение целесообразности реконфигурирования графа конфигурации в результате деструктивных воздействий для продолжения функционирования СДСС НПМ БР и выполнения задачи мониторинга [269].

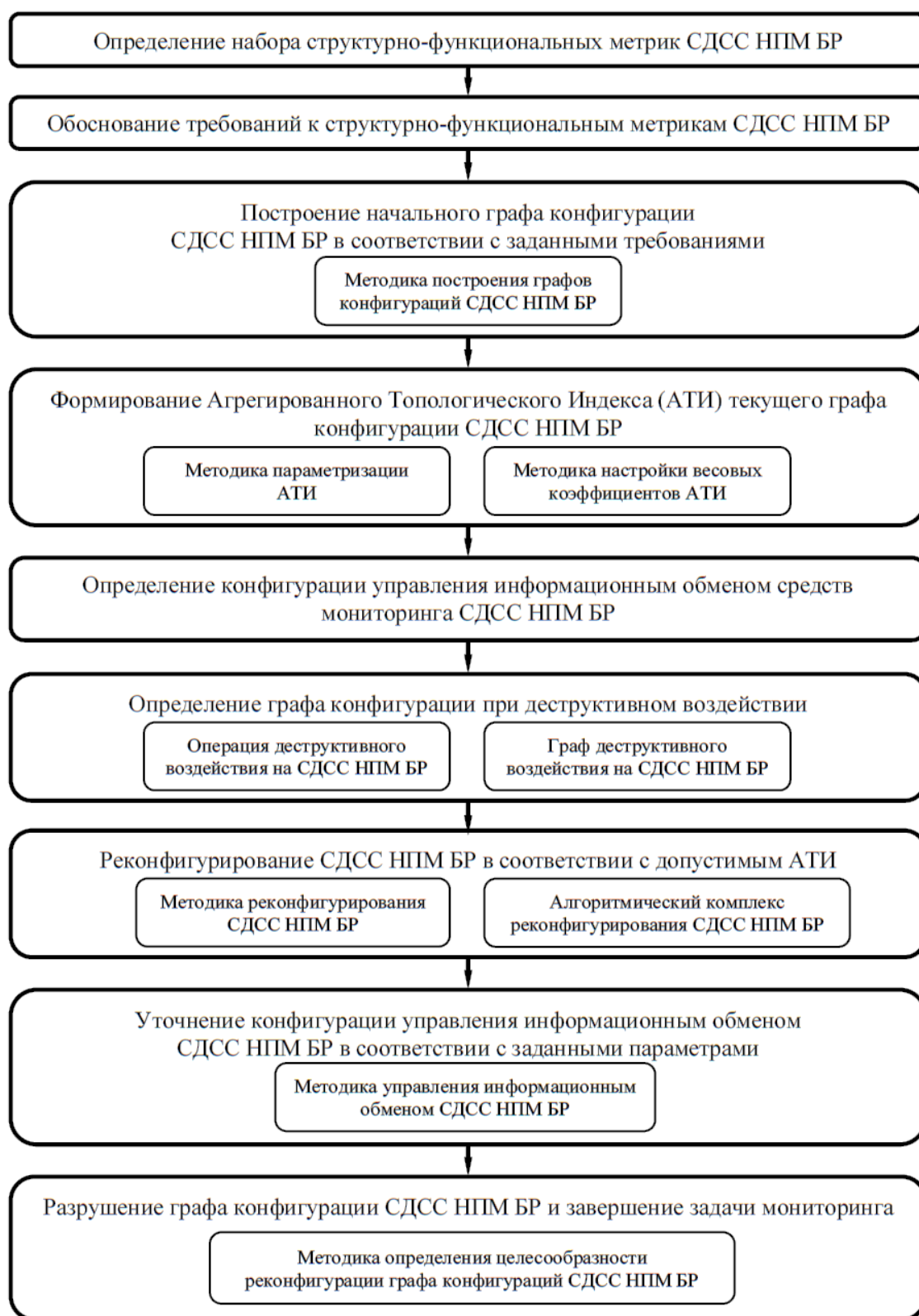
4.1 Общая схема метода динамического реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга в условиях деструктивных воздействий по результатам динамического анализа состояния графа конфигурации

В настоящем параграфе описана последовательность действий, на основе которых формируется метод динамического реконфигурирования СДСС НПМ БР. На рисунке 4.1 представлена последовательность действий с момента построения конфигурации СДСС НПМ БР и далее в процессе функционирования в условиях деструктивных воздействий.

Основное отличие метода заключается в том, что для конфигурирования СДСС – построения начального графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ и задания его свойств определяется набор структурно-функциональных метрик $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$. Так, для набора M задаются требования $\dot{M} = (\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_n)$, которые, по сути, есть ограничения значений метрик в заданных пределах для штатного функционирования СДСС и выполнения задачи мониторинга.

Следующим шагом осуществляется построение графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ – происходит конфигурирование СДСС НПМ БР в соответствии с метриками m_i и требованиями к ним $\dot{m}_i$.

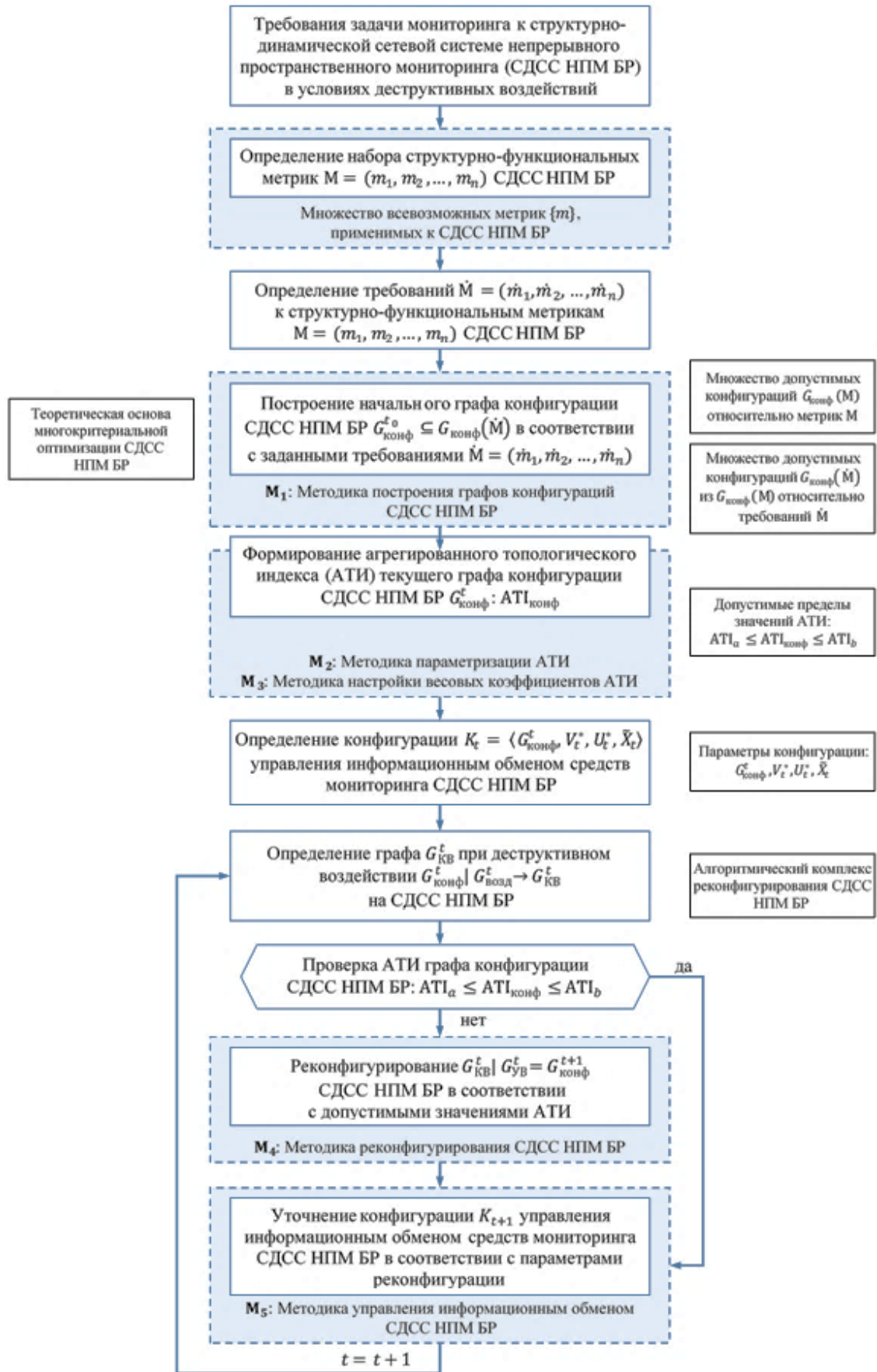
Построение графов конфигураций СДСС НПМ БР осуществляет конфигурирование в соответствии с начальными условиями, в качестве которых выступают – M и $\dot{M}$.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.1 – Последовательность действий в процессе функционирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий

На рисунке 4.2 изображена подробная схема метода динамического реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий на основе описанной выше последовательности действия и методик.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.2 – Схема метода динамического реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий

Для учета всех условий функционирования СДСС НПМ БР задается комплексный показатель – АТИ, отражающий состояние системы на текущий момент времени, в том числе необходимость реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий [270-272]. Параметризация и настройка весовых коэффициентов отвечают за формирование АТИ и его оптимизацию в соответствии с метриками М [273; 274].

В процессе функционирования СДСС НПМ БР для управления мониторингом необходимо определить оптимальные информационные каналы передачи информации между передающими и принимающими средствами мониторинга.

Конфигурация $K_t = \langle G_{\text{конф}}^t, V_t^*, U_t^*, \tilde{X}_t \rangle$ задает средства мониторинга для информационного обмена и паретовское множество информационных каналов связи.

В процессе штатного функционирования СДСС НПМ БР на нее оказываются деструктивные воздействия, представленные графом воздействий $G_{\text{возд}}$. Граф воздействий $G_{\text{возд}}$ переводит текущий граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ в новое состояние $G_{\text{КВ}}^t$ посредством операции воздействия. В случае если для $G_{\text{КВ}}^t$ значения АТИ выходят за допустимые пределы, требуется реконфигурирование СДСС НПМ БР.

4.2 Методика построения графа конфигурации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

В процессе функционирования структурно-динамическая сетевая система находится в условиях деструктивных воздействий.

Как было показано в главе 3 деструктивные воздействия на граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ влияют на структурно-функциональные метрики $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n$ и могут выводить их значения за пределы требований $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_i, \dots, \dot{m}_n$. Комплексным показателем, отражающим изменения

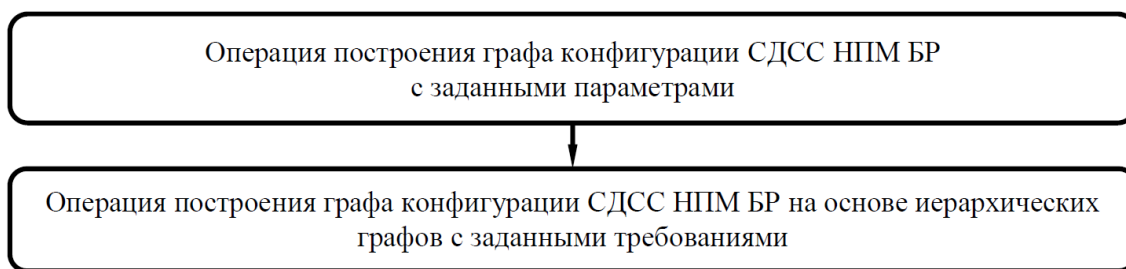
значений метрик m_i , выступает агрегированный топологический индекс $АТІ_{конф}$ [275].

АТИ решает задачу контроля состояния СДСС НПМ БР в пределах требований для обеспечения ее функционирования в штатном режиме и выполнения задачи мониторинга. В этом случае к измененному графу конфигурации G_{KB} необходимо применять управляющие воздействия, призванные вернуть значения m_i к заданным требованиям $\dot{m}_i$, а значение $АТІ_{конф}$ в пределы штатного функционирования системы.

В начале функционирования СДСС НПМ БР необходимо построить граф ее конфигурации, соответствующий требованиям $\dot{M}$. Методика построения конфигураций СДСС НПМ БР предназначена для построения начального графа конфигурации $G_{конф}$, 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 начинает функционирование с выбранным графом конфигурации, то есть выполнять задачу мониторинга при заданных начальных условиях [276; 277].

Начальные значения структурно-функциональных характеристик или конкретнее метрик m_i формируются на этапе построения графа конфигурации СДСС НПМ БР. Состав и описание набора метрик $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ в совокупности определяют свойства графа конфигурации $G_{конф}$, необходимые для решения задачи мониторинга в условиях деструктивных воздействий. На основе набора метрик M формируется множество допустимых конфигураций $G_{конф}(M)$ 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 .

Таким образом, методика построения конфигурации СДСС НПМ БР в составе метода динамического реконфигурирования решает задачу построения начального графа конфигурации в соответствии с заданными требованиями и ограничениями задачи мониторинга. На рисунке 4.3 представлена схема методики построения графов конфигураций СДСС НПМ БР.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.3 – Схема методики построения графов конфигураций СДСС НПМ БР

Построение графа конфигурации означает построение графа $G_{\text{конф}}$ с заданными свойствами, а также определяется принадлежность $G_{\text{конф}}$ к каким-либо определенным классам графов – иерархических, многоуровневых, предфрактальных, самоподобных, со свойствами кластеризации и других, что также определяет постановку задачи на формирование АТИ, описанного в главе 3. АТИ позволяет оценивать текущее состояние СДСС НПМ БР для обеспечения требований $\bar{M}$.

В главе 2 представлены этапы функционирования СДСС НПМ БР, в частности этап конфигурирования – построения начального графа конфигурации. На этапе конфигурирования задаются требования к СДСС НПМ БР в части своевременности, достоверности и полноте передачи данных в подсистеме связи – между средствами мониторинга. Граф конфигурации, построенный посредством инструментария предфрактальных графов, позволяет учитывать и задавать указанные требования в структуре системы – то есть требования к ее свойствам и метрикам. В главе 2 представлено введение в процесс построения или по-другому порождения предфрактальных графов.

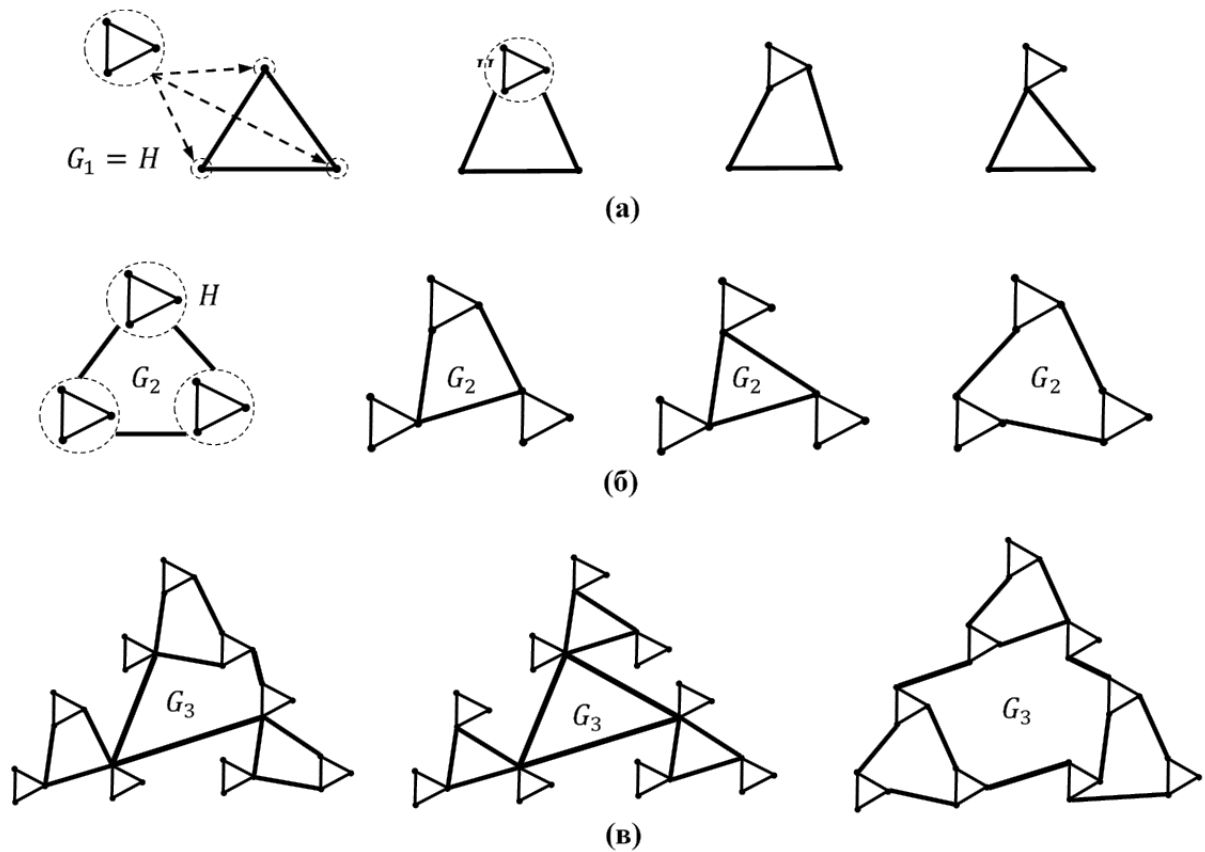
Методика построения конфигураций СДСС НПМ БР направлена на построение конфигурации, удовлетворяющей требованиям к составу и содержанию метрик – свойств системы, таких как устойчивость и целостность, для выполнения задачи мониторинга в том числе в условиях деструктивных воздействий. Рассмотрим далее условия построения графа конфигурации с помощью инструментария предфрактальных графов, позволяющий задавать параметры построения.

Построение предфрактального графов конфигурации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности с заданными параметрами

Построение графа конфигурации СДСС НПМ БР является началом процесса функционирования [278; 279]. В соответствии с постановкой задачи мониторинга формируются требования к структурно-функциональным характеристиками $\dot{M} = (\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_n)$. Граф конфигурации, построенный на основе предфрактального графа позволяет задавать такие свойства как устойчивость, целостность или надежность – выраженные конкретными метриками. Например, максимальным кратчайшим путем, резервными мостами и другими характеристиками.

Предфрактальный граф обозначается через $G_L = (V_L, E_L)$, где V_L – множество вершин графа, а E_L – множество его рёбер. Определяется он рекуррентно, в построенном на предыдущем этапе $l = 1, 2, \dots, L - 1$ графе $G_l = (V_l, E_l)$ каждая его вершина заменяется затравкой H . Процесс построения (порождения) предфрактального графа G_L по существу есть процесс построения последовательности $G_1, G_2, \dots, G_L$. Построение предфрактального графа конфигурации закладывает в него требуемые свойства и характеристики. А применение оптимизационных инструментов на предфрактальных графах задает правила информационного взаимодействия средств мониторинга. Например, решение задачи поиска кратчайших путей между двумя подмножествами средств мониторинга задает маршруты оптимального информационного обмена.

На рисунке 4.4 представлена траектория G_1, G_2, G_3 предфрактального графа G_3 , порожденного затравкой-треугольником: (а) операция замещения вершин затравкой; (б) и (в) соответственно графы G_2 и G_3 с разными условиями сохранения смежности старых ребер – смежность старых ребер произвольная, смежность старых ребер сохраняется, старые ребра не пересекаются.



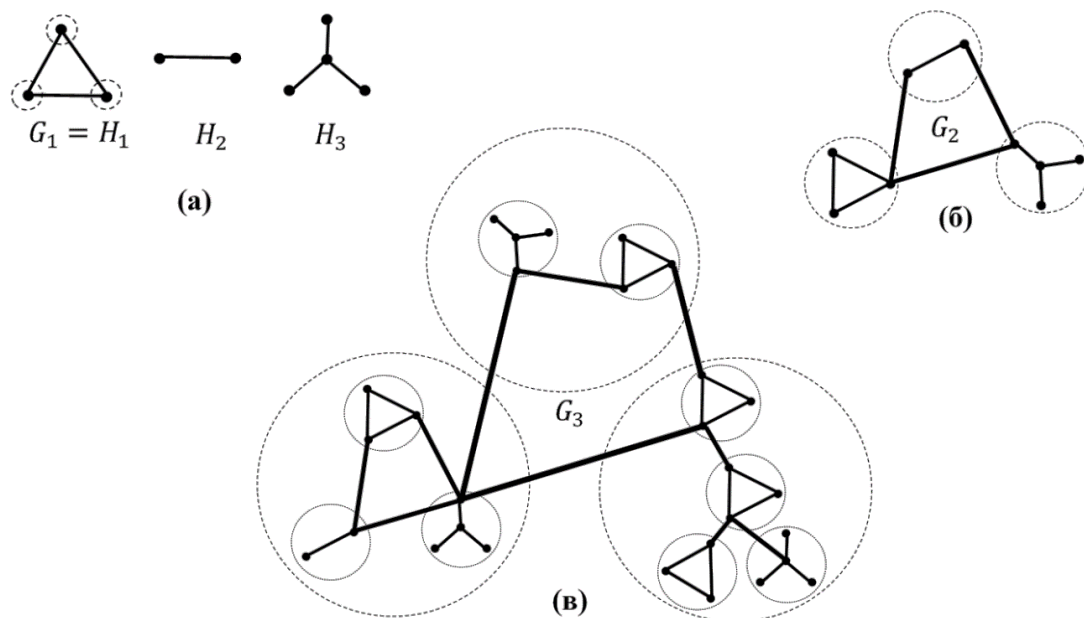
Источник: составлено автором.
Рисунок 4.4 – Условия сохранения смежности

Обобщением процесса порождения предфрактального графа G_L является случай, когда вместо единственной затравки H задается *множество затравок* $H = \{H_T\}$. Мощности множества вершин затравок $H_t = (W_t, Q_t)$ равны $|W_t| = n_t$. В дальнейшем используются обозначения: затравка $H \in \{H_t\}$, $n = \max n_t$, $q = \max q_t$.

На рисунке 4.5 представлен пример предфрактального графа G_3 , порожденного множеством затравок H , смежность старых ребер выбрана произвольной: (а) $H = \{H_1, H_2, H_3\}$, H_1 – полный 3-вершинный граф-треугольник, H_2 – полный 2-вершинный граф, H_3 – 4-вершинный граф-звезда; (б) затравки, вновь заместившие вершины, обведены малыми пунктирными окружностями; (в) большие пунктирные окружности обводят подграфы, появившиеся вместо вершин графа G_1 после второго этапа замещения вершин затравкой.

Отличительной особенностью процесса порождения предфрактального графа является то, что на каждом этапе $l = 2, 3, \dots, L$ в текущем графе

$G_{l-1} = (V_{l-1}, E_{l-1})$ замещается затравкой каждая вершина $v \in V_{l-1}$. Предфрактальные графы, получаемые в результате такого процесса, называем *каноническими* [280].



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.5 – Траектория G_3 , порожденного множеством $H = \{H_1, H_2, H_3\}$

Такая каноническая формализация графа конфигурации позволяет применять аппарат предфрактальных графов без значительных изменений и со всеми имеющимися преимуществами [281]. Алгоритмы оптимизации предфрактальных графов представлены в главе 5.

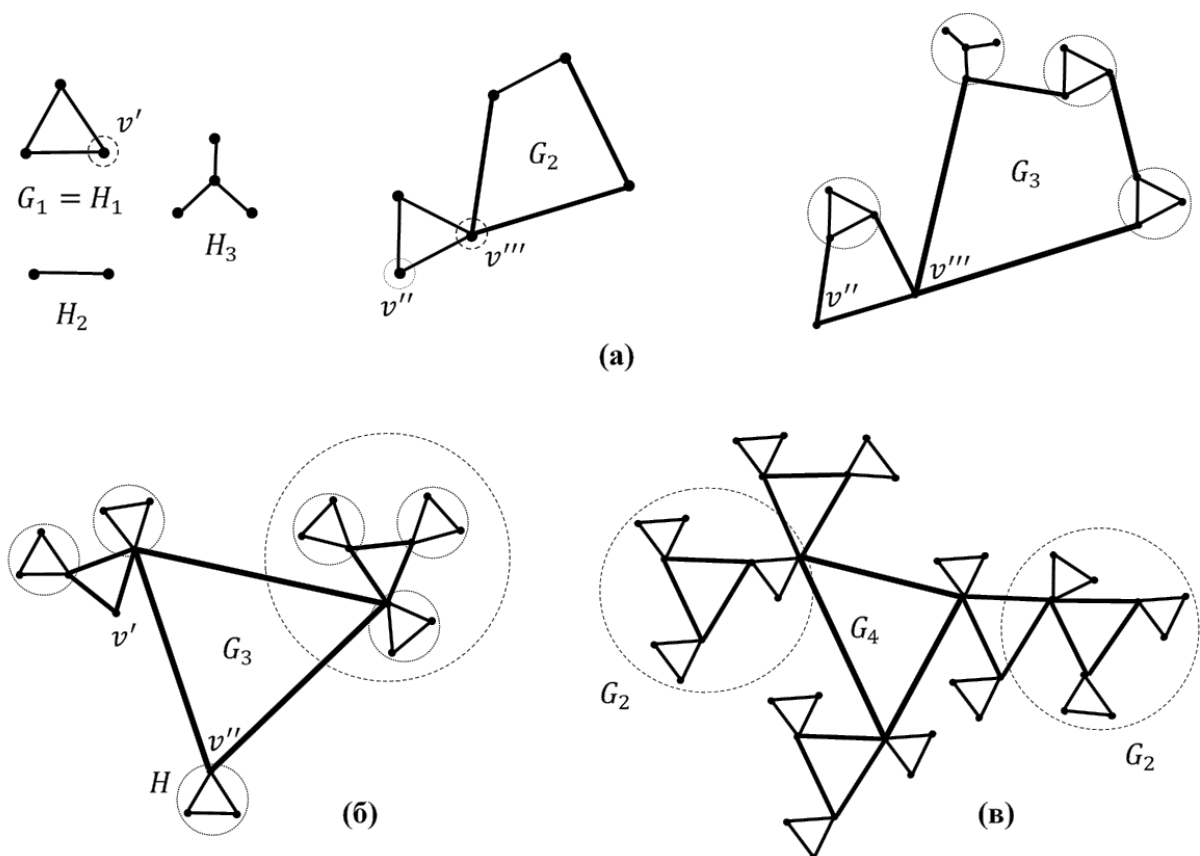
Неканонические предфрактальные структуры – графы конфигураций обладают большей адаптивностью и позволяют динамично подстраиваться под различные виды воздействий и реконфигурировать СДСС НПМ БР для восстановления заданных параметров. В общем случае *неканонический* предфрактальный граф порождается множеством затравок H мощности $|H| \geq 1$, однако при одном принципиальном отличии: при переходе от графа G_{l-1} к графу G_l в траектории $G_1, G_2, \dots, G_{l-1}, G_l, \dots, G_L$, замещается затравкой из H не каждая вершина $v \in V_{l-1}$, а лишь подмножество вершин $V_{l-1}^* \subset V_{l-1}$, которое определяется случайно, либо согласно конкретным правилам, отражающим содержательную специфику моделируемой задачи.

На рисунке 4.6 представлены неканонические графы:

(а) неканонический предфрактальный граф G_3 , порожденный множеством затравок H , смежность старых ребер выбрана произвольной, вершина v' не была замещена затравкой на втором этапе, вершины v'' и v''' не были замещены затравками на третьем;

(б) неканонический предфрактальный граф G_3 , порожденный единственной затравкой полный 3-вершинный граф, при сохранении смежности старых ребер, вершина v' не была замещена затравкой на третьем этапе, а вершина v'' замещена затравкой только на третьем;

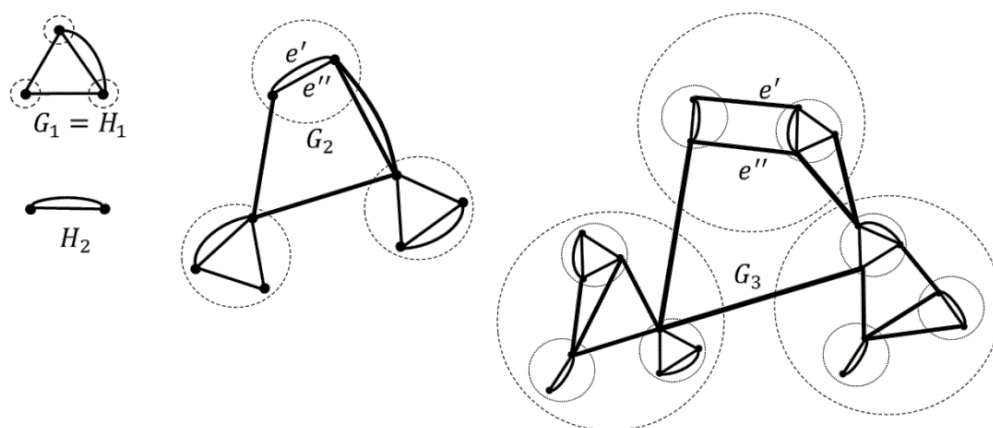
(в) неканонический предфрактальный граф G_4 , в котором на последнем – четвертом этапе порождения две вершины замещены графом G_2 из траектории G_1, G_2, G_3 . Случай (в) является нетривиальным и представляет операцию ЗВЗ в процессе порождения предфрактального графа G_l , $l = 1, 2, \dots, L$, когда вершина замещается не затравкой, а графом G_{l-t} , $t = 1, 2, \dots, l - 1$ из траектории $G_1, G_2, \dots, G_{l-1}$.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.6 – Неканонические предфрактальные графы

В качестве затравок могут использоваться не только обыкновенные графы, но и мультиграфы, в том числе ориентированные графы [282; 283]. Существует несколько различных способов обозначения ребер мультиграфа. В одном случае ребро определяется вершинами, которые оно соединяет, при этом каждое ребро может повторяться несколько раз. В другом случае ребра являются равноправными и должны иметь собственную идентификацию. На рисунке 4.7 изображен канонический предфрактальный мультиграф G_3 , порожденный множеством затравок $H = \{H_1, H_2\}$, смежность старых ребер выбрана произвольной. В процессе порождения предфрактального графа ребра e' и e'' смежные в G_2 , таковыми уже не являются в G_3 .



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.7 – Траектория мультиграфа G_3 , порожденного множеством H

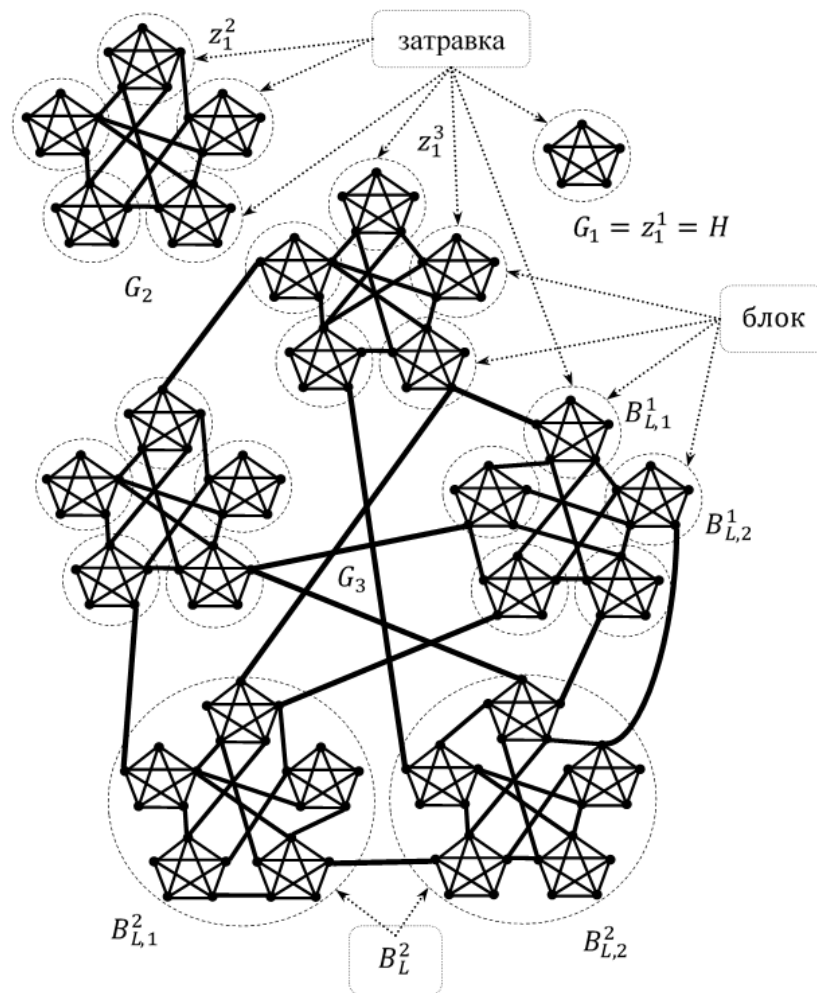
Важной характеристикой предфрактального графа является сохранение смежности старых ребер в процессе порождения, что обеспечивает характеристики центральности графа [284; 285]. Процесс генерации предфрактального графа представляет собой случайные соединения новых вершин с концами старых ребер. Важную роль играют случаи, когда инцидентные связи сохраняются для всех старых ребер и для ребер одного конкретного ранга. Для чего далее предлагаются следующие выводы.

Утверждение 4.1. Любой предфрактальный граф G_L можно построить с непересекающимися старыми ребрами.

Следствие 4.1. Для каждого предфрактального графа траектории $G_1, G_2, \dots, G_L$ верно утверждение 4.1.

Удаляя из G_L все ребра $l = 1, 2, \dots, L - r$, получается множество $\{B_{L,i}^r\}$, $r \in \{1, 2, \dots, L - 1\}$ блоков r -го ранга, где $i = 1, 2, \dots, n^{L-r}$. Блоки $B_L^1 \subseteq G_L$ также называются *подграф-затравками* G_L . Два блока предфрактального графа называются *смежными*, если существует ребро, вершины которого принадлежат различным блокам. Далее блоки рассматриваются непосредственно на графах.

На рисунке 4.8 граф G_1 представляет собой единственную затравку $z_1^1 = H$, на графе G_2 и G_3 малыми пунктирными окружностями указаны затравки второго и третьего рангов соответственно. Большими пунктирными окружностями указаны блоки второго ранга.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.8 – Блоки и подграф-затравки предфрактального графа G_3

Для применения инструментария предфрактальных графов далее представлены общетеоретические утверждения [276; 279; 286].

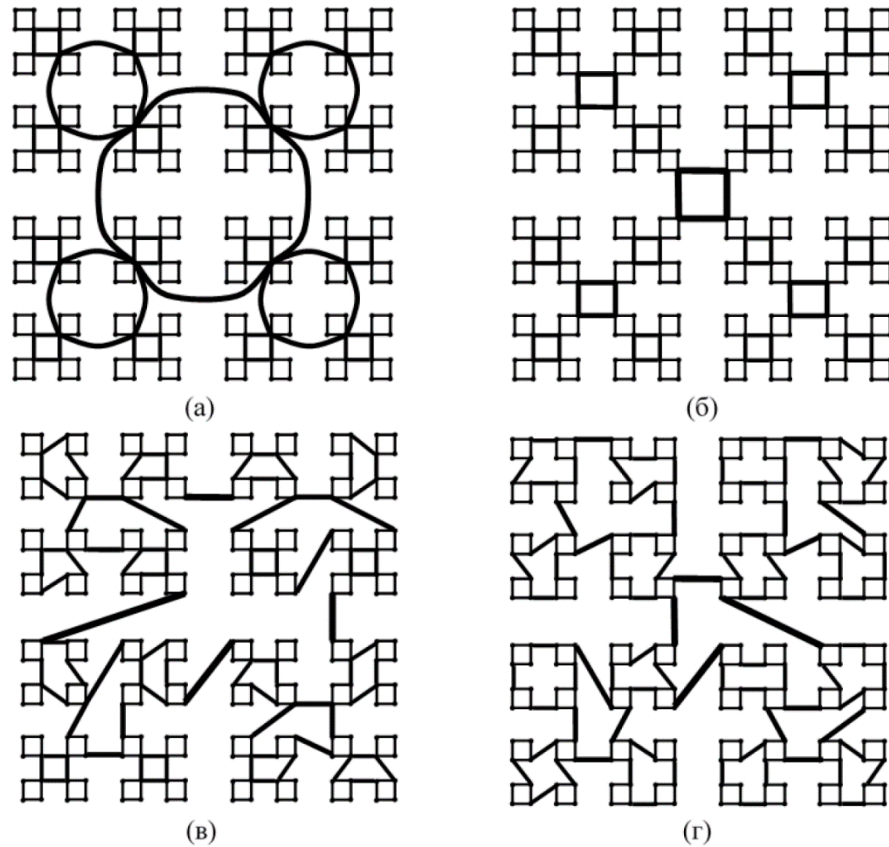
Как следует из определения предфрактального графа $G_L = (V_L, E_L)$ количества его вершин равно $N = |V_L| = n^L$ и количество ребер $M = |E_L| = q(n^L - 1)/(n - 1)$, где $n = |W|$ и $q = |Q|$.

Для предфрактального графа, порожденного треугольником $n = 3$, в траектории на шаге $L = 9$ количество вершин $n^L = 3^9 = 19\,683$, а количество ребер $\frac{q(n^L - 1)}{n - 1} = \frac{3(3^9 - 1)}{3 - 1} = \frac{3(19683 - 1)}{3 - 1} = 29\,523$.

Для предфрактального графа, порожденного полной затравкой $n = 4$, в траектории на шаге $L = 7$ количество вершин $n^L = 4^7 = 16\,384$, а количество ребер $\frac{q(n^L - 1)}{n - 1} = \frac{6(4^7 - 1)}{4 - 1} = \frac{6(16384 - 1)}{4 - 1} = 32\,766$.

Возвращаясь к вопросу построения графов с заданными параметрами, построение предфрактальных графов осуществляется с заданием порождающего множества затравок и условий сохранения смежности ребер разного ранга.

На рисунке 4.9 изображены различные графы конфигураций СДСС НПИМ БР на основе G_4 .



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.9 – Графы конфигураций $G_{\text{конф}}^1$, $G_{\text{конф}}^2$, $G_{\text{конф}}^3$, $G_{\text{конф}}^4$ в различных вариациях порождения графа G_4

А именно: (а) граф конфигурации $G_{\text{конф}}^1$ с сохранением смежности старых ребер; (б) граф конфигурации $G_{\text{конф}}^2$ с сохранением смежности старых ребер одинакового ранга; (в) граф конфигурации $G_{\text{конф}}^3$ с произвольной смежностью старых ребер; (г) граф конфигурации $G_{\text{конф}}^4$, в котором старые ребра не пересекаются.

Количество вершин графа $G_{\text{конф}}$ для любой из конфигураций $G_{\text{конф}}^1$, $G_{\text{конф}}^2$, $G_{\text{конф}}^3$, $G_{\text{конф}}^4$ равно $n^L = 4^4 = 256$, а количество ребер равно $\frac{q(n^L-1)}{n-1} = \frac{4(4^4-1)}{4-1} = \frac{4(256-1)}{4-1} = 340$. При этом каждый из графов конфигураций обладает свойством самоподобия, но с различными условиями сохранения смежности старых ребер. Эти условия отражаются на таких показателях, как плотность, радиус, кластеризация и др.

Построение иерархических графов конфигураций структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности с заданными требованиями

В связи с тем, что граф конфигурации СДСС НПМ БР представляет собой сложную-структурированную связь средств мониторинга необходимо учитывать такие свойства как иерархичность и важность или ранг узлов. Перед тем как перейти к задаче реконфигурирования СДСС НПМ БР далее предлагается—инструментарий формирования конфигураций со свойствами иерархичности.

Иерархические графы также называют многоуровневыми графами в случае моделирования структуры многоуровневых систем [287; 288]. Построение иерархического графа осуществляется следующим образом. Дается множество затравок или графлетов (от англ. graphlet) $H = \{H\} = \{H_1, H_2, \dots, H_t, \dots, H_T\}$.

Для первого уровня или иерархии $l = 1$ формируется подмножество H_1 , состоящее из затравок $\{H\}$: $H_1 = \{H_t \in H\}$, $H_1 = (W_1, Q_1)$. При этом во множество H_1 могут входить одни и те же затравки H_t много раз. Между затравками из H_1 формируются *иерархические связи* (ребра, инцидентные

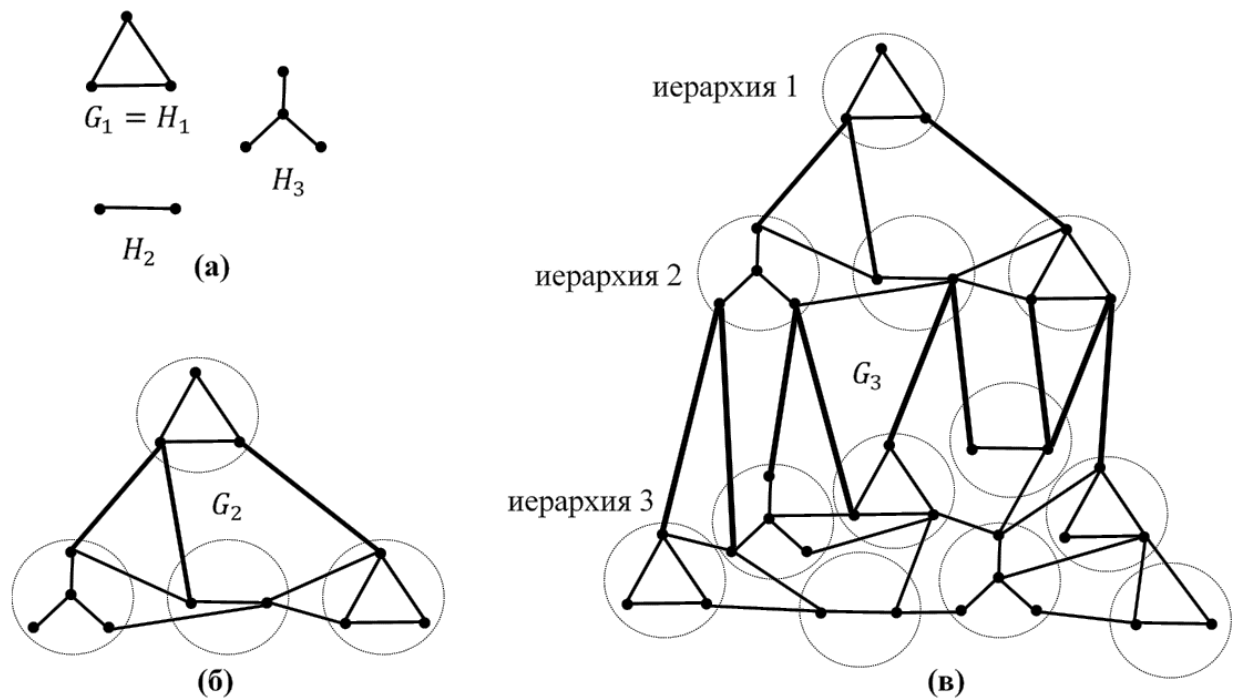
вершинам затравок) случайным образом или в соответствии с заданным правилом. Полученный граф $G_1 = (V_1, E_1)$ состоит из вершин $V_1 = \{v \in W_1\}$ и множества ребер $E_1 = \{e \in Q_1\} \cup \{e \in I_1\}$, где I_1 – ребра связывающие затравки из H_1 . В общем случае граф G_1 может быть не связным, когда не сформированы связи между затравками на первом уровне.

Для второго уровня $l = 2$ формируется подмножество H_2 , $H_2 = (W_2, Q_2)$. Между затравками из H_2 формируются связи также случайным образом или в соответствии с заданным правилом. Полученный граф $G'_2 = (V'_2, E'_2)$ состоит из вершин $V'_2 = \{v \in W_2\}$ и множества ребер $E'_2 = \{e \in Q_2\} \cup \{e \in I_2\}$, где I_2 – ребра связывающие затравки из H_2 . В общем случае граф G'_2 также может быть не связным. Далее между вершинами G_1 и G'_2 формируются связи $e \in I_{1,2}$. Множество $I_{1,2}$ называется *межиерархическим* или *межуровневым* множеством ребер (связей), в данном случае между первым или вторым уровнями (рангами, иерархиями). Сформированный граф является иерархическим графом $G_2 = (V_2, E_2)$, $V_2 = V_1 \cup V'_2$, $E_2 = E_1 \cup E'_2 \cup I_{1,2}$.

Указанным способом строятся иерархические графы $G_l = (V_l, E_l)$, где $V_l = V_{l-1} \cup V'_l$, $E_l = E_{l-1} \cup E'_l \cup I_{l-1,l}$. Последовательность иерархических графов $G_1, G_2, \dots, G_l, \dots, G_L$ соответствует траектории иерархического графа G_L .

На рисунке 4.10 представлен иерархический граф G_3 : (а) граф G_1 состоит из одной затравки $G_1 = H_1$, иерархические связи отсутствуют; (б) в графе G_2 на втором уровне иерархии присутствуют затравки H_1, H_2, H_3 и множество иерархических связей $|I_2| = 4$, множество межиерархических связей $|I_{1,2}| = 3$; (в) для графа G_3 на третьем уровне иерархии $|I_3| = 12$, $|I_{2,3}| = 9$.

Иерархический граф СДСС определяет ранги и соподчиненность средств мониторинга в случае, когда средства мониторинга выполняют функции ретрансляции или промежуточного сбора и обработки информации. На рисунке 4.10 на третьем уровне иерархии средств мониторинга осуществляется наблюдение за окружающей обстановкой, информация передается на второй уровень иерархии и далее на первый уровень иерархии.

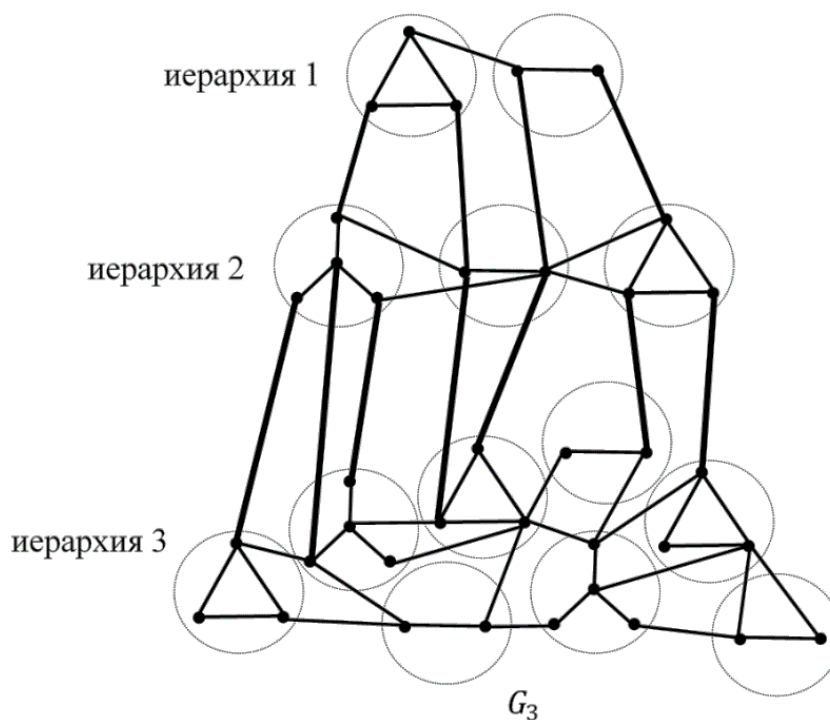


Источник: составлено автором.
Рисунок 4.10 – Иерархический граф G_3

Частным случаем иерархических графов являются графы сетцентрических систем или *сетцентрические графы* [289; 290]. В процессе функционирования СДСС в условиях деструктивных воздействий графы конфигурации, представленные иерархическими (сетцентрическими) графами, также подвергаются воздействиям – которые нарушают связность. Отличительной особенностью является отсутствие смежности между иерархическими связями (ребрами) одинакового уровня. То есть для всех $I_{1,2}, I_{2,3}, \dots, I_{L-1,L}$ никакое ребро в $I_{l-1,l}$ не является смежным.

На рисунке 4.11 изображен сетцентрический граф G_3 , построенный на основе порождающего множества $H = \{H_1, H_2, H_3\}$. По аналогии с известными сетцентрическими системами управления разнородными информационными средствами, в сетцентрической системе мониторинга иерархии представляют собой разнородные средства мониторинга.

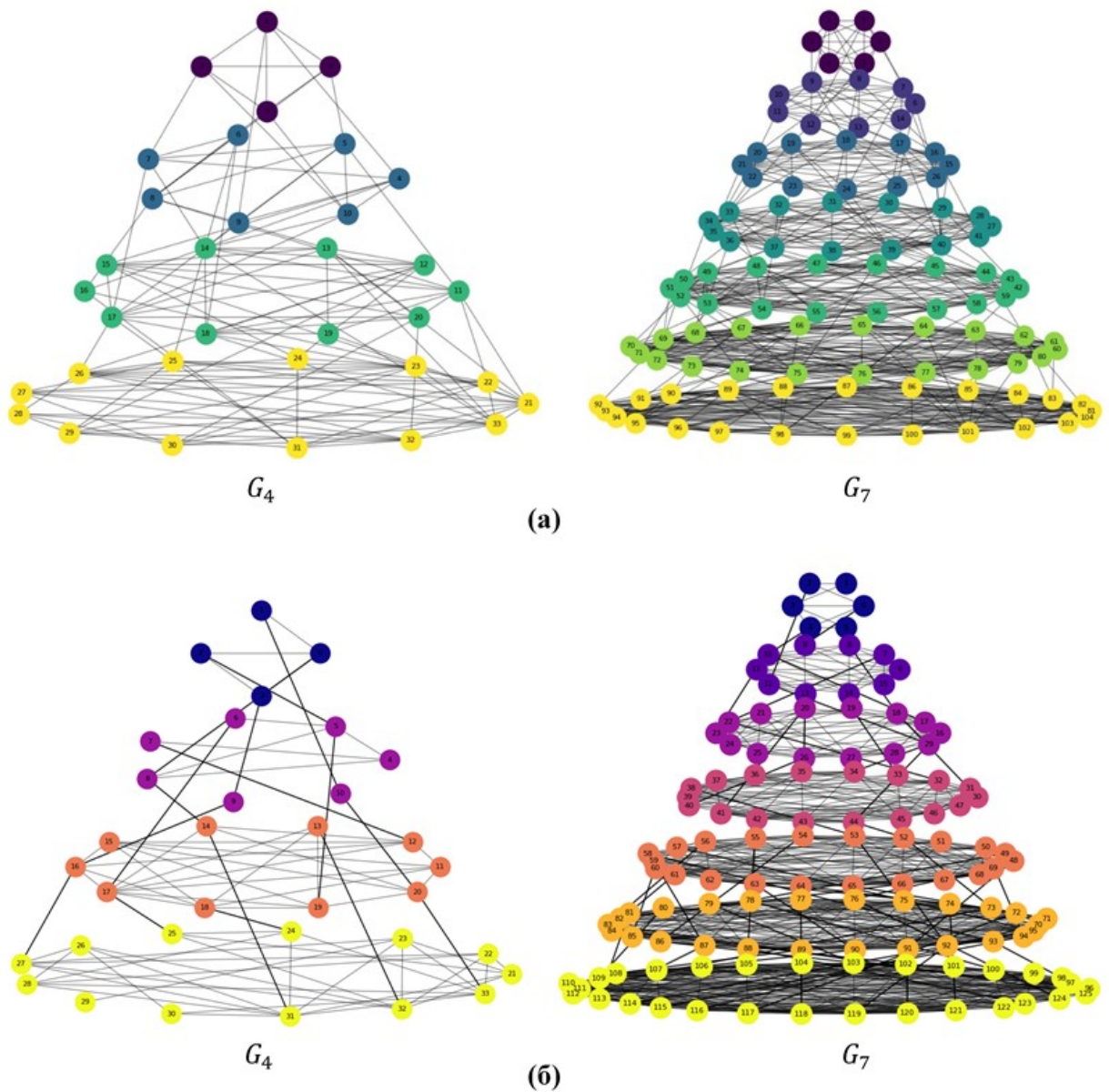
Предложенный аппарат предфрактальных графов позволяет формировать ранги и является одним из разновидностей иерархических графов или со свойствами иерархичности.



Источник: составлено автором.
Рисунок 4.11 – Сетецентрический граф G_3

На рисунке 4.12 представлены: (а) иерархические графы G_4 и G_7 ; (б) сетецентрические графы G_4 и G_7 . Как видно, у сетецентрических графов отсутствует смежность между иерархическими связями (ребрами) одинакового уровня, в то время как у иерархических графов такая смежность присутствует. Каждый из примеров иллюстрирует варианты построения конфигураций с заданными условиями и служит для решения задачи мониторинга в рамках метода реконфигурирования СДСС НПМ БР.

Далее предлагается пример построения иерархического графа конфигурации СДСС НПМ БР для количества уровней $L = 7$ с количеством вершин в пределах 100 ± 5 и количеством ребер 600 ± 5 . Количество вершин соответствует средствам мониторинга СДСС НПМ БР, а уровни (иерархии) задают правила их соподчиненности в структуре СДСС НПМ БР. Дополнительным правилом построения иерархического графа является равномерное увеличение количества вершин с первой до седьмой иерархии на 3 начиная с 6 вершин.



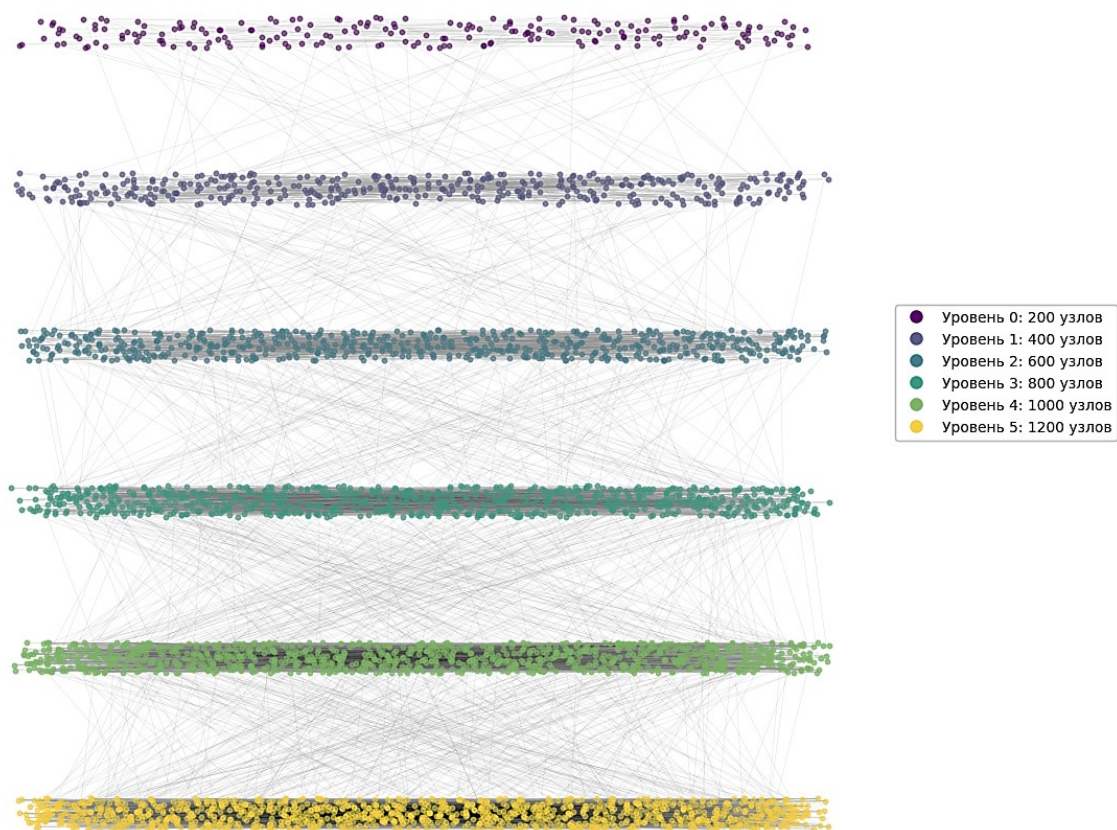
Источник: составлено автором.

Рисунок 4.12 – Иерархические и сетевые графы G_4 и G_7

На рисунке 4.13 представлен иерархический граф конфигурации СДСС НПМ БР, состоящий из 6 уровней, 4200 вершин и 81716 ребер. В статистике визуализированного графа указаны числа ребер внутри иерархий и межияерархических ребер.

На рисунке 4.14 представлены: (а) текущий граф конфигурации в виде иерархического графа $G_{\text{конф}} = G_7$, $|V_7| = 105$, $|E_7| = 598$; (б) граф, подвергшийся деструктивным воздействиям, $G_{\text{КВ}} = G'_7$, $|V'_7| = 105$, $|E'_7| = 419$; (в) таблица характеристик текущего графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ и $G_{\text{КВ}}$.

Иерархический граф (4200 вершин) - упрощенная визуализация



Статистика визуализированного графа

 Количество вершин: 4200
 Количество ребер: 81716
 Отношение ребер/вершины: 19.46

Детальная статистика по слоям:

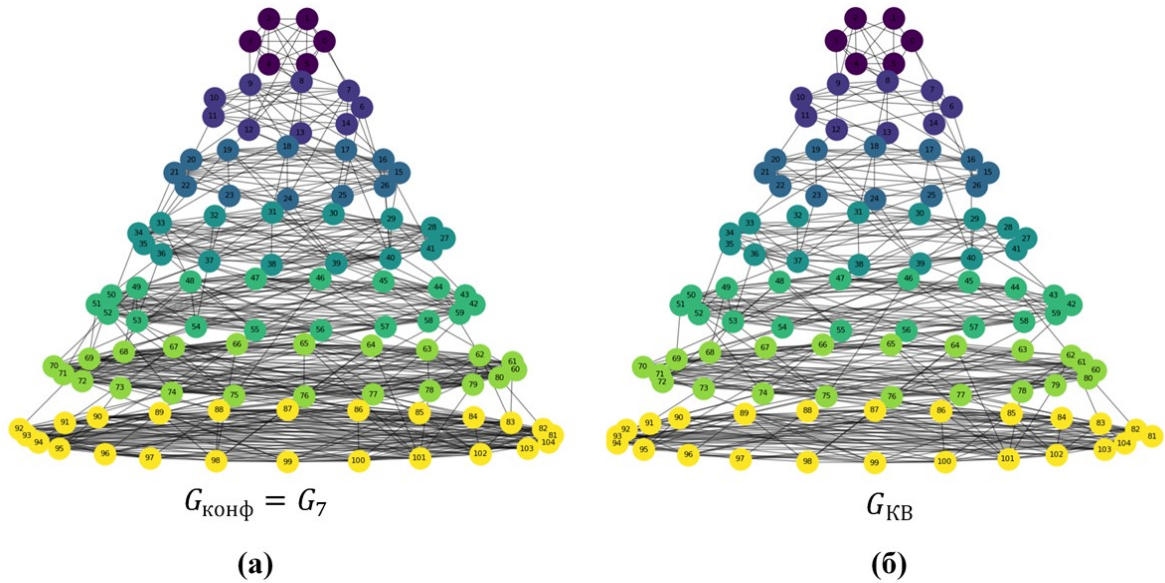
 Слой 0: 200 узлов, 796 внутренних ребер
 Слой 1: 400 узлов, 3192 внутренних ребер
 Слой 2: 600 узлов, 7188 внутренних ребер
 Слой 3: 800 узлов, 12784 внутренних ребер
 Слой 4: 1000 узлов, 19980 внутренних ребер
 Слой 5: 1200 узлов, 28776 внутренних ребер
 Между 0 и 1: 600 межслойных ребер
 Между 1 и 2: 1200 межслойных ребер
 Между 2 и 3: 1800 межслойных ребер
 Между 3 и 4: 2400 межслойных ребер
 Между 4 и 5: 3000 межслойных ребер

Источник: составлено автором.

Рисунок 4.13 – Иерархический граф конфигурации СДСС НПМ БР

В результате деструктивных воздействий было удалено 30% от всех ребер текущего графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ [291; 292]. В таблице характеристик представлено всего 10 метрик, из них для расчета

агрегированного топологического индекса выбраны 8 метрик: $m_1, m_2, \dots, m_8$. В столбцах $\tilde{m}_i(G_{\text{конф}})$ и $\tilde{m}_i(G_{\text{КВ}})$ приведены наблюдаемые значения метрик, то есть не нормализованные в единую шкалу, а абсолютные значения: количество вершин – 105/105, количество ребер – 598/419 и т.д. В столбцах $m_i(G_{\text{конф}})$ и $m_i(G_{\text{КВ}})$ приведены нормализованные значения метрик m_i .



		Метрики	$\tilde{m}_i(G_{\text{конф}})$	$\tilde{m}_i(G_{\text{КВ}})$	$m_i(G_{\text{конф}})$	$m_i(G_{\text{КВ}})$
1		Количество вершин	105	105	1	1
2	m_1	Количество ребер	598	419	1,000	0,701
3	m_2	Плотность	0,110	0,077	0,110	0,077
4	m_3	Связность	Да	Да	1,000	1,000
5	m_4	Центральность по близости	0,345	0,305	0,345	0,305
6	m_5	Кластеризация	0,347	0,265	0,347	0,265
7	m_6	Ассортативность по степени	0,300	0,244	0,300	0,244
8	m_7	Диаметр	7	8	1,000	0,857
9		Радиус	4	4	1,000	1,000
10	m_8	Транзитивность	0,332	0,241	0,332	0,241
0,5 ≤ ATI ≤ 1					0,554	0,461

(в)

Источник: составлено автором.

Рисунок 4.14 – Метрики граф конфигурации $G_{\text{конф}} = G_7$ и графа $G_{\text{КВ}}$

Для агрегированного топологического индекса заданы допустимые значения $0,5 \leq \text{ATI} \leq 1$ и равные значения весовых коэффициентов $\text{ATI} = \frac{1}{8}m_1 + \frac{1}{8}m_2 + \dots + \frac{1}{8}m_8$. Значения $\text{ATI}_{\text{конф}} = 0,554$ и $\text{ATI}_{\text{КВ}} = 0,461$

соответствуют значениям АТИ текущего графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ и подвергнутому деструктивным воздействиям $G_{\text{КВ}}$. Значение $\text{АТИ}_{\text{конф}} = 0,554$ находится в допустимых пределах $0,5 \leq \text{АТИ}_{\text{конф}} \leq 1$, а значение $\text{АТИ}_{\text{КВ}} = 0,461$ выходит за допустимые пределы $\text{АТИ}_{\text{КВ}} < 0,5$. Тогда СДСС, представленная графом $G_{\text{КВ}}$, перестает функционировать в штатном режиме и требует реконфигурирования посредством управляющих воздействий.

Термины *построение*, *генерация* и *порождение* графа в настоящей работе считаются тождественными и используются в соответствии с принятой в конкретной предметной или модельной средами. Также может использоваться термин *конструирование* – под которым понимается именно построение графа, в частности построение графа конфигурации, в теоретико-графовой терминологии.

Построение графов возможно также посредством алгоритмов на основе известных моделей Эрдеша-Реньи, Барабаши-Альберт, Боллобаша-Риордана и многих других представленных в библиотеке NetworkX в программной среде Python. Графы конфигураций на основе этих алгоритмов и методы реконфигурирования этих графов требуют отдельного изучения и выходят за рамки настоящего исследования [293; 294]. Следует отметить, что все известные, новые и перспективные алгоритмы генерации графов направлены на построение графов отдельных или специальных классов с заданными параметрами – свойствами и характеристиками. Результаты, полученные в настоящей работе, применимы ко всем указанным классам графов, а алгоритмы генерации могут оформляться в качестве отдельных процедур. Это касается и инструментария в частности оптимизации агрегированного топологического индекса.

Представленное описание построения графов и известные алгоритмы или методы предназначены для построения графов с заданными свойствами и характеристиками. Тогда задача построения графа конфигурации G с заданными свойствами M^k и характеристиками M представляется в виде (4.1):

$$Z_K(G) = \langle G, M, M^k, \dot{M} \rangle, \quad (4.1)$$

где $G = (V, E)$;

$M = \{m_i\}$, m_i – характеристики графа, в том числе структурно-функциональные и численные (количество вершин, ребер, ранги и пр.);

$M^k = \{m_i^k \in M\}$, $M^k \subseteq M$, $m_i^k = m_i$, M^k – свойства графа;

$\dot{M} = \{\dot{m}_i\}$, $\dot{m}_i$ – требования к характеристикам m_i и свойствам m_i^k .

В соответствии с задачей $Z_K(G_{\text{конф}})$ с помощью разработанной оригинальной методики построения конфигураций СДСС НПМ БР формируется начальный граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ с заданными свойствами $M^k = \{m_i^k\}$ и характеристиками $M = \{m_i\}$, а посредством методики формирования агрегированного топологического индекса для текущей конфигурации $G_{\text{конф}}$ формируется АТИ из метрик $M = \{m_i\}$ в пределах требований $\dot{M} = \{\dot{m}_i\}$.

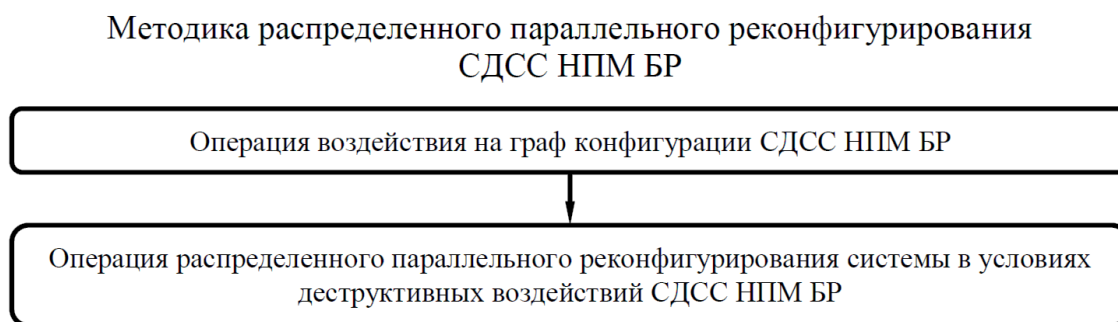
Таким образом, построенный граф конфигурации определяет начальное состояние СДСС с характеристиками в заданных пределах. Граф конфигурации как составная часть модели отражает структуру СДСС НПМ БР.

4.3 Методика реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Методика реконфигурирования является частью метода реконфигурирования СДСС НПМ БР в части изменения графа конфигурации для обеспечения требуемых значений АТИ и штатного функционирования системы в условиях деструктивных воздействий [295; 296].

Методика реконфигурирования обеспечивает функционирование СДСС НПМ БР в результате деструктивных воздействий посредством перенастройки теоретико-графовой модели в части изменения ее графа конфигурации. Методика как составная часть метода реконфигурирования в непосредственной связи с теоретико-графовой моделью обеспечивает жизненный цикл СДСС НПМ БР.

Методика реконфигурирования представлена следующими действиями: 1) операция воздействия (деструктивного, управляющего) на граф конфигурации СДСС НПМ БР и его влияние на агрегированный топологический индекс; 2) процедура и описание операции реконфигурирования СДСС НПМ БР в результате деструктивного воздействия. На рисунке 4.15 представлена схема методики реконфигурирования.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.15 – Схема методики распределенного параллельного реконфигурирования СДСС НПМ БР

Во второй главе предложена модель, которая состоит из трех укрупненных блоков: Блок 1. Структура СДСС НПМ БР; Блок 2. Модель распространения деструктивных воздействий СДСС НПМ БР; Блок 3. Модель разрушения СДСС НПМ БР. Методика реконфигурирования обеспечивает работу блока 2 и является составной частью метода реконфигурирования, представленным в настоящей главе.

Операции воздействия на граф конфигурации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Для описания операции реконфигурирования СДСС НПМ БР вначале приведем описание операции деструктивного воздействия на граф конфигурации, что также влияет на значения АТИ, представляющего состояние СДСС НПМ БР в текущий момент времени.

На текущий граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ воздействует граф воздействий $G_{\text{возд}} \subseteq G_{\text{конф}}$. Граф воздействий $G_{\text{возд}}$ определяет множество элементов –

вершин и ребер графа конфигурации $G_{\text{конф}}$, на которые направлено воздействие. Веса ребер и вершин определяют «силу» воздействия в количественном виде. Таким образом нумерация вершин и ребер $G_{\text{конф}}$ и $G_{\text{возд}}$ идентичная, что позволяет идентифицировать элементы на которые осуществляется воздействие. При этом веса элементов графа воздействий меньше весов соответствующих элементов текущего графа конфигурации $w(v, e \in G_{\text{возд}}) \leq w(v, e \in G_{\text{конф}})$. В случае если вес какого-то элемента графа воздействий равен весу соответствующего элемента графа конфигурации, означает полный выход из строя элемента системы. А в случае строгого неравенства $w(v, e \in G_{\text{возд}}) < w(v, e \in G_{\text{конф}})$, вес элемента графа конфигурации уменьшается на вес соответствующего элемента графа воздействия. Также для простоты принимаем структурный изоморфизм ${}_0G_{\text{возд}} \simeq G_{\text{конф}}$, где для элементов $G_{\text{возд}}$, не оказывающих воздействие на $G_{\text{конф}}$, веса в ${}_0G_{\text{возд}}$ принимаются равные нулю. Последовательность графов конфигураций и графов воздействий в топологическом времени обозначается соответственно $G_{\text{конф}}^t$ и $G_{\text{возд}}^t$.

Операция воздействия записывается в виде (4.2) [297; 298]:

$$G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \rightarrow G_{\text{КВ}}^t, \quad (4.2)$$

где $G_{\text{конф}}^t$ – взвешенный граф конфигурации в момент времени t ;

$G_{\text{возд}}^t = (V_{\text{возд}}^t, E_{\text{возд}}^t)$ – взвешенный граф воздействий в момент времени t ;

$G_{\text{КВ}}^t$ – граф, полученный после операции воздействия.

Коротко операция воздействия $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \rightarrow G_{\text{КВ}}^t$ читается как « $G_{\text{конф}}^t$ при условии $G_{\text{возд}}^t$ получаем $G_{\text{КВ}}^t$ » или «при условии $G_{\text{возд}}^t$ на $G_{\text{конф}}^t$ получаем $G_{\text{КВ}}^t$ ». Граф воздействий $G_{\text{возд}}^t$ является подграфом текущей конфигурации: $G_{\text{возд}}^t \subseteq G_{\text{конф}}^t$.

На рисунке 4.16 представлена операция воздействия: (а) граф воздействия $G_{\text{возд}}$ и граф ${}_0G_{\text{возд}}$, соответствующий размерности $G_{\text{конф}}$; (б) текущий граф конфигурации $G_{\text{конф}} = G_4$ и операция воздействия

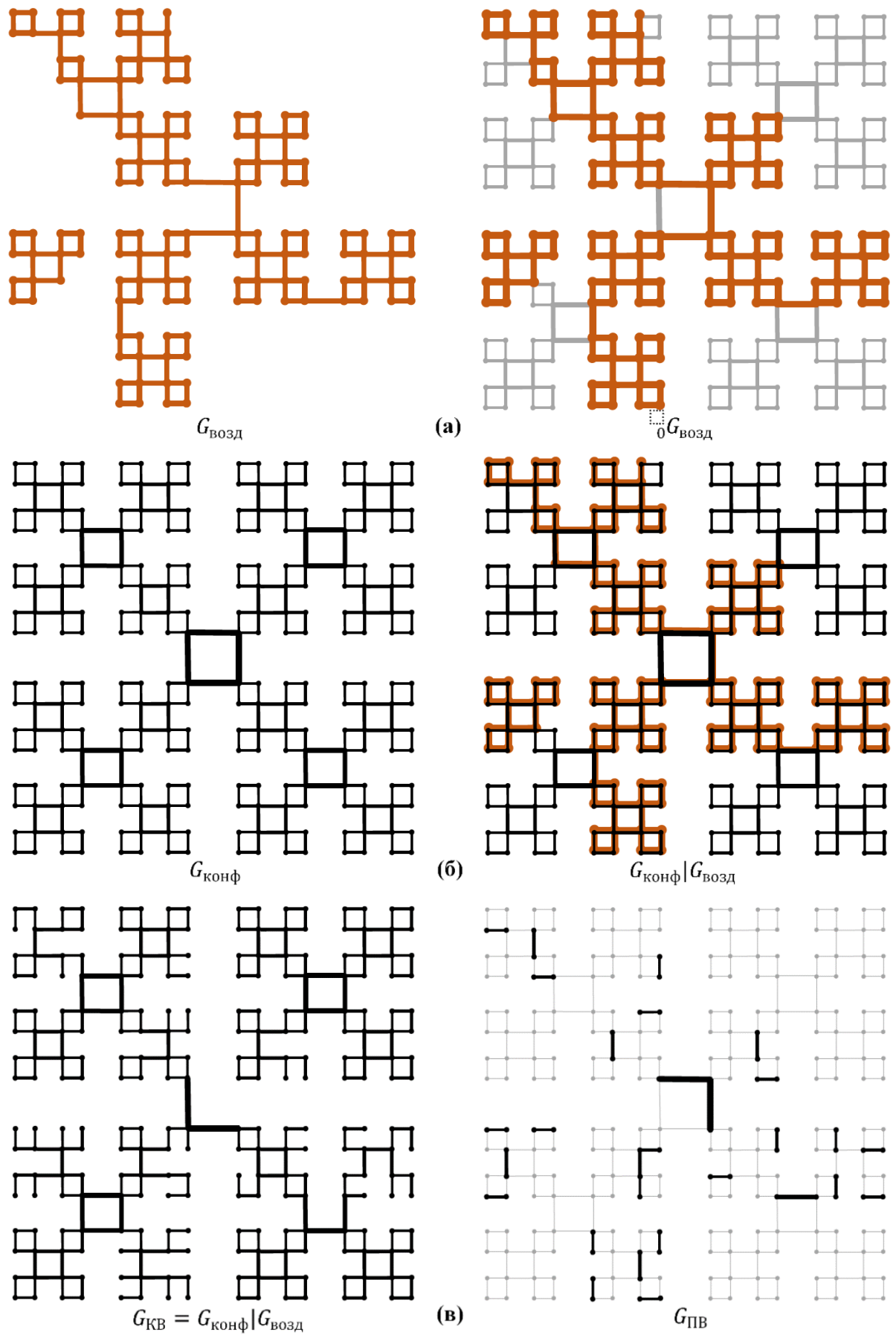
$G_{\text{конф}}|G_{\text{возд}}$ – визуально это видно как наложение $G_{\text{возд}}$ на $G_{\text{конф}}$; (в) граф $G_{\text{КВ}} = G_{\text{конф}}|G_{\text{возд}}$ и *граф повреждений* $G_{\text{ПВ}}$ (приведенный граф ${}_0G_{\text{ПВ}}$), полученные после воздействия. Следует отметить, что граф *повреждений* $G_{\text{ПВ}}$ состоит из вышедших из строя ребер, а также инцидентных им вершин – даже тех, которые продолжают функционировать $G_{\text{КВ}}$. Вершины сохраняются в $G_{\text{ПВ}}$ для того, чтобы не нарушать определение графа – ребра в графе не могут существовать без инцидентных им вершин.

Для выполнения операции воздействия применяются матрицы смежности $A_{\text{конф}}$, ${}_0A_{\text{возд}}$, ${}_0A_{\text{КВ}}$ соответствующих графов $G_{\text{конф}}$, ${}_0G_{\text{возд}}$, ${}_0G_{\text{КВ}}$ [299; 300]. Матрица $A_{\text{конф}}$ содержит в себе веса вершин и ребер $w_{ij}^{\text{К}}$, по диагонали указываются веса вершин $w_i^{\text{К}} = w_{ii}^{\text{К}}$. Если вес вершины равен нулю, то веса инцидентных ей ребер также равны нулю. Такой же принцип верен и для других матриц ${}_0A_{\text{возд}}$ и ${}_0A_{\text{КВ}}$.

Операция воздействия $G_{\text{конф}}|G_{\text{возд}}$ в матричном виде представляется как $A_{\text{конф}}|{}_0A_{\text{возд}} = {}_0A_{\text{КВ}}$ и означает $w_{ij}^{\text{КВ}} = w_{ij}^{\text{К}} - w_{ij}^{\text{В}}$ – поэлементное вычитание весов. Если $w_{ij}^{\text{В}} \geq w_{ij}^{\text{К}}$, то $w_{ij}^{\text{КВ}} = 0$.

В настоящей работе не рассматриваются отрицательные веса, но в общем виде веса могут быть отрицательными и отражать запас потенциала элемента СДСС НПМ БР. Следует отметить, что для матричного представления операции воздействия используются матрицы, приведенные к размерности текущего графа конфигурации: ${}_0A_{\text{возд}}$ и ${}_0A_{\text{КВ}}$. При этом для всех матриц имеются дублирующие значения весов – так как используется неориентированный граф. В случае ориентированного графа, веса разнонаправленных дуг могут различаться. Далее также не рассматриваются графы, содержащие петли, для этого необходимо провести дополнительное исследование и использовать добавление псевдовершин при переводе графа с петлями в состояние графа без петель.

Рассмотрим операцию воздействия на граф конфигурации СДСС НПМ БР на конкретном примере. Во второй главе представлена формализация жизненного цикла СДСС НПМ БР и этап ее конфигурирования – построение графа конфигурации.

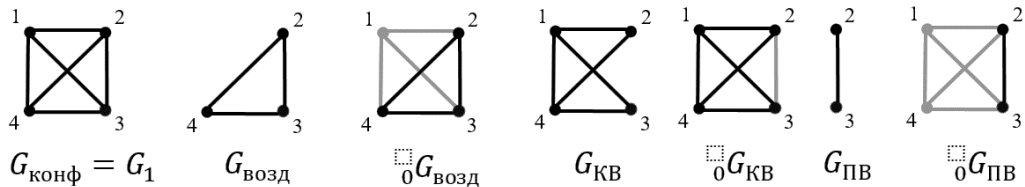


Источник: составлено автором.

Рисунок 4.16 – Граф конфигурации G_{Konf} и граф воздействий G_{Vozd}

На рисунке 4.17 представлены: текущий граф конфигурации $G_{\text{конф}} = G_1$, где G_1 – полный четырех-вершинный граф, для которого задана нумерация вершин $i = 1, 2, \dots, 4$ и ребер ij : $i, j = 1, 2, \dots, 4$; граф воздействий $G_{\text{возд}}$ и граф воздействий ${}_0G_{\text{возд}}$, приведенный к размерности $G_{\text{конф}}$; граф $G_{\text{КВ}}$ – итоговый граф, полученный после операции воздействия, приведенный граф ${}_0G_{\text{КВ}}$; граф повреждений $G_{\text{ПВ}}$ и приведенный граф повреждений ${}_0G_{\text{ПВ}}$. Операция воздействия $A_{\text{конф}} | {}_0A_{\text{возд}} = {}_0A_{\text{КВ}}$ представлена в матричном виде.

$$\begin{pmatrix} w_1^K & w_{12}^K & w_{13}^K & w_{14}^K \\ w_{21}^K & w_2^K & w_{23}^K & w_{24}^K \\ w_{31}^K & w_{32}^K & w_3^K & w_{34}^K \\ w_{41}^K & w_{42}^K & w_{43}^K & w_4^K \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2^B & w_{23}^B & w_{24}^B \\ 0 & w_{32}^B & w_3^B & w_{34}^B \\ 0 & w_{42}^B & w_{43}^B & w_4^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1^{KB} & w_{12}^{KB} & w_{13}^{KB} & w_{14}^{KB} \\ w_{21}^{KB} & w_2^{KB} & 0 & w_{24}^{KB} \\ w_{31}^{KB} & 0 & w_3^{KB} & w_{34}^{KB} \\ w_{41}^{KB} & w_{42}^{KB} & w_{43}^{KB} & w_4^{KB} \end{pmatrix}.$$



$$A(G_{\text{конф}}) = A_{\text{конф}}$$

	1	2	3	4
1	w_1^K	w_{12}^K	w_{13}^K	w_{14}^K
2	w_{21}^K	w_2^K	w_{23}^K	w_{24}^K
3	w_{31}^K	w_{32}^K	w_3^K	w_{34}^K
4	w_{41}^K	w_{42}^K	w_{43}^K	w_4^K

$$A({}_0G_{\text{возд}}) = {}_0A_{\text{возд}}$$

	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	w_2^B	w_{23}^B	w_{24}^B
3	0	w_{32}^B	w_3^B	w_{34}^B
4	0	w_{42}^B	w_{43}^B	w_4^B

$$A({}_0G_{\text{КВ}}) = {}_0A_{\text{КВ}}$$

	1	2	3	4
1	w_1^{KB}	w_{12}^{KB}	w_{13}^{KB}	w_{14}^{KB}
2	w_{21}^{KB}	w_2^{KB}	0	w_{24}^{KB}
3	w_{31}^{KB}	0	w_3^{KB}	w_{34}^{KB}
4	w_{41}^{KB}	w_{42}^{KB}	w_{43}^{KB}	w_4^{KB}

$$A({}_0G_{\text{ПВ}}) = {}_0A_{\text{ПВ}}$$

	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	0	$w_{23}^{\text{ПВ}}$	0
3	0	$w_{32}^{\text{ПВ}}$	0	0
4	0	0	0	0

Источник: составлено автором.

Рисунок 4.17 – Операция воздействия $G_{\text{конф}} | G_{\text{возд}}$

В табличном виде представлены значения весов соответствующих графов, участвующих в операции воздействия. Воздействие осуществляется только на вершины 2,3,4 и связывающие их ребра.

В целом снижение весовых значений – функциональных характеристик СДСС НПМ БР не приводит к нарушению связности графа конфигурации $G_{\text{конф}}$, каждая вершина достижима из любой другой вершины. Но воздействие на ребро 23 снижает вес ребра до нуля, фактически разрушая связь. В матрице ${}_0A_{\text{КВ}}$ для соответствующих элементов указаны нулевые значения. В матрице ${}_0A_{\text{ПВ}}$, отражающей граф повреждений ${}_0G_{\text{ПВ}}$, все элементы равны нулю кроме ребер 23 и 32. В том числе веса вершин 2 и 3 также равны нулю, но изображая граф повреждений, вершины инцидентные ребру 23 (или 32) указываются, чтобы не нарушать определение графа. Граф повреждений ${}_0G_{\text{ПВ}}$ отражает существенные повреждения, приводящие к структурному разрушению – в частности к удалению ребер. При структурном разрушении вершины, веса всех инцидентных ей ребер также приравниваются нулю.

В результате деструктивного воздействия на $G_{\text{конф}}$ и ухудшения значения $\text{АТИ}_{\text{конф}}$ выходящее за пределы требований, необходимо вернуть значение $\text{АТИ}_{\text{КВ}}$ в допустимые пределы требований. Для возвращения весов ребер или вершин к первоначальным значениям необходимо применить управляющее воздействие на текущий граф $G_{\text{КВ}}^t$ в виде (4.3):

$$G_{\text{КВ}}^t \xrightarrow{\text{УВ}} G_{\text{конф}}^{t+1} \Leftrightarrow G_{\text{КВ}}^t | G_{\text{УВ}}^t = G_{\text{конф}}^{t+1}, \quad (4.3)$$

где $G_{\text{КВ}}^t$ – текущий граф, после деструктивного воздействия на граф конфигурации $G_{\text{конф}}^t$;

$\xrightarrow{\text{УВ}}$ – операция управляющего воздействия;

$G_{\text{УВ}}^t$ – граф управляющего воздействия;

$G_{\text{конф}}^{t+1}$ – граф конфигурации на момент времени $t + 1$, соответствующий заданным требованиям АТИ и соответствующих составляющих его метрик.

Возможно применение управляющих воздействий равных деструктивным воздействиям для улучшения характеристик и соответственно приданию АТИ допустимого значения в заданных пределах $G_{\text{КВ}}^t | G_{\text{УВ}}^t$, где

$G_{УВ}^t = G_{Возд}^t$. В матричном виде ${}_0A_{KB}|{}_0A_{УВ} = A_{конф}$ или ${}_0A_{KB}^t|{}_0A_{УВ}^t = A_{конф}^{t+1}$, используя индексы времени t :

$$\begin{pmatrix} w_1^{KB} & w_{12}^{KB} & w_{13}^{KB} & w_{14}^{KB} \\ w_{21}^{KB} & w_2^{KB} & 0 & w_{24}^{KB} \\ w_{31}^{KB} & 0 & w_3^{KB} & w_{34}^{KB} \\ w_{41}^{KB} & w_{42}^{KB} & w_{43}^{KB} & w_4^{KB} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2^{УВ} & w_{23}^{УВ} & w_{24}^{УВ} \\ 0 & w_{32}^{УВ} & w_3^{УВ} & w_{34}^{УВ} \\ 0 & w_{42}^{УВ} & w_{43}^{УВ} & w_4^{УВ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1^K & w_{12}^K & w_{13}^K & w_{14}^K \\ w_{21}^K & w_2^K & w_{23}^K & w_{24}^K \\ w_{31}^K & w_{32}^K & w_3^K & w_{34}^K \\ w_{41}^K & w_{42}^K & w_{43}^K & w_4^K \end{pmatrix}.$$

В общем случае значения элементов $w_{ij}^{УВ}$ могут быть как положительными так и отрицательными. В настоящей работе рассматриваем нормированные значения весов, если не оговаривается иное.

Применение управляющего воздействия равнозначного деструктивному воздействию для восстановления характеристик СДСС НПМ БР не всегда целесообразно с точки зрения затрат усилий и не всегда может приводить к полному восстановлению первоначального состояния. Например, при выходе из строя отдельных элементов системы – средств мониторинга (сенсоров) требуется реконфигурирование системы (структурное, структурно-функциональное, функциональное).

Под *реконфигурированием СДСС НПМ БР* понимается процедура изменения структурно-функционального состояния СДСС НПМ БР посредством операции управляющего воздействия на текущий граф конфигурации с целью изменения структурно-функциональных характеристик в соответствии с заданными требованиями.

В широком понимании графы G_{KB}^t также являются графами конфигурации, но с нарушением заданных пределов метрик или АТИ. А процедура реконфигурирования осуществляется под управляющими или деструктивными воздействиями. В случае деструктивного воздействия происходит *деструктивное реконфигурирование* или *поражение* СДСС НПМ БР, в то время как управляющее воздействие приводит к *управляемому реконфигурированию* или *восстановлению* СДСС НПМ БР

На рисунке 4.17 была представлена операция деструктивного воздействия $G_{конф}^t|G_{Возд}^t = G_{KB}^t$, что привело к состоянию G_{KB}^t СДСС НПМ БР.

Начальный граф конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ представляет собой предфрактальный граф G_4 , порожденный затравкой $H = (W, Q)$, $|W| = n = 4$, $|Q| = q = 4$. При этом смежность старых ребер одинакового ранга сохраняется, а старые ребра разного ранга не пересекаются. Для графа конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ заданы метрики $M = (\tilde{m}_1, \tilde{m}_2)$, где $\tilde{m}_1 \in [0; 20]$ – количество вершин кратного центра, инцидентных ребрам первого или второго ранга; $\tilde{m}_2 \in [0; 4]$ – количество компоненты связности. И ограничения их значений – в виде требований $\dot{M} = [\check{M}; \hat{M}] = ([\check{m}_1; \hat{m}_1] = [0; 5], [\check{m}_2; \hat{m}_2] = [0; 1])$: $0 \leq \tilde{m}_1 \leq 5$ и $0 \leq \tilde{m}_2 \leq 1$. Составим АТИ в виде $\text{АТИ} = 0,5m_1 + 0,5m_2$, где m_1 и m_2 нормализованные метрики относительно их множеств допустимых значений:

$$m_1 = \frac{\tilde{m}_1}{\max \tilde{m}_1}, m_1 \in [0; 1];$$

$$m_2 = \frac{\tilde{m}_2}{\max \tilde{m}_2}, m_2 \in [0; 1].$$

Для функционирования СДСС НПМ БР в штатном режиме задано ограничение АТИ: $0,20 \leq \text{АТИ} \leq 0,25$.

На начальный момент времени $t = 0$ метрики $\tilde{m}_1 = 5$, $\tilde{m}_2 = 1$, тогда $\text{АТИ}_{t=0} = 0,5m_1 + 0,5m_2 = 0,5 \cdot \frac{5}{20} + 0,5 \cdot \frac{1}{4} = 2 \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{4} = 0,250$.

В результате деструктивного воздействия $G_{\text{возд}}^t \subseteq G_4$ изменились характеристики текущего графа конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ СДСС и составили $\tilde{m}_1 = 5$, $\tilde{m}_2 = 1$. Тогда значение АТИ составляет:

$$\text{АТИ}_{t+1=1} = 0,5m_1 + 0,5m_2 = 0,5 \cdot \frac{5}{20} + 0,5 \cdot \frac{2}{4} = 3 \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{4} = 0,375,$$

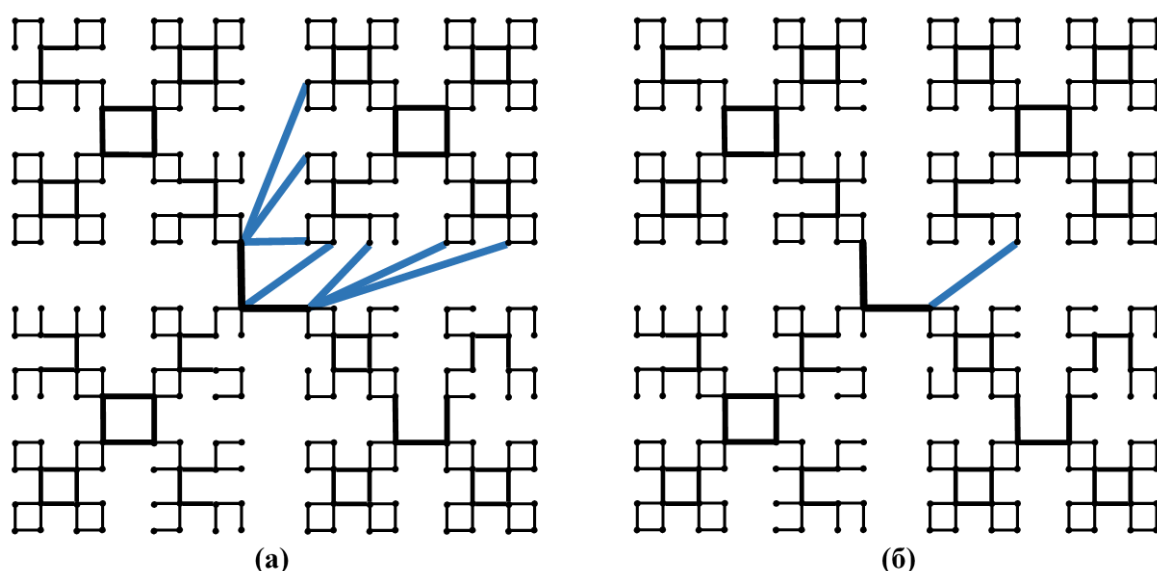
которое выходит за пределы отрезка $0,20 \leq \text{АТИ} \leq 0,25$. Это означает, что СДСС перестает функционировать в штатном режиме и требуются управляющие воздействия для восстановления СДСС НПМ БР или возвращения СДСС НПМ БР в состояние штатного функционирования. Или по-другому требуется реконфигурирование СДСС НПМ БР для восстановления его штатного функционирования.

В случае, если возможно восстановление первоначального состояния $G_{\text{конф}}^t$, применяется операция управляющего воздействия с помощью графа $G_{\text{УВ}}^t = G_{\text{возд}}^t: G_{\text{КВ}}^t | G_{\text{УВ}}^t = G_{\text{конф}}^{t+1}$, тогда $G_{\text{конф}}^{t+1} = G_{\text{конф}}^t$.

В противном случае целесообразно применение минимально возможного управляющего воздействия, возвращающего СДСС НПМ БР в состояние штатного функционирования, где $0,20 \leq ATI \leq 0,25$.

Требуется сохранения свойств «смежность старых ребер одинакового ранга сохраняется» и «старые ребра разного ранга не пересекаются», а также восстановление связности графа G_{KB}^t в соответствии $0,20 \leq ATI \leq 0,25$.

На рисунке 4.18 синим цветом указаны ребра, каждое из которых может выступить в качестве управляющего воздействия: а) любое ребро смежное с одного конца ребрам первого ранга и с другого конца инцидентно вершинам второй отделившейся компоненты связности; б) выбрано одно из ребер в качестве управляющего воздействия G_{UB}^t .



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.18 – Варианты управляющего воздействия G_{UB}^t

Таким образом применение $G_{KB}^t | G_{UB}^t = G_{конф}^{t+1}$ приводит к реконфигурированию СДСС НПМ БР и новому графу конфигурации $G_{конф}^{t+1}$, представленному на рисунке 4.13 в правой части.

Применяемая операция воздействия на граф конфигурации СДСС НПМ БР выполняется в рамках разработанной теоретико-графовой модели. Граф конфигурации представляет собой структурное представление модели СДСС НПМ БР.

Значение метрик на момент времени $t + 1$ равно $\tilde{m}_1 = 5$, $\tilde{m}_2 = 1$, тогда значение $ATI_{t+1} = 0,5m_1 + 0,5m_2 = 0,5 \cdot \frac{5}{20} + 0,5 \cdot \frac{1}{4} = 2 \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{4} = 0,250$ вернулось в пределы заданного ограничения $0,20 \leq ATI \leq 0,25$.

Ранее оговаривалось, что деструктивные воздействия могут быть искусственного и естественного характера (происхождения). На примере рисунка 4.18 деструктивным воздействиям подверглись ребра графа конфигурации, при этом вершины – элементы СДСС НПМ БР, соответствуют средствам мониторинга (сенсорам, датчикам и ретрансляторам).

Ответить на вопрос являются ли деструктивные воздействия искусственными или естественными по обратной связи от средств мониторинга проблематично [301; 302]. Тем не менее можно задать характер воздействия (4.4-4.5):

$$P_{BC} = \frac{|E_{возд}|}{|E_{конф}|}, 0 \leq P_{BC} \leq 1, \quad (4.4)$$

$$P_{CM} = \frac{|V_{возд}|}{|V_{конф}|}, 0 \leq P_{CM} \leq 1, \quad (4.5)$$

где P_{BC} – вероятность воздействия на внешнюю среду;

P_{CM} – вероятность воздействия на средства мониторинга;

$G_{конф} = (V_{конф}, E_{конф})$ – граф конфигурации до воздействия;

$G_{возд} = (V_{возд}, E_{возд})$ – граф воздействия.

Рассмотрим следующие сценарии воздействия:

1) $P_{BC} > 0$ и $P_{BC} > P_{CM}$ – тогда выдвигается предположение о преимущественном воздействии на внешнюю среду;

2) $P_{CM} > 0$ и $P_{CM} > P_{BC}$ – тогда выдвигается предположение о преимущественном воздействии на средства мониторинга;

3) $P_{BC} > 0$, $P_{CM} > 0$ и $P_{BC} = P_{CM}$ – тогда выдвигается предположение о гибридном воздействии и на внешнюю среду и на средства мониторинга.

Под воздействиями на внешнюю среду понимаются воздействия, влияющие на каналы связи, часто беспроводные (радио-, инфракрасные,

сотовые и др.). Под воздействиями на средства мониторинга понимаются воздействия на сенсоры (датчики, центры, пункты, узлы и другие компоненты).

Например, электромагнитные бури могут снижать качество радиосвязи также, как и целенаправленные действия радиоэлектронной борьбы. Или крупная природная катастрофа (пожар, наводнение и т.п.) могут выводить из строя средства мониторинга также, как и целенаправленные действия по уничтожению средств мониторинга [303].

Введем следующие категории воздействия:

если $P_{BC} > 0,5$ и/или $P_{CM} > 0,5$ – *катастрофические* воздействия;

если $0,3 \leq P_{BC} \leq 0,5$ и $0,3 \leq P_{CM} \leq 0,5$ – *значительные* воздействия;

если $0,3 < P_{BC}$ и $0,3 < P_{CM}$ – *незначительные* воздействия.

В случае $|G_{\text{возд}}| = 1$, то есть граф воздействия состоит из одной связной компоненты, можно говорить о *локальном* воздействии. В противном случае $|G_{\text{возд}}| > 1$, когда граф воздействия состоит из многих компонент связности – воздействие *массовое* или *множественное*.

Рассматривая воздействия в динамике, если $G_{\text{возд}}^t = G_{\text{возд}}^{t+1}$, то воздействия *целенаправленные*, в противном случае если $G_{\text{возд}}^t \neq G_{\text{возд}}^{t+1}$ – воздействия *разнонаправленные*. Разнонаправленные воздействия могут быть *случайными* или распределены по некоторому закону. Под операциями сравнения $G_{\text{возд}}^t = G_{\text{возд}}^{t+1}$ и $G_{\text{возд}}^t \neq G_{\text{возд}}^{t+1}$ понимается структурное совпадение или различие без учета весовых значений ребер и вершин, если не оговаривается иное.

Представленные выше определения воздействий имеют строгие условия сравнения. В настоящей работе не рассматриваются другие качественные сравнения, хотя в практике применения несомненно следует их рассматривать. Например, для вычисления $P_{BC} = \frac{|E_{\text{возд}}|}{|E_{\text{конф}}|}$ требуется информация о графе воздействия, но на практике такую информацию не всегда можно получить. Тогда применяется информация о графе $G_{\text{ПВ}} = (V_{\text{ПВ}}, E_{\text{ПВ}})$, который

содержит информацию об элементах вышедших из строя или по-другому информацию о поврежденных элементах, доступной системе: $P_{BC} = \frac{|E_{ПВ}|}{|E_{конф}|}$.

Другой пример о целенаправленных воздействиях, когда не требуется полное совпадение графов воздействий $G_{возд}^t$ и $G_{возд}^{t+1}$, а с некоторым уровнем $\geq 0,85$.

Операции деструктивного воздействия и реконфигурирования (управляющего воздействия) графов конфигураций СДСС НПМ БР, представленные в виде теоретико-графовых операций, корректно отражаются последовательностью изменений – динамической траекторией в соответствии с аппаратом теории графов, а конкретнее – динамической теории графов [304; 305].

Частная методика распределенного параллельного реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий

Вычислительная сложность теоретико-графовых задач растет вместе с размерностью графа конфигурации, а в случае деструктивных воздействий и ограничением времени на реконфигурирование и восстановление заданных параметров СДСС НПМ БР необходимо применять усовершенствованные методы в частности распределенное по ресурсам и параллельное во времени реконфигурирование графа конфигурации [306; 307].

Далее предлагается частная методика распределенного параллельного реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий. Реконфигурирование необходимо осуществлять таким образом, чтобы сохранять заданные свойства и характеристики графа конфигураций СДСС НПМ БР.

Одной из важнейших характеристик является связность графа конфигурации. В условиях деструктивных воздействий связность может нарушаться, тогда граф конфигурации разбивается на несколько несвязных между собой компонент. Нарушение связности приводит также к прекращению информационного обмена между средствами мониторинга, что

является препятствием для передачи информации – в целом все это препятствует выполнению задачи мониторинга.

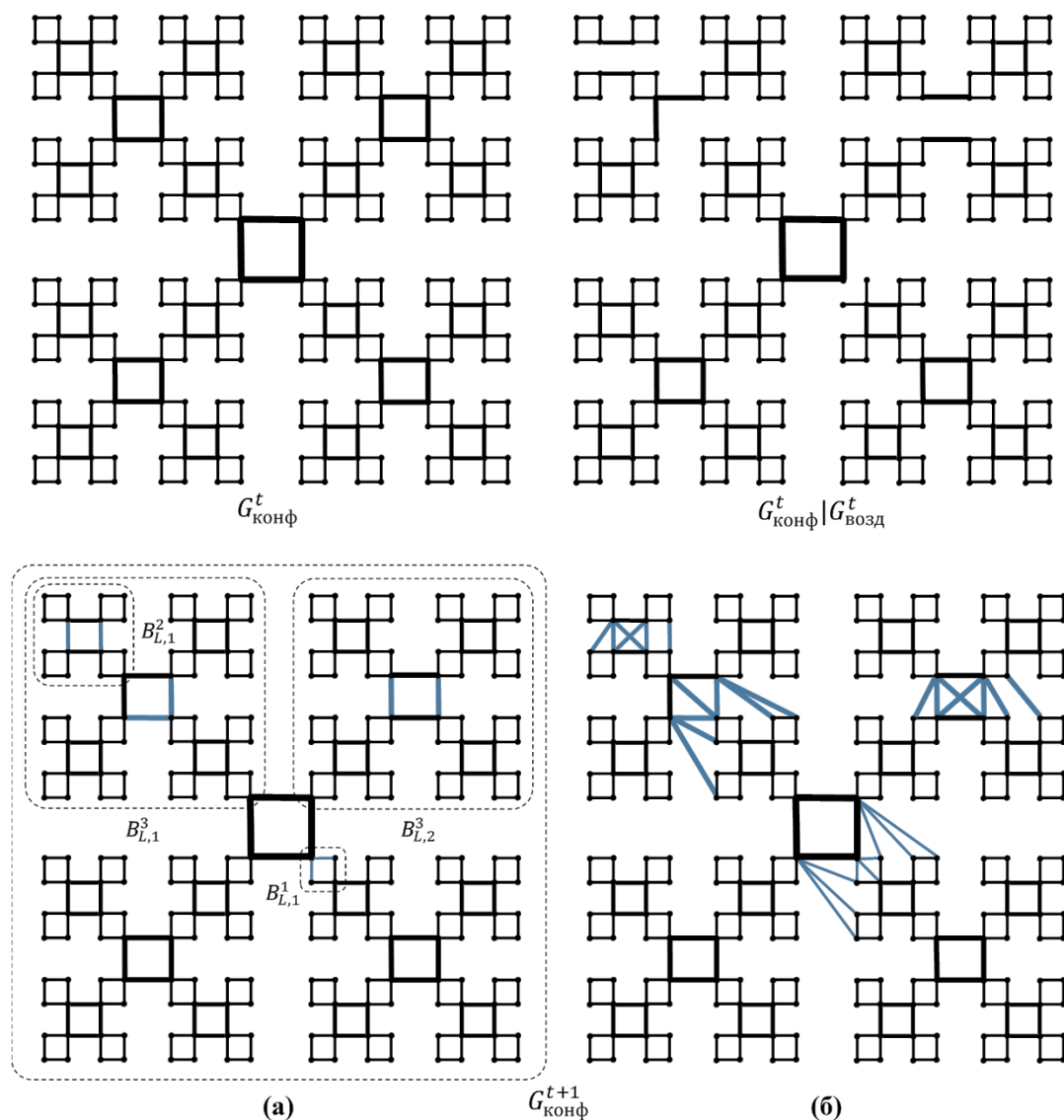
Построение графов конфигураций с заданными свойствами, а именно – на основе предфрактальных, иерархических графов и графов со свойствами кластеризации, позволяет в процессе функционирования СДСС НПМ БР использовать также эти свойства для ускорения обработки графов и снижения сложности задач. Сложности задачи на графе конфигурации пропорционально зависит от количества узлов – средств мониторинга. Для ряда задач даже небольшое число узлов – невозможно найти решение за полиномиальное время, тем более это касается задач класса NP. Например, задача выделения гамильтонова цикла для 15 узлов (сенсоров) невыполнима за приемлемое время и составляет $15!$ – что более трлн. операций. В этом смысле для больших сетей 1000 и более узлов, задача становится неразрешимой за приемлемое для выполнения мониторинга время.

Метод реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий предназначен для сохранения функционирования СДСС НПМ БР в заданных параметрах в соответствии с задачей мониторинга – посредством динамического изменения графа конфигурации и восстановления структурно-функциональных характеристик, то есть состояния СДСС НПМ БР в требуемых пределах.

Рассмотрим граф конфигурации $G_{\text{конф}}^t = G_4$ – являющийся предфрактальным графом с указанными свойствами самоподобия и иерархичности, отражающие структуру многоуровневых СДСС. На рисунке 4.19 представлен граф конфигурации $G_{\text{конф}}^t$, результат деструктивного воздействия $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t \rightarrow G_{\text{КВ}}^t$ и два варианта реконфигурации: (а) использование свойств предфрактального графа G_4 ; (б) классический подход с применением перебора решений.

В результате воздействия $G_{\text{возд}}^t$ на граф конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ получен граф $G_{\text{КВ}}^t$, в котором нарушена связность, что нарушает информационный обмен между средствами мониторинга, значительно ухудшает значения АТИ

и в целом препятствуем выполнению задачи мониторинга СДСС. Метод динамического реконфигурирования предназначен для возвращения допустимых значений АТИ, посредством восстановления связности графа конфигурации. Граф G_{KB}^t состоит из четырех связных компонент. Рассмотрим оба варианта реконфигурации подробнее.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.19 – Формальное представление операций деструктивного воздействия и восстановления графа конфигурации СДСС НПМ БР в рамках метода реконфигурирования

(а) Используя свойства предфрактального графа – рассматриваются блоки рангов (уровней подграфов), в которых разрушение ребер привело к нарушению связности и появлению отдельных компонент графа. Для

восстановления связности графа предлагается следующая процедура. Вначале рассматриваются блоки первого уровня B_L^1 , в которых имеются нарушения связности — это единственный блок $B_{L,1}^1$. Восстанавливается связность, добавляя ребра четвертого ранга. Далее рассматриваются блоки второго уровня B_L^2 , с нарушением связность имеется только один блок $B_{L,1}^2$. Восстанавливается связность, добавляя ребра третьего ранга. Рассматриваются блоки третьего уровня B_L^3 , с нарушением связность имеется два блока $B_{L,1}^3$ и $B_{L,2}^3$. Восстанавливается связность, добавляя ребра второго ранга. Таким образом связность графа $G_{\text{КВ}}^t$ восстановлена, получен граф конфигурации $G_{\text{конф}}^{t+1}$.

Следует отметить, что на каждом шаге восстановления связности использовался полный набор ранее разрушенных связей. Но возможно восстанавливать минимальным набором ребер. В текущем примере достаточно добавления только одного ребра для восстановления связности на соответствующих блоках. При это добавление ребер на разных блоках может проводиться независимо друг от друга и параллельно, что позволяет снижать время реконфигурирования СДСС. Другим преимуществом такого восстановления является возможность реконфигурирования в процессе деструктивных воздействий — вне зависимости от новых деструктивных воздействий процесс реконфигурирования продолжается в непрерывном режиме, так как достаточно знания о локальных нарушениях графа конфигурации.

(б) Если рассматривать граф $G_{\text{КВ}}^t$ без принадлежности к какому-то классу (предфрактальных, иерархических, со свойствам кластеризации), то необходимо решать две последовательные задачи — находить нарушения связности, далее подбирать ребра и проверять восстановление связности. При этом распараллеливание данного процесса не является очевидным и требует решения отдельной задачи распределения вычислительных ресурсов. Вторым недостатком является добавление ребер для восстановления связности произвольным способом.

На рисунке 4.19 показаны разные варианты добавления ребер. В этом случае нарушаются свойства начального графа, такие как «смежность старых

ребер одного ранга сохраняется», «старые ребра разных рангов не пересекаются», что может также негативно сказаться на живучести СДСС НПМ БР – свойствах устойчивости, целостности, надежности.

Методика реконфигурирования включает в себя две операции – операцию воздействия и операцию распределенного параллельного реконфигурирования системы в условиях деструктивных воздействий.

Далее описывается операция распределенного параллельного реконфигурирования СДСС НПМ БР для специальных графов (предфрактальные, иерархические, кластерные) в развитие предложенного примера варианта (а) на рисунке 4.19. Под термином подграф – понимаются соответственно блоки, иерархии и кластеры, применяемые для снижения трудоемкости задачи посредством разбиения на подзадачи. Распределенное параллельное реконфигурирование позволяет одновременно реконфигурировать разные участки – подграфы СДСС НПМ БР, распределяя на них имеющиеся вычислительные ресурсы.

Операция распределенного параллельного реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий

Пусть заданы требования $\dot{M}$ для набора метрик M , а также допустимые значения агрегированного топологического индекса $ATI_a \leq ATI_{\text{конф}} \leq ATI_b$ графа конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ структурно-динамической сетевой системы.

В целях снижения вычислительной сложности и ускорения обработки графов конфигураций применяется распределенное и параллельное реконфигурирование СДСС НПМ БР [308].

1. Для всех уровней $l = 1, 2, \dots, L - 1$ выполняется следующие действия.

1.1. Рассматриваются подграфы уровня l графа конфигурации $G_{\text{конф}}^t$ вне зависимости от смежности ребер разных уровней.

1.2. Параллельно и независимо друг от друга:

а) проверяется соответствие значений метрик M требованиям $\dot{M}$ на подграфах l -го уровня;

б) в случае выявленного несоответствия проводится реконфигурирование подграфов l -го уровня графа конфигурации для восстановления заданных требований. В результате формируется граф конфигурации $G_{\text{конф}}^{t+1}$.

2. Проверяется соответствие значения $ATI_{\text{конф}}$ допустимым $[ATI_a; ATI_b]$ на графе конфигурации $G_{\text{конф}}^{t+1}$.

2.1. В случае $ATI_a \leq ATI_{\text{конф}} \leq ATI_b$, процесс реконфигурирования завершается.

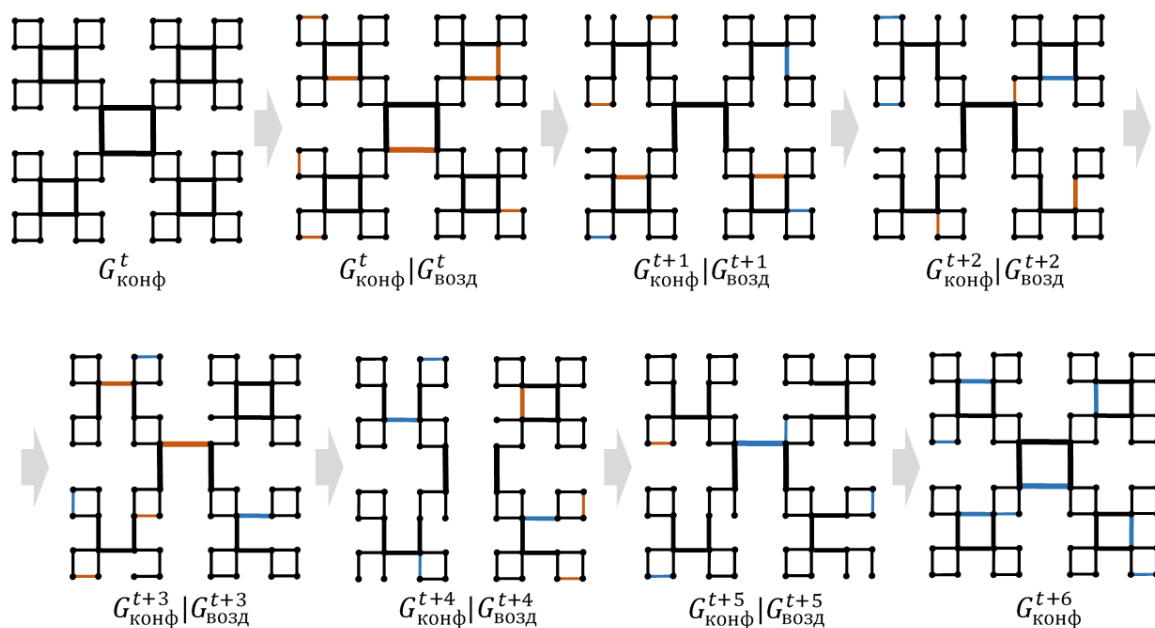
В условиях деструктивных воздействий, во время процесса реконфигурирования появляются новые нарушения. В таком случае снова запускается восстановления состояния СДСС НПМ БР с помощью методики реконфигурирования.

Основной целью метода реконфигурирования является восстановление требуемых параметров – штатного функционирования СДСС НПМ БР с заданными свойствами и характеристиками.

Основным преимуществом представленной методики является реконфигурирование СДСС НПМ БР в условиях постоянных деструктивных воздействий посредством независимых реконфигураций на подграфах разных уровней. В условиях постоянных деструктивных воздействий реконфигурирование СДСС НПМ БР за приемлемое время не всегда возможно завершить. Тогда реконфигурирование на подграфах позволяет восстанавливать граф конфигурации и возвращает штатное функционирование СДСС НПМ БР.

На рисунке 4.20 представлен пример работы методики реконфигурирования СДСС НПМ БР.

Начальный граф конфигурации $G_{\text{конф}}^t = G_3$ – предфрактальный граф. На граф конфигурации оказывается деструктивное воздействие $G_{\text{конф}}^t | G_{\text{возд}}^t$, элементы графа воздействия выделены оранжевым цветом. На следующем шаге проводится реконфигурирование $G_{\text{конф}}^{t+1}$, восстановленные связи выделены синим цветом.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.20 – Операции деструктивного воздействия и реконфигурирования СДСС НПМ БР по методике реконфигурирования

В процессе реконфигурирования до полного восстановления начальной конфигурации снова оказывается воздействие $G_{конф}^{t+1} | G_{возд}^{t+1}$. Несмотря на деструктивные воздействия на каждом шаге, граф конфигурации остается связным до момента времени $t + 4$. Граф конфигурации $G_{конф}^{t+4}$ – разделен на две компоненты, существует риск дальнейшей деградации и разрушения СДСС НПМ БР. На момент времени $t + 5$ связность графа $G_{конф}^{t+5}$ восстановлена и оказываются несущественные деструктивные воздействия. На последнем шаге граф конфигурации $G_{конф}^{t+6}$ восстановил начальное состояние.

4.4 Методика управления информационным обменом между средствами мониторинга в процессе реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий

Важной задачей для штатного функционирования СДСС НПМ БР является обеспечение информационного обмена между средствами

мониторинга в условиях деструктивных воздействий и соответственно в процессе реконфигурирования [309; 310].

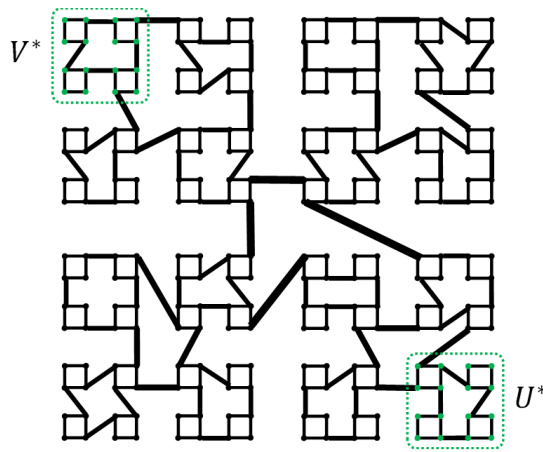
Метод реконфигурирования направлен на сохранение структурно-функциональных характеристик СДСС НПМ БР и поддержание такого его состояния, при котором обеспечивается штатное функционирование. В случае невозможности или целенаправленного прекращения функционирования происходит процесс разрушения СДСС НПМ БР – разрушение графа конфигурации. Обеспечение информационного обмена между средствами мониторинга также является частью процесса функционирования СДСС НПМ БР.

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.

Граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ и заданные требования $\dot{M}$ к метрикам M обеспечивают задачу мониторинга. В случае ухудшения характеристик, а конкретнее метрик из набора M , и выход за пределы требований $\dot{M}$ предполагает реконфигурирование СДСС НПМ БР – изменение графа конфигурации. В результате реконфигурирования значение АТИ возвращается в требуемые пределы.

Вместе с тем необходимо решать *задачу информационного обмена* – передачи данных от выбранных средств мониторинга – источников данных к потребителям этих данных. На рисунке 4.21 эти множества обозначены соответственно V^* и U^* .

Решением задачи передачи данных между вершинами V^* и U^* является множество кратчайших цепей между любой парой вершин $v^* \in V^*$ и из $u^* \in U^*$. В силу множественности параметров или весов ребер в общем случае задача выделения кратчайших цепей между множествами V^* и U^* является многокритериальной. Решением многокритериальной задачи являются паретовское множество $\tilde{X}$, состоящее из парето-оптимальных решений $\tilde{x}$. Любая из возможных цепей между v^* и u^* также называется *информационным каналом связи* или *информационным каналом*.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.21 – Множества источников V^* и потребителей U^*

Формально множества V^* и U^* могут быть как источниками, так и потребителями данных, более того вершины $v^* \in V^*$ и $u^* \in U^*$ могут передавать данные в асинхронном режиме. Выделение неориентированных цепей – означает выделение путей в обе стороны и в целом решает задачу асинхронного функционирования (в смысле одновременного существования информационных каналов из множества V^* во множество U^* и наоборот). Вершины множеств V^* и U^* в таком случае также называются *концевыми*.

В случае (первый сценарий) 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 сценария наиболее значимым является вопрос исследования устойчивости оптимального решения текущей многокритериальной задачи.

Под *устойчивостью решения* понимается его «нечувствительность» к некоторым независимым «возмущениям» весов ребер графа в задаче покрытия графа множеством цепей с заданными концевыми вершинами. Под *возмущениями* понимается изменение весов ребер как в сторону увеличения, так и в сторону их уменьшения.

Основной количественной характеристикой оценки устойчивости решения является *радиус устойчивости*, который является верхней гранью величин независимых возмущений весов ребер графа, не приводящих к появлению новых решений или утрате существующих решений задачи [311; 312].

Фактически радиус устойчивости найденного и реализуемого оптимального решения определяет предельно допустимую границу изменения параметров задачи (весов ребер), при достижении которой требуется выделение новых информационных каналов связи между средствами мониторинга или по-другому уточнения набора информационных каналов для обеспечения обмена данными между средствами мониторинга. В интерпретации гарантированного доведения информации – это достижение допустимых границ параметров задачи (весовых значений ребер), то есть значений радиуса устойчивости. Таким образом достижение предельно допустимых значений каналов связи потребует изменения потоков данных (путей передачи данных между средствами мониторинга) – то есть нового решения многокритериальной задачи выделения кратчайших цепей.

Для ускорения принятия решения использования новых альтернативных информационных каналов можно, опираясь на векторную несравнимость элементов паретовского решения, выбрать любой альтернативный набор каналов связи, реализуемых в текущей конфигурации.

Второй сценарий может оказаться востребован только в случае нереализуемости ни одного из альтернативных наборов информационных каналов связи. Ко второму сценарию приводят деструктивные воздействия, выводящие из строя элементы СДСС, 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_{KB}^t после воздействия на граф конфигурации $G_{конф}^t | G_{возд}^t = G_{KB}^t$ решение $\tilde{x}$ не изменилось.

Оба сценария – уточнение решения 1) в случае его выхода за радиус устойчивости и 2) в случае реконфигурирования структуры связей (графа

конфигурации) имеют общую математическую и инструментальную основу, поэтому могут быть объединены в одну методику управления процессом обмена данных СДСС НПМ БР с учетом деструктивных воздействий [313; 314]. При этом каждый из описанных сценариев в рамках методики реализуется в виде частных методик – частную методику уточнения набора каналов связи с учетом деструктивных воздействий, и частную методику корректировки набора каналов связи с учетом деструктивных воздействий.

Процедура управления процессом информационного обмена между средствами мониторинга

Обеспечение информационного обмена между выбранными средствами мониторинга – является неотъемлемой частью задачи мониторинга СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий и по сути определяет эффективность динамического реконфигурирования графа конфигурации.

Процедура управления процессом информационного обмена определяет множество допустимых решений (всевозможных путей) для выбранных средств мониторинга [310].

Основные действия по управлению информационным обменом представлены на рисунке 4.22 следующими блоками.

Блок 1. Формирование текущей конфигурации СДСС НПМ БР (4.6):

$$K_t = \langle G_{\text{конф}}^t, V_t^*, U_t^*, \tilde{X}_t \rangle, \quad (4.6)$$

где $t = 1, 2, 3 \dots$;

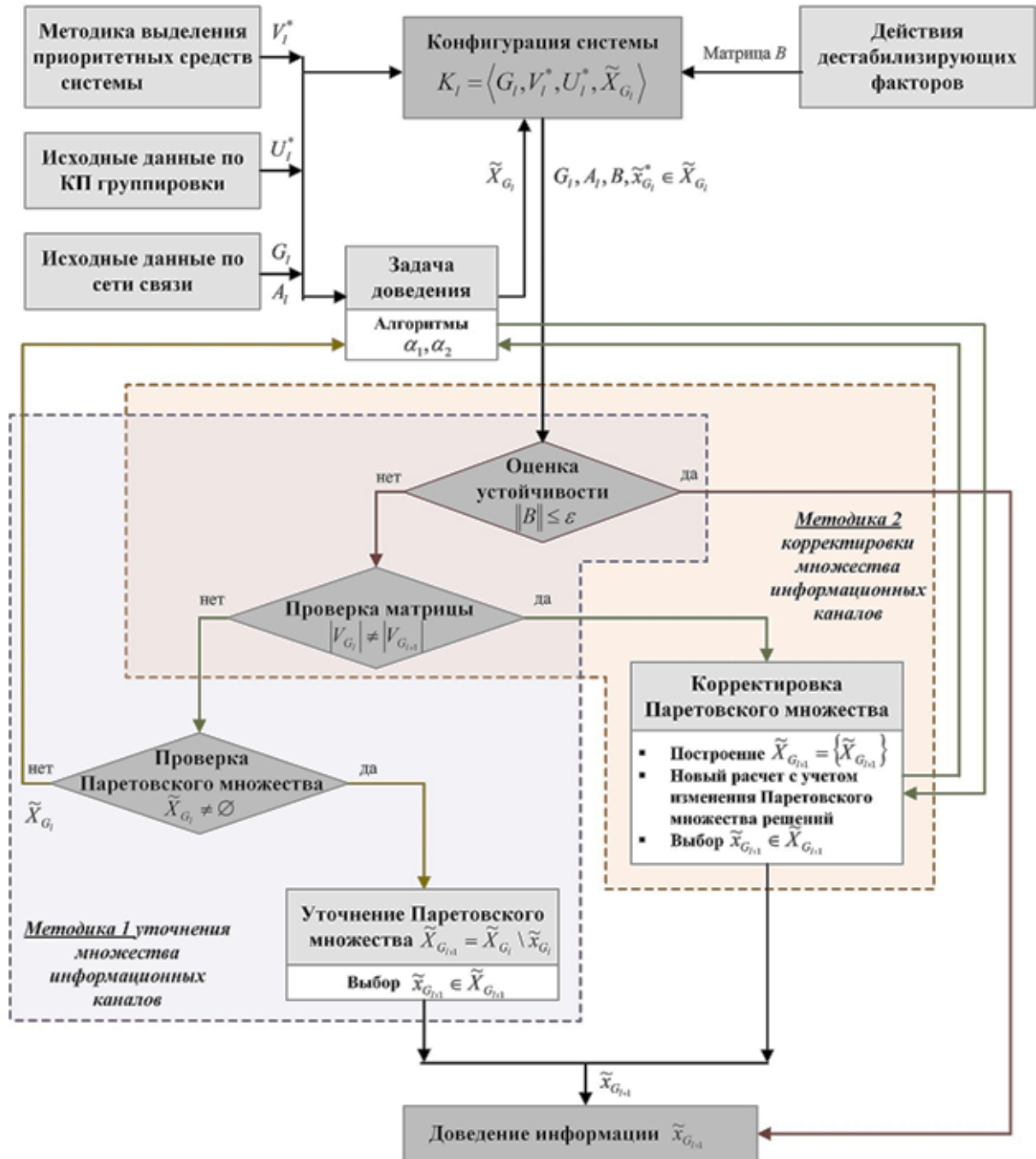
$G_{\text{конф}}^t$ – текущий граф конфигурации;

V_t^* – подмножество вершин текущего графа конфигурации, представляющее набор начальных вершин цепей, формирующих каналы связи передачи информации;

U_t^* – подмножество вершин текущего графа конфигурации, представляющее набор конечных вершин цепей, формирующих каналы связи передачи информации (средства мониторинга,

выполняющие в текущей задаче мониторинга функции передачи (ретрансляции) данных во внешний центр управления);

$\tilde{X}_t$ – паретовское множество решений, полученное по результатам решения задачи построения покрытия цепями графа.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.22 – Схема управления процессом обмена данных представлена

Блок 2. Расчет радиуса устойчивости в условиях деструктивных воздействий. Радиус устойчивости рассчитывается для паретовского

множества $\tilde{X}_t$ при полученных деструктивных воздействиях $G_{\text{возд}}^t$. Этот блок определяет применение одной из двух частных методик следующего блока.

Блок 3. Методики уточнения и корректировки конфигурации K_t . В зависимости от деструктивных воздействий на параметры конфигурации $G_{\text{конф}}^t, V_t^*, U_t^*, \tilde{X}_t$ определяется применение либо методики уточнения множества каналов связи – повторное решение задачи выделения всевозможных цепей между V_t^* и U_t^* , либо корректировки конфигурации K_t . Методики этого блока фактически определяют переход от текущей конфигурации системы K_t к следующей K_{t+1} при полученных деструктивных воздействиях, то есть проводится управление реконфигурированием K_t .

Блок 4. Организация новых информационных каналов. На выходе методики управления реконфигурированием получается новое решение из $\tilde{X}_t$, организация которого может потребовать перераспределения ресурсов в системе.

Следует отметить, что представленные и обоснованные ниже частные методики уточнения и корректировки набора информационных каналов можно отнести к понятиям программного реконфигурирования, которое не требует изменения структуры связей на сетевом уровне, и структурного реконфигурирования, необходимость которого возникает при структурных изменениях.

Вычисление радиуса устойчивости в задаче управления информационным обменом

Определение устойчивости решения задачи управления реконфигурированием в условиях деструктивных воздействий является чрезвычайно актуальным [311; 312]. Основными параметрами для задачи управления реконфигурированием, формализованной в виде многокритериальной задачи поиска покрытия цепями на динамическом графе, являются в том числе и веса ребер графа, которые соответствуют ресурсным характеристикам каналов связи. *Информационные каналы* между выбранными средствами мониторинга соответствуют цепям, соединяющим вершины V_t^* и

U_t^* . В процессе реализации уже выбранного решения исходные параметры самой задачи (веса ребер графа, структура связей в графе, множество вершин и т.п.) могут измениться. На практике это связано с функционированием системы в условиях деструктивных воздействий. Представленные ниже суждения ориентированы на изучение устойчивости задачи покрытия цепями графов конфигураций в динамической траектории.

Как и ранее $G_l = (V_l, E_l)$ – граф конфигурации из траектории динамического графа с множеством вершин $V_l = \{v_1, \dots, v_n\}$ и множеством ребер $E_l = \{e_1, \dots, e_r\}$. Зафиксируем две вершины графа s и t . Для задачи доведения информации вершина $v_0 = v_{i^*}^* \in V_l^* \subseteq V_l$ соответствует одному из средств мониторинга – начало цепи, а вершина $v_T = v_{j^*}^* \in U_l^* \subseteq V_l$ соответствует второму средству мониторинга – конец цепи. Структура графа G_l из позволяет рассматривать кратчайшие цепи исключительно между парой концевых вершин v_0 и v_T .

Обозначим $D_n = \{\tau_1, \dots, \tau_k\}$ множество цепей в графе G_l из v_0 в v_T . Предполагается, что $k \geq 2$. Пусть E' – подмножество E , включающее все ребра цепей из D_n . Для упрощения обозначений будем считать, что $E' = \{e_1, \dots, e_m\}$. Веса ребер из E' задаются матрицей смежности $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$.

Вес цепи τ_j из D_n (длина τ_j) равен сумме весов ребер, входящих в τ_j . Обозначим это число $\tau_j(A)$. Задача о кратчайшей цепи между парой вершин графа G состоит в выборе из D_n цепи минимальной длины. Такой путь (цепь) назовем решением задачи, а совокупность номеров цепей из D_n , которые являются решениями, обозначим $\varphi(A)$.

Если веса ребер заданы с помощью матрицы A , то для краткости в дальнейшем задачу о кратчайшей цепи между вершинами v_0 и v_T графа G будем называть просто задачей с матрицей A .

Будем считать, что задача с матрицей A называется ε -устойчивой, если для любой матрицы $B \in R^m$ такой, что $\|B\| < \varepsilon$, выполняется соотношение

$\varphi(A + B) \subseteq \varphi(A)$. По сути, это определение устойчивости решения задачи к возмущениям размером ε . То есть при изменении весов ребер графа не более чем на ε , решение задачи о критическом пути остается неизменным. Вместе с тем, ключевым понятием для оценки устойчивости решения задачи, является понятие *радиуса устойчивости*, которое и оценивает максимально возможные изменения весов ребер графа, не приводящие к изменению решения самой задачи.

Радиусом устойчивости задачи с матрицей A также принято считать число $\rho(A) = \sup \varepsilon$, где верхняя грань берется по всем ε , для которых задача – устойчива [272].

Из определения видно, что $\rho(A)$ является верхней гранью независимых возмущений элементов A , при которых в «возмущенных» задачах не возникает новых решений по сравнению с решениями задачи с матрицей A .

Для общего случая задачи поиска кратчайших цепей радиус устойчивости $\rho(A)$ определяется формулой (4.7):

$$\rho(A) = \min_{i \notin \varphi(A)} \max_{j \in \varphi(A)} \frac{\tau_i(A) - \tau_j(A)}{|\tau_i| + |\tau_j| - 2|\tau_i \cap \tau_j|}, \quad (4.7)$$

где $|\tau|$ — мощность множества τ .

Управление информационным обменом между средствами мониторинга в процессе реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Изменение параметров задачи построения оптимального покрытия цепями динамического графа, как отмечалось ранее, может привести к изменению его паретовского множества и/или полного множества альтернатив. Изменение параметров задачи на практике связаны с деструктивными воздействиями. Уровень деструктивных воздействий отражается в матрице воздействий и влияет на изменения в уже найденном паретовском множестве $\tilde{X}$, и на реализуемые в рамках процесса доведения

информации решения $x^* \in \tilde{X}$. В такой ситуации возможно два дополняющих друг друга варианта изменения паретовского множества.

Первый сценарий, когда уже реализуемое решение x^* перестает входить в паретовское множество, то есть формируется новое паретовское множество $\tilde{X} = \tilde{X}/x^*$. При этом варианте достаточно рассмотреть для реализации любой иной элемент паретовского $\tilde{X} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_N\}/x^*$. Этот вариант соответствует изменению параметров задачи – весов ребер графа G .

Второй сценарий соответствует изменению параметра задачи – структуры связей самого графа, что приводит к изменению уже найденного и реализуемого всего паретовского множества $\tilde{X}$, то есть формируется траектория динамического графа Γ из графов $G_{\text{конф}}^t$.

Каждому из вариантов соответствует своя частная методика управления реконфигурированием $K_t = \langle G_{\text{конф}}^t, V_t^*, U_t^*, \tilde{X}_t \rangle$:

для первого сценария – частная методика уточнения набора информационных каналов при изменении весов ребер графа $G_{\text{конф}}^t$, приводящих к изменению паретовского множества $\tilde{X}_t$ удалением из него реализуемого решения $x^* \in \tilde{X}_t$;

для второго сценария – частная методика корректировки конфигурации K_t при изменении самого графа конфигурации $G_{\text{конф}}^t$, приводящих к изменению всего паретовского множества $\tilde{X}_t$.

Частная методика уточнения набора информационных каналов с учетом деструктивных воздействий

Используя принятые ранее обозначения и формализацию, опишем методику в виде последовательных взаимосвязанных этапов [313; 314].

Этап 0. Исходные данные.

0.1. Модель управления информационным взаимодействием информационных средств с применением динамического графа Γ с учетом дестабилизирующих воздействий, формализуемых в виде матрицы возмущений $\|B\|$.

0.2. Многокритериальная задача, с ВЦФ $F(x) = (F_1(x), F_2(x))$, поиска покрытия оптимальными цепями с заданными концевыми вершинами на графах G_l из траектории динамического графа Γ , взвешенном детерминированными числами $w_k(e)$, $k = 1, \dots, 4$, $e \in E$. Допустимое решение x определяется как $x = (V_x, E_x)$, $V_x \subseteq V_l$, $E_x \subseteq E_l$, – покрытие цепями, которое соответствует совокупности приоритетных средств и командных пунктов в виде концевых вершин, ретрансляторов в сети связи системы для доставки информации, а $X = \{x\}$ – множество всевозможных покрытий. $\tilde{X} = \{\tilde{x}\}$ – паретовское множество решений указанной задачи построения оптимального покрытия цепями. Матрица A , соответствующая структуре графа G_l и весам $w_k(e)$, определяет множество номеров траекторных решений τ_i , $i \in \varphi(A)$.

0.3. Реализуемое решение $x^* \in \tilde{X}$, выбранное по итогам комплексной оценки текущего состояния, определяет информационные каналы, сформированные на основе совокупности ретрансляторов в сети связи, по доведению информации от приоритетных средств до пунктов управления.

Этап 1. Устойчивость решения.

1.1. Расчет радиуса устойчивости $\rho(A)$ задачи.

1.2. Формирование матрицы возмущений B на основе поступающих данных об изменениях параметров модели информационного взаимодействия и задачи доведения информации, то есть изначальных количественных параметров модели – весов графа $G = (V, E)$.

1.3. Расчет размера возмущения – ε -устойчивой окрестности для задачи с заданным возмущением $B \in R^m$ по чебышевской норме $\|B\| = \varepsilon$.

1.4. Если $\varepsilon \leq \rho(A)$, то выполняется соотношение $\varphi(A + B) \subseteq \varphi(A)$, поэтому следует выполнять доведение информации в соответствии с выбранным решением $x^* \in \tilde{X}$.

1.5. Если $\varepsilon > \rho(A)$, то следует перейти к выполнению Этапа 2.

Этап 2. Поиск альтернативного решения из паретовского множества (альтернативных информационных каналов для доведения информации).

2.1. Провести ранжирование элементов паретовского множества $\tilde{X} = \{\tilde{x}\}$ в с учетом обстановки (или случайным образом) от наилучшего в виде $\tilde{X} = \{x^*, \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_N\}$. Выбрать из проранжированного $\tilde{X} = \{x^*, \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_N\}$ элементы $\tilde{X}^* = \{\tilde{x}_{i^*}\}$, пресекающиеся в вершине оптимальные цепи x^* на текущем этапе реализации сетевого графика. При $\tilde{X}^* = \{\tilde{x}_{i^*}\} = \emptyset$ перейти к выполнению Этапа 3.

2.2. Выбрать из элементов $\tilde{X}^* = \{\tilde{x}_{i^*}\}$ наиболее оптимальный по оценке обстановки. В соответствии с выбранным решением составить сетевой график для реализации выбранного критического пути (решения).

2.3. При поступлении новых данных об изменении параметров модели и задачи перейти к реализации пункта 1.2 Этапа 1 настоящей методики.

Этап 3. Реализация альтернативного паретовского решения (альтернативных информационных каналов для доведения информации)

3.1. При $\tilde{X}^* = \{\tilde{x}_{i^*}\} = \emptyset$ на текущем этапе использования информационных каналов следует рассмотреть граф G_l первоначальной модели управления информационным взаимодействием и определить новый $\tilde{X}^*$, пресекающиеся в по вершинам покрытия x^* , используемых ранее. Далее выполнение Этапа 2.

Важно заметить, что реализация альтернативного решения (набора информационных каналов) на Этапе 3 будет сопровождаться издержками, требующими оценки методиками, выходящими за рамки настоящего исследования. Формирование новых информационных каналов при подвижных ретрансляторах требует учета текущих ресурсных возможностей ретрансляторов. Это является ключевым ограничением применения Методики уточнения набора информационных каналов с учетом деструктивных воздействий.

Методика уточнения набора информационных каналов с учетом действия дестабилизирующих факторов позволяет определить альтернативные информационные каналы доведения информации, исходя из возможных изменений количественных параметров модели информационного

взаимодействия и многокритериальной задачи доведения информации на основе сети связи с динамической топологией [315; 316]. Изменения количественных параметров, формализуемые в виде матрицы возмущений, формируются, как правило, исходя из моделей деструктивных воздействий, представление которых выходит за рамки настоящего исследования.

Методика уточнения набора информационных каналов в процессе формирования альтернативных информационных каналов доведения информации на основе реконфигураций (по сути – программной) не учитывает изменений структурных параметров модели информационного взаимодействия. Но такие изменения возникают в сети передачи данных, приводящие в рамках описанных формализаций к изменению в структуре связей между вершинами графа, то есть к динамическому графу. А в общем случае и к изменению размерности графов из траектории динамического графа. Решению этой проблемы посвящена следующая частная Методика корректировки набора информационных каналов с учетом действия дестабилизирующих факторов корректировки информационных каналов доведения информации на основе сети связи с динамической топологией в условиях действия дестабилизирующих факторов.

Одним из ключевых параметров информационной модели взаимодействия информационных средств СДСС НППМ БР является структура связей между ними, которая, по сути, относится к структурным параметрам модели и задаче оптимального доведения информации, формализуемой в виде графа модели, точнее – графа G_l конфигурации $K_l = \langle G_l, V_l^*, U_l^*, \tilde{X}_{G_l} \rangle$, $l = 1, 2, 3, \dots$. Поскольку вершины и ребра графа соответствуют приоритетным средствам, пунктам управления, ретрансляторам сети связи – объектам информационного взаимодействия, то появление в структуре графа новых вершин или ребер будет формировать новую область допустимых решений, а как следствие и новые решения в множестве альтернатив в задаче оптимального доведения информации – векторной задаче покрытия графа цепями с заданными концевыми вершинами. Вопросы влияния структурных

параметров задач векторной дискретной оптимизации на их решения изучаются в рамках структурно-динамического подхода, на основе которого и построена Методика информационных каналов с учетом действия дестабилизирующих факторов.

Частная методика корректировки набора информационных каналов с учетом действия дестабилизирующих факторов

Используя принятые ранее обозначения и формализацию, опишем Методику корректировки набора информационных каналов с учетом действия дестабилизирующих факторов в виде последовательных взаимосвязанных этапов.

Этап 0. Исходные данные.

0.1. Модель управления информационным взаимодействием информационных средств с применением динамического графа Γ с учетом дестабилизирующих воздействий, формализуемых в виде матрицы возмущений $\|B\|$.

0.2. Многокритериальная задача, с ВЦФ $F(x) = (F_1(x), F_2(x))$, поиска покрытия оптимальными цепями с заданными концевыми вершинами на графах G_l из траектории динамического графа Γ , взвешенном детерминированными числами $w_k(e)$, $k = 1, \dots, 4$, $e \in E$. Допустимое решение x определяется как $x = (V_x, E_x)$, $V_x \subseteq V_l$, $E_x \subseteq E_l$, – покрытие цепями, которое соответствует совокупности приоритетных средств и командных пунктов в виде концевых вершин, ретрансляторов в сети связи системы для доставки информации, а $X_l = \{x\}$ – множество всевозможных покрытий. $\tilde{X}_l = \{\tilde{x}\}$ – паретовское множество решений указанной задачи построения оптимального покрытия цепями. Матрица A , соответствующая структуре графа G_l и весам $w_k(e)$, определяет множество номеров траекторных решений τ_i , $i \in \varphi(A)$.

0.3. Реализуемое решение $x^* \in \tilde{X}_l$, выбранное по итогам комплексной оценки текущего состояния, определяет информационные каналы, сформированные на основе совокупности ретрансляторов в сети связи, по доведению информации от приоритетных средств до пунктов управления.

0.4. Граф $G_{l+1} = (V_{l+1}, E_{l+1})$, полученный из графа $G_l = (V_l, E_l)$ в результате выполнения над ним теоретико-графовых операций.

Этап 1. Расширение множества альтернатив.

1.1. Формирование множества альтернатив $X_{l+1} = \{x\}$ и паретовского множества $\tilde{X}_{l+1} = \{\tilde{x}\}$ с учетом $G_{l+1} = (V_{l+1}, E_{l+1})$. Если $X_l = X_{l+1}$ или $\tilde{X}_l = \tilde{X}_{l+1}$, то реализуемое решение $x^* \in \tilde{X}_l$ не изменяется. Если $\tilde{X}_l \neq \tilde{X}_{l+1}$, то необходима проверка x^* на оптимальность.

1.2. Провести ранжирование элементов паретовского множества $\tilde{X}_{l+1} = \{\tilde{x}\}$ в соответствии с оценкой обстановки. Выбрать из проранжированного $\tilde{X}_{l+1} = \{\tilde{x}\}$ элементы $\tilde{X}_{l+1}^* = \{\tilde{x}_{i^*}\}$, пресекающиеся в вершинах цепи x^* на текущем этапе доведения информации.

1.3. Выбрать из элементов $\tilde{X}_{l+1}^* = \{\tilde{x}_{i^*}\}$ наиболее оптимальные на основе оценки обстановки. В соответствии с выбранным решением сформировать информационные каналы доведения информации в сети связи с переменной топологией.

Этап 2. Применение Методики уточнения набора информационных каналов с учетом деструктивных воздействий.

2.1. Формирование матрицы возмущений B на основе поступающих данных об изменениях параметров задачи доведения информации на графе $G_{l+1} = (V_{l+1}, E_{l+1})$.

Для реализации метода реконфигурирования на всем протяжении жизненного цикла СДСС НПМ БР разработан программно-алгоритмический комплекс решения оптимизационных задач. Формализованное описание задач, алгоритмы и программная реализация представлена в следующих главах.

Далее в пятой и шестой предлагаются постановки оптимизационных задач и быстрые, в том числе параллельные, алгоритмы их решения. В частности, для предфрактальных графов, предложены алгоритмы решения многокритериальных задач оптимизации с улучшенными вычислительными

характеристиками быстродействия. Также предложены параллельные алгоритмы, позволяющие существенно снижать время их исполнения за счет разбиения задач на подзадачи и параллельные вычислительные процессы.

Предложенные постановки оптимизационных задач участвуют в формировании и дальнейшей оптимизации агрегированного топологического индекса, а также в решении задачи управления информационным обменом между средствами мониторинга СДСС НПМ БР.

4.5 Методика многокритериальной оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при возникновении аномальных вычислительных сложностей

Каждая из трех составляющих – теоретико-графовая модель СДСС НПМ БР, АТИ, реконфигурирование СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий подразумевает решение оптимизационных задач. Теоретико-графовая модель описывает этапы функционирования СДСС НПМ БР, включая конфигурирование, функционирование и разрушение. Конфигурирование СДСС НПМ БР означает построение такого графа конфигурации $G_{\text{конф}}$, который соответствует заданным параметрам задачи мониторинга – структурно-функциональным характеристикам. Для построения «оптимального» или «наилучшего» графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ необходимо из множества возможных (допустимых) графов конфигураций выбрать граф, наиболее соответствующий параметрам задачи мониторинга или «наиболее близкий» к заданным значениям структурно-функциональных характеристик СДСС НПМ БР. Значения структурно-функциональных характеристик соответствуют значениям критериев оптимизации *многокритериальной задачи конфигурирования*.

На этапе функционирования СДСС НПМ БР – в процессе выполнения задачи мониторинга в условиях деструктивных воздействий требуется реконфигурирование системы для сохранения ее структурно-функциональных

характеристик в требуемых пределах. Оценка состояния осуществляется посредством комплексного показателя АТИ. Методика реконфигурирования обеспечивает изменение (реконфигурирование) текущего графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ в условиях деструктивных воздействий для сохранения требуемых значений АТИ и соответственно для выполнения задачи непрерывного пространственного мониторинга. Решение задачи оптимального реконфигурирования означает выбор такого графа конфигурации $G_{\text{конф}}$ из множества доступных графов (допустимых графов конфигураций в текущий момент времени), который сохраняет или возвращает значения АТИ в требуемые пределы. Значение АТИ соответствует значению критерию оптимизации, а значения ее составных компонент (характеристик) – значениям критериев оптимизации *многокритериальной задачи реконфигурирования*.

Решение оптимизационных задач при малом или незначительном количестве средств мониторинга СДСС НПМ БР возможно посредством известных методов оптимизации и классических алгоритмов оптимизации. Для СДСС НПМ БР, то есть при большом числе элементов, решение даже полиномиальных задач приводит к аномальным вычислительным сложностям. Одновременно с этим решение сложных (класса NP) задач даже при малом количестве средств мониторинга требует значительных вычислительных ресурсов, а в ряде случаев являются и вовсе неразрешимыми за приемлемое время.

Таким образом, для решения многокритериальных задач оптимизации СДСС НПМ БР при возникновении аномальных вычислительных сложностей требуется разработать методику, позволяющую в отличие от известных оптимизационных инструментов – снижать аномальные вычислительные сложности и находить решение за приемлемое для задачи мониторинга время.

Для разработки новой методики оптимизации необходимо формализовать задачи многокритериальной оптимизации СДСС НПМ БР в соответствии аппаратом теории графов.

Многокритериальные задачи оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при возникновении аномальных вычислительных сложностей

В комбинаторной оптимизации особо выделены классы трудноразрешимых задач, сложность (алгоритмическая сложность, вычислительная сложность) которых увеличивается экспоненциально с ростом размерности (мощностью множества входных параметров) задачи. С инженерной точки зрения, то есть для получения гарантированного результата, такие задачи решаются эвристическими алгоритмами. Вместе с тем современные прикладные задачи, формализуемые инструментарием комбинаторной оптимизации, существенно усложнятся не только значительной размерностью входных параметров, но и их динамикой. Динамика исходных данных явным образом выражена в структурах сетевых систем.

Формализация таких изменений, по сути, моделирование структурной динамики сетевых систем с учетом их большой размерности, позволяет выявить закономерности, которые могут снизить сложность решаемых задач оптимизации СДСС НПМ БР практически в масштабе реального времени, что необходимо для построения модели, применения методики реконфигурирования и расчета АТИ при возникновении аномальных вычислительных сложностей.

На разрешение этой гипотезы – снижение аномальных вычислительных сложностей в задачах оптимизации СДСС НПМ БР и ориентирована методика многокритериальной оптимизации. Следуя замыслу диссертационного исследования, в основу работы методики оптимизации с требуемой вычислительной сложностью легли динамические предфрактальные графы, как модель структуры сложной сетевой системы с большой размерностью и самоподобием связей между ее элементами.

Для обеспечения функционирования методики оптимизации осуществляется подготовка данных – сформулировать многокритериальные задачи комбинаторной оптимизации для СДСС НПМ БР и классифицировать

их в соответствии с алгоритмами их решения. Важным также является оценка «близости» рассматриваемых предфрактальных графов к графам конфигураций реальных СДСС НПМ БР, меняющимся во времени, для применения предложенного метода реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий. Для чего предложена мера сходства заданного графа с предфрактальными графами большой размерности.

Основной целью оптимизации СДСС НПМ БР является оценивание различных вариантов графов конфигураций и выбор среди них «лучшего» в смысле соответствия заданным параметрам – значениям структурно-функциональных характеристик [317]. В случае множественности критериев формируется *многокритериальная постановка оптимизационной задачи*.

Постановка задачи многокритериальной оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при возникновении аномальной вычислительной сложности

Для решения оптимизационных задач в СДСС НПМ БР предлагается *общая постановка многокритериальной задачи* на понятийном теоретико-графовом оптимизационном аппарате.

Рассматривается динамический граф $G_L = (V_L, E_L)$. Каждое ребро l -го ранга $e^{(l)} \in E_L$ взвешено M , $M \geq 1$ числами, где $l = \overline{1, L}$ – отражает *уровни (ранги)* подграфов (подсетей) и их составляющих элементов (вершин и ребер).

На МДР $X = X(G_L) = \{x\}: x = (V_x, E_x), V_x \subseteq V_L, E_x \subseteq E_L$ задана ВЦФ (4.8):

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_M(x), \dots, F_{M+T}(x)), \quad (4.8)$$

в которой критерии представляются в виде (4.9-4.10):

$$F_i(x) = op[\omega_i(e)] \rightarrow extr, i = 1, 2 \dots M, \quad (4.9)$$

$$F_i(x) = op[\psi_i(v, e)] \rightarrow extr, i = M + 1, M + 2, \dots, M + T, \quad (4.10)$$

где op – операция над функцией вида max, min, sum .

Операции *or* включаются в себя, в том числе комбинации основных функций вида *max*, *min*, *sum*.

Критерии $F_i(x)$, $i = \overline{1, M}$ называются *числовыми* (*весовыми*, *функциональными*) критериями и являются функциями от весовых характеристик, а критерии $F_i(x)$, $i = \overline{M+1, M+T}$ – *топологическими* (*структурно-топологическими*), построенными на основе топологических (структурных) характеристик графа.

Весовые критерии могут принимать вид:

$$F_i(x) = \max_{e \in E_x} \omega_i(e) \xrightarrow{x} \min;$$

$$F_i(x) = \min_{e \in E_x} \omega_i(e) \xrightarrow{x} \max;$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x} \omega_i(e) \xrightarrow{x} \min;$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x} \omega_i(e) \xrightarrow{x} \max.$$

Топологические критерии могут принимать вид:

$$F_i(x) = \max_{e \in E_x, v \in V_x} \psi_i(v, e) \xrightarrow{x} \min;$$

$$F_i(x) = \min_{e \in E_x, v \in V_x} \psi_i(v, e) \xrightarrow{x} \max;$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x, v \in V_x} \psi_i(v, e) \xrightarrow{x} \min;$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x, v \in V_x} \psi_i(v, e) \xrightarrow{x} \max.$$

На множестве X необходимо выделить x^0 , где F принимает предпочтительные значения по $F_i(x)$, $i = \overline{1, M+T}$. Решением индивидуальной многокритериальной задачи является множество несравнимых альтернатив. Записи $\omega_i(e)$ и $\psi_i(v, e)$ обозначают функции от весовых и топологических характеристик соответственно. В индивидуальных задачах количество критериев уточняется. При этом M наборы весов считаются несравнимыми и разной природы.

В случае изменения структурно-функциональных характеристик сети следует говорить об адаптивных сетях (динамических графах), в которых во времени меняется структура связей, веса ребер или вершин. Для

оптимизационной задачи на динамическом графе принято говорить о решении задачи в заданный момент времени.

Одной из задач управления является оценка структурно-функциональной устойчивости СДСС НПМ БР. В этом случае следует говорить о постановке индивидуальной многокритериальной задачи и наборе частных критериев. Для решения многокритериальной задачи со многими весами на графе большой размерности требуется разработка специального алгоритма с улучшенными вычислительными характеристиками.

Многокритериальные задачи оптимизации СДСС НПМ БР позволяют учесть множество факторов, таких как связность сети, её устойчивость к отказам и распределение ресурсов [318]. Применение векторной целевой функции делает возможным одновременное решение нескольких задач, что критически важно для адаптации системы к изменяющимся условиям.

Особое значение приобретает использование графовых конструкций и многовзвешенных предфрактальных графов, обладающих свойствами самоподобия и масштабируемости. Эти структуры позволяют моделировать сложные сети с учётом их динамической природы, что открывает новые перспективы в проектировании и управлении крупномасштабными системами.

Представленная постановка многокритериальной задачи создают основу для оптимизации АТИ, который отображает состояние сети в едином структурно-функциональном показателе, при возникновении аномальной вычислительной сложности.

Частная методика противодействия аномальной вычислительной сложности оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Опишем в начале зависимость вычислительной сложности от числа критериев n . При этом следует отметить, что также необходимо учитывать время вычислений – время между вводом данных до выделения оптимального или около-оптимального решения. Возможна ситуация, при которой имеется достаточное количество оперативной памяти, но последовательная задержка по расчетам приводит к значительному увеличению времени вычислений.

Описанная формализация в предыдущих разделах позволяет сформировать первую часть действий по управлению вычислительными ресурсами, представленного на рисунке 4.23.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.23 – Блок-схема алгоритма определения несравнимых альтернатив

На представленной схеме изображён процесс определения несравнимых альтернатив в СДСС НПМ БР. Процесс начинается с двух параллельных этапов: определения основных компонентов СДСС НПМ БР и

определения характеристик этих компонентов [319]. Первый этап направлен на выделение ключевых структурных элементов системы, а второй — на установление их свойств, параметров и связей, необходимых для построения модели функционирования. После выполнения этих шагов осуществляется формализация динамического графа, который представляет собой математическую модель системы, отражающую взаимосвязи между компонентами и их характеристиками во времени. На основе этого графа проводится разделение критериев на два типа: числовые и топологические.

Затем для каждого типа критериев выполняется формирование операций, включающих вычисление максимальных, минимальных и суммарных значений. Эти операции позволяют агрегировать данные и выявить наиболее важные показатели для последующего анализа. После этого происходит этап установления предпочтительных значений критериев, где определяются приоритеты и допустимые диапазоны, отражающие цели и ограничения системы. На основании установленных критериев и их значений производится определение неравных альтернатив, то есть вариантов решений, которые нельзя напрямую сравнить по всем критериям. Этот этап необходим для отбора оптимальных или Парето-эффективных решений в условиях многокритериальности. Завершающим шагом схемы является переход к управлению вычислительными ресурсами.

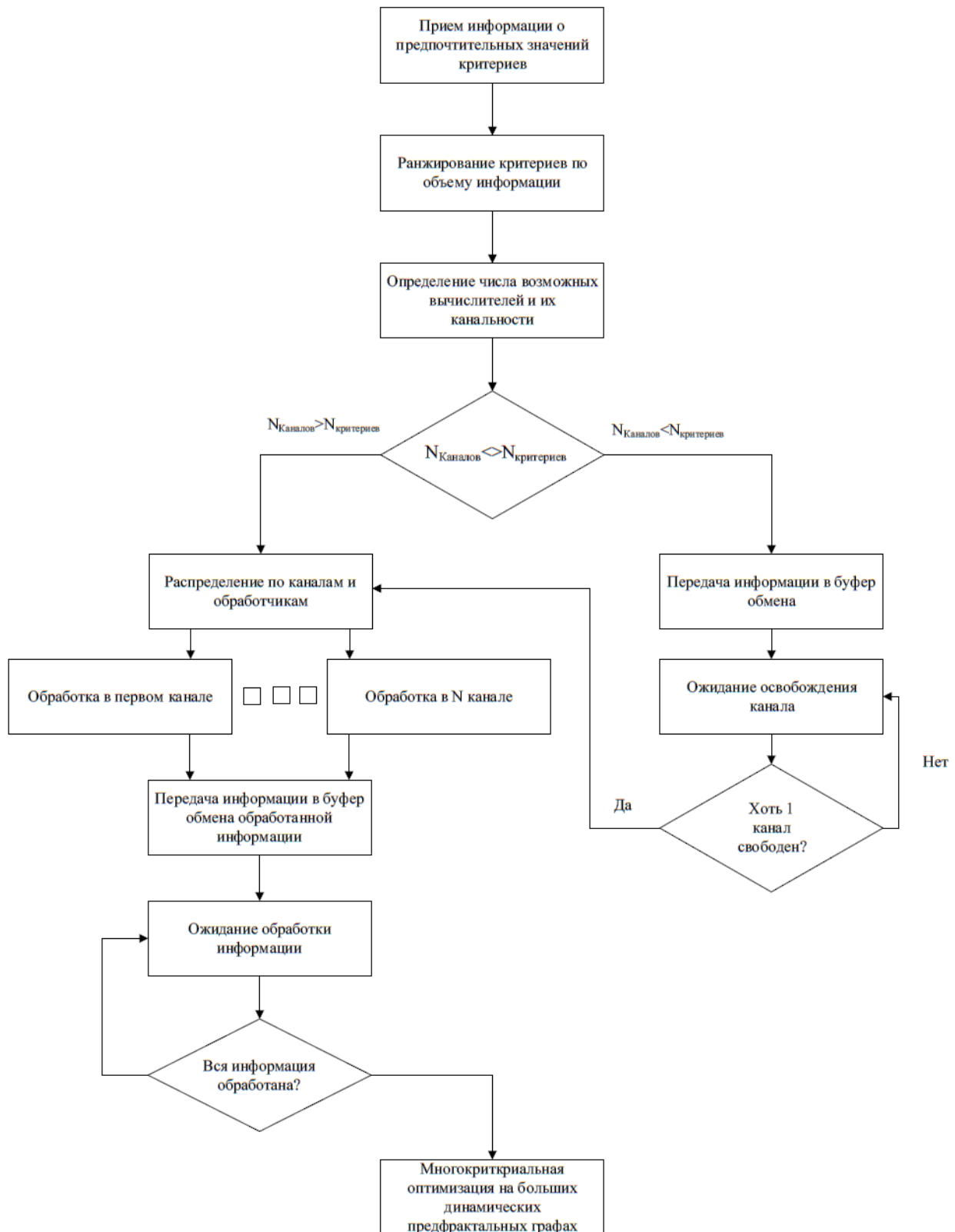
Таким образом, схема описывает последовательный процесс — от определения структуры и характеристик системы до выработки управленческих решений на основе многокритериального анализа, где каждая стадия логически вытекает из предыдущей и направлена на достижение оптимального управления динамическими вычислительными процессами. Тогда получается сформулировать алгоритм очередности, позволяющий распараллеливать информацию, поступающую от источников информации. Алгоритм описывает последовательность шагов, начиная с приёма входных данных о предпочтительных значениях критериев и заканчивая выполнением многокритериальной оптимизации на динамических графах [320].

Процесс начинается с приёма информации о предпочтительных значениях критериев, полученных на предыдущих этапах анализа. Эти данные

характеризуют приоритетность и значимость различных параметров, которые необходимо учитывать при обработке и распределении вычислительных ресурсов. После получения данных производится ранжирование критериев по объёму информации, что позволяет определить, какие из них требуют наибольших вычислительных затрат и, следовательно, приоритетного распределения ресурсов.

Следующий этап – определение числа доступных вычислителей и их канальность. Здесь система анализирует свои аппаратные возможности: количество процессоров, потоков или вычислительных узлов, а также их способность параллельно обрабатывать несколько задач. Далее выполняется сравнение числа каналов обработки с количеством критериев. Если количество каналов больше или равно числу критериев, то система может выполнять параллельную обработку всех задач. В этом случае происходит распределение критериев по вычислительным каналам и обработчикам. Каждый канал независимо выполняет обработку своей части информации – от первого до N-го канала. После завершения обработки данные передаются в буфер обмена, где хранится уже обработанная информация. Затем выполняется проверка, завершена ли обработка всех критериев. Если нет, система продолжает ожидание завершения вычислений. После того как вся информация обработана, происходит переход к этапу многокритериальной оптимизации, осуществляемой на больших динамических предфрактальных графах, что позволяет найти оптимальные решения с учётом множества факторов.

Если же количество каналов меньше числа критериев, система не может одновременно обрабатывать все данные. В этом случае информация передаётся в буфер обмена и ожидает освобождения вычислительных каналов. Алгоритм проверяет, освободился ли хотя бы один канал. Если канал свободен, ожидающие данные направляются на обработку, и процесс продолжается аналогично параллельной схеме. Если свободных каналов нет, выполняется дальнейшее ожидание до тех пор, пока не появится доступный вычислитель. Данная схема представлена на рисунке 4.23.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.23 – Блок схема алгоритма противодействия аномальной вычислительной сложности через управление ресурсами СДСС НПМ БР

Таким образом мы переходим от многокритериальной оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного

мониторинга большой размерности при возникновении аномальной вычислительной сложности к задаче многокритериальной оптимизации на больших динамических предфрактальных графах, поскольку обработанная информация будет уже распределена по уровням.

Многокритериальные оптимизационные задачи на больших динамических предфрактальных графах

Рассматриваемое ранее понятие «наследственность» применяется к задаче об остовных деревьях на предфрактальных графах [321; 322].

Пусть для остовного дерева $x = (V, E_x) \in X$ задана траектория. Обозначим разбиение множества E_x на подмножества E_x^l ребер ранга l , $1 \leq l \leq L$. Остовное дерево x называется наследственным для $l \leq L - 1$, если $E_x^l = E_x \cap E_l$ не меняется на $l + 1, l + 2, \dots, L$.

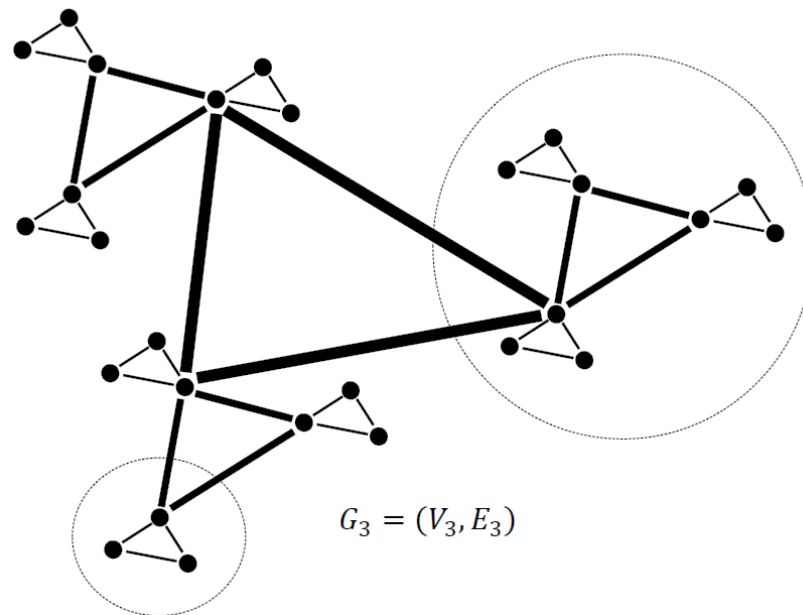
Утверждение 4.2. Для G_L множество $X = X(G_L)$ содержит собственное подмножество X^* , $|X^*| < |X|$.

Это утверждение, фактически о наследственном классе решений на одном из видов динамических графов, позволяет конструировать алгоритмы построения оптимальных подструктур на динамических предфрактальных графах [323]. Более того, такой подход предполагает распараллеливание [296] алгоритмов, то есть позволяет одновременно производить поиск локальных оптимальных подструктур, объединение которых формирует глобально оптимальную структуру на предфрактальном графе.

На рисунке 4.24 изображен предфрактальный граф $G_3 = (V_3, E_3)$, порожденный треугольной затравкой $H = (W, Q)$, причем смежность старых ребер предфрактального графа G_3 не нарушается. Самыми жирными линиями нарисованы ребра затравки первого ранга $z_1^{(1)}$. Линии средней толщины – ребра затравок $z_s^{(2)}$ второго ранга, их количество равно трем: $s = 1, 2, 3$. Наконец, тонкими линиями изображены ребра затравок $z_s^{(3)}$ третьего ранга.

На рисунке изображен предфрактальный граф G_3 , совпадающий со своим блоком $B_1^{(1)}$. Пунктирными окружностями на рисунке очерчены один блок $B_s^{(2)}$ второго ранга и один блок $B_s^{(3)}$ третьего ранга. Красным цветом на

рисунке выделены ребра различных рангов, образующие остовное дерево. Как показано на рисунке, построение остоновых деревьев на предфрактальном графе можно осуществлять на блоках различного уровня. Также следует отметить, что разработка параллельных алгоритмов является наиболее перспективным направлением развития теории вычислений на динамических графах большой размерности [295].



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.24 – Предфрактальный граф $G_3 = (V_3, E_3)$, порожденный треугольной затравкой, смежность старых ребер которого не нарушается

Многие экстремальные задачи на графах (поиск подграфов и их оптимизация) относятся к классам NP-полных и NP-трудных задач [324; 325]. Комбинаторные задачи можно решать методом полного перебора, однако имеющее экспоненциальное время работы. Лишь к малому числу задач (например, поиска наибольшего паросочетания в графе или проверки числа на простоту) удастся применить алгоритмы, не требующие полного перебора. Поэтому одно из ключевых направлений в комбинаторной оптимизации (в том числе и векторной) создания эффективных методов (алгоритмов) решения задач дискретной математики [281], сопряжено с проблемой элиминации (исключения) перебора.

Снижение вычислительной сложности NP-полных задач возможно за счет анализа их частных случаев, вводя дополнительные структурные и

количественные ограничения, в данном случае на класс динамических графов. Это в свою очередь позволит на основе наследственных свойств разработать алгоритмы для решения прикладной задачи доведения информации в системе с динамической топологией.

Далее рассматривается использование предфрактальных графов для решения многокритериальных задач СДСС НПМ БР [326; 327]. Эти задачи включают построение двудольных подграфов, планарных остовов и графов с максимальной связностью и др. Предфрактальные графы, обладающие свойством самоподобия и масштабируемостью, служат инструментом представления сложных сетей.

Классификация многокритериальных задач на многовзвешенных предфрактальных графах с действительными числами

Анализ описаний дискретных задач говорит о том, что состав критериев ВЦФ обычно меняется от одной индивидуальной задачи к другой. Например, остовное дерево в оптимизационной задаче может оцениваться критериями веса, степени и диаметра дерева, «пропускной способности» ребер и т.д. Таким образом, существуют различные варианты задач об остовных деревьях. Общим у этих задач является определения множества допустимых решений.

По этой причине математическая постановка многокритериальной задачи какого-либо вида будет представляться обще с описанием множества допустимых решений. После будут конкретизироваться критерии индивидуальных задач и приводятся алгоритмы поиска их решений.

Говоря об индивидуальной задаче на предфрактальном графе $G_L = (V_L, E_L)$, допустимое решение представляет собой подграф $x = (V_x, E_x)$, $V_x \subseteq V$, $E_x \subseteq E$. В отдельных случаях допустимое решение может дополняться уточняющими условиями.

Индивидуальные (модельные) задачи на многовзвешенных действительными числами предфрактальных графах обозначаем:

${}_R Z_1$ – задача о центрах;

${}_R Z_2$ – задача о медианах;

${}_R Z_3$ – задача об остовных лесах;

${}_R Z_4$ – задача о паросочетаниях;

${}_R Z_5$ – задача о паросочетаниях на двудольном графе;

${}_R Z_6$ – задача о кратчайших путях;

${}_R Z_7$ – задача о гамильтоновых циклах (коммивояжере);

${}_R Z_8$ – задача о покрытии эйлеровыми циклами;

${}_R Z_9$ – задача о покрытии цепями;

${}_R Z_{10}$ – задача о покрытии звездами;

${}_R Z_{11}$ – задача о вершинной раскраске.

Классификацию задач ${}_R Z_{tr}$ называем *классификацией по типу задач*.

Такая классификация является общепризнанной и определяет задачи по множеству допустимых решений для каждого класса. Множество классов $tr = 1, 2, \dots, 11$ может расширяться при необходимости добавления новых типов задач. Нижний индекс « tr » читается как «тип» или «type» в английской версии.

Другой вид классификации применим к задачам на предфрактальных графах и определяется на основе процедуры построения предфрактального графа. Построение предфрактального графа соответствует построению траектории предфрактального графа. На каждом шаге порождения ко множеству вершин применяется операция ЗВЗ. На предфрактальном графе возможно обрабатывать отдельные подграфы, а после объединять результаты в различной конфигурации в зависимости от критериев задачи. В качестве подграфов рассматриваются подграф-затравки и блоки разных рангов. *Классификация задач по структурной принадлежности* осуществляется следующим образом.

${}_R Z_{l_1}^{l_2}$ – задача о покрытии затравок ранга $l_1, l_1 + 1, \dots, l_2$ подграфами.

В частности, ${}_R Z_1^L$ – задача о покрытии с первого по L -ый ранг включительно, что соответствует покрытию всего графа G_L .

${}_R B_{l_1}^{l_2}$ – задача о покрытии блоков ранга $l_1, l_1 + 1, \dots, l_2$

предфрактального графа подграфами. В частности, ${}_R B_L^L$ – задача о покрытии блока L -ого ранга, что соответствует покрытию всего графа G_L .

Классификация многокритериальных задач на многовзвешенных предфрактальных графах с недетерминированными весами

На многовзвешенных графах каждому ребру приписывается несколько чисел. При использовании недетерминированных весов в виде временных рядов, нечетких множеств или интервальных чисел, принято говорить о *задаче на графе с недетерминированными весами* [328; 329], либо в частной постановке с интервальными весами – *интервальную задачу*.

В этом случае к общей постановке многокритериальной задачи на предфрактальном графе добавляются условия взвешивания ребер недетерминированными весами. Для каждого вида неопределенности задается правило взвешивания:

- 1) интервальное число $[\underline{w}, \overline{w}] \subseteq [\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b]$;
- 2) нечеткое множество $\{(w_k, \mu(w_k)) | w_k \in [\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b]\}$ со множеством значений $\{w_k\}$ и $\mu(w_k)$ – функцией принадлежности, заданной на $[0; 1]$;
- 3) временной ряд $\langle w_k \rangle$, где $w_k \in [\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b]$.

Будем говорить о трех подклассах задач с недетерминированными весами: $_{ts}Z_{tp}$ – временными рядами (индекс ts – «*time-series*» в переводе с англ. «временной ряд»); $_{fu}Z_{tp}$ – нечеткими множествами (индекс fu – «*fuzzy*» в переводе с англ. «нечеткий»), $_{in}Z_{tp}$ – интервалами (индекс in – «*interval*» в переводе с англ. «интервал»).

Задачи $_{ts}Z_{tp} \subset Z_{tp}$, $_{fu}Z_{tp} \subset Z_{tp}$, $_{in}Z_{tp} \subset Z_{tp}$ являются частными задачами Z_{tp} . Такое же утверждение относится и к задачам $_{R}Z_{tp} \subset Z_{tp}$. Таким образом, общий класс задач обозначается как Z_{tp} , а задачи с уточненными весами с соответствующими индексами.

Классификацию задач Z_{tp} является *классификацией по типу задач*. Такая классификация определяет задачи по множеству допустимых решений каждого класса. А *классификация задач по структурной принадлежности*:

$Z_{l_1}^{l_2}$ – задача о покрытии затравок ранга $l_1, l_1 + 1, \dots, l_2$ подграфами;

$B_{l_1}^{l_2}$ – задача о покрытии блоков ранга $l_1, l_1 + 1, \dots, l_2$ подграфами.

Также далее будет использоваться обозначение $Z_{\text{тр}}$ без индекса R для задач на графах, взвешенных действительными числами, при необходимости оговаривая иное.

Вычисление АТИ в момент времени t отождествляется с оптимизацией многокритериальной функции $F(x)$ или решением задачи: $\text{ATI}_t|F(x)$. Если функция $F(x)$ относится к классу задач $Z_{\text{тр}}$, то при необходимости вводится обозначение $_{\text{тр}}\text{ATI}_t|F(x)$. Нижний индекс тр добавляется именно к $_{\text{тр}}\text{ATI}_t$ так как по сути сообщает какие свойства или состояния СДСС определяются текущим АТИ. Например, $_{\text{тр}=1}\text{ATI}_t = {}_1\text{ATI}_t$ вычисляет свойства центральности СДСС через многокритериальную задачу о центрах Z_1 .

Частная методика решения многокритериальных задач класса предфрактальных графов большой размерности

Поиск решения многокритериальной задачи на предфрактальном графе осуществляется в соответствии с ее структурной или типовой классификацией $Z_{\text{тр}}$, $Z_{l_1}^{l_2}$ или $B_{l_1}^{l_2}$, для чего предлагается следующая методика.

Методика решения многокритериальной задачи Z на графе G_L .

Этап 1. Классификация задачи $Z|F(x)$ по типовой принадлежности $Z_{\text{тр}}$. На данном этапе определяется к какой задаче в классе $Z_{\text{тр}}$ относится задача Z : $Z|F(x) = Z_{\text{тр}}|F(x)$.

Этап 2. Определение параметров частной постановки индивидуальной многокритериальной задачи $Z_{\text{тр}}|F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_n(x))$: $F_i(x)|P_i$, где $P = (P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n)$ – вектор параметров задачи $Z_{\text{тр}}|F(x)$.

Примечание. Задача $Z_{\text{тр}}|F(x)$ многокритериальная и критерии зачастую не могут быть оптимизированы одновременно, то есть, при улучшении значений одного критерия, значения другого критерия ухудшаются. Это относится также к параметрам $P_1, P_2, \dots, P_n$, которые по сути являются фиксированными значениями $F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)$.

Этап 3. Классификация задачи $Z|F(x)$ по структурной принадлежности $Z_{l_1}^{l_2}$ и $B_{l_1}^{l_2}$. С помощью параметров $P_1, P_2, \dots, P_n$ вначале определяется к какому

из двух видов класса $Z_{l_1}^{l_2}$ или $B_{l_1}^{l_2}$ относится задача – решается на затравках или блоках предфрактального графа. Далее определяются значения рангов или уровней $l_1, l_1 + 1, \dots, l_2$, на которых выполняются вычисления: $Z_{\text{тр}}|F(x) = Z_{l_1}^{l_2}|F(x)$ или $Z_{\text{тр}}|F(x) = B_{l_1}^{l_2}|F(x)$.

Этап 4. Разделение задачи $Z_{\text{тр}}|F(x)$ на подзадачи $Z_{l_1}^{l_2}|F(x)$ или $B_{l_1}^{l_2}|F(x)$ в связи с уровнями подграфов $l_1, l_1 + 1, \dots, l_2$, на которых осуществляются вычисления.

Этап 5. Поиск решений подзадач на уровнях $l_1, l_1 + 1, \dots, l_2$.

Примечание. В зависимости от выбранных классов, может потребоваться связь вычислений, когда решения одних подзадач являются входными данными для других подзадач.

Этап 6. Объединение решений подзадач в единое решение задачи $Z_{\text{тр}}|F(x)$. Так как решениями являются подграфы (или покрытия), то единым решением также является подграф или покрытие всего графа G_L .

Примечание. Для каждой процедуры объединения решения следует представить численное или теоретическое доказательство состоятельности решения, принадлежности к МДР и паретовскому множеству.

Методика завершена.

На рисунке 4.25 изображен предфрактальный граф $G_L = G_3$, затравки и блоки разных рангов выделены пунктирными окружностями. Одинаковым цветом выделены ребра одинакового ранга (равного уровня) в траектории G_1, G_2, G_3 .

В качестве наглядного примера применения методики M_2 рассмотрим задачу $Z|F(x) = Z_3|F(x)$ выделения остовного леса на G_L , содержащего n^{L-1} компонент связности.

Этап 1. $Z|F(x) = Z_3|F(x)$.

Этап 2. $Z_{\text{тр}}|F(x) = F_1(x)$ – однокритериальная задача. $P_1 = n^{L-1}$.

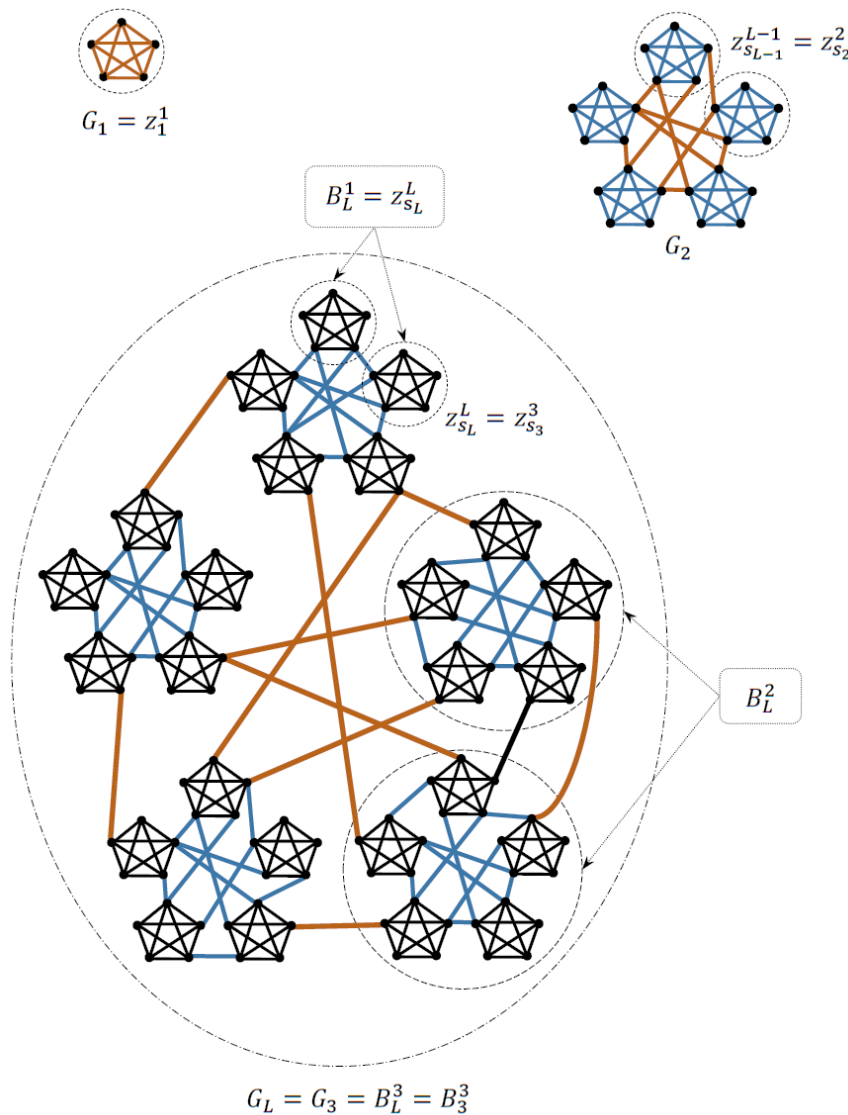
Этап 3. $Z_{\text{тр}}|F(x) = Z_L^L|F(x)$, $l_1 = l_2 = L$, что соответствует выделению остовных деревьев на подграфах (затравках) L -го ранга z_s^L , $s = 1, 2, \dots, n^{L-1}$.

Этап 4. Задача $Z_3 = Z_L^L$ разделяется на подзадачи Z_3^s , $s = 1, 2, \dots, n^{L-1}$.

Этап 5. Задача Z_3^s выделяет остовное дерево x_3^s на подграфе z_s^L уровня L .

Этап 6. Объединение всех решений x_3^s подзадач Z_3^s в единое решение $x_3 = \cup x_3^s$ – остовный лес G_L .

На рисунке 4.25 это значит выделение остовных деревьев на затравках $z_{s_3}^3$, ребра окрашены в черный цвет. Для нахождения остовного леса с n^{L-2} компонентами необходимо искать остовные деревья на всех блоках B_L^2 .



Источник: составлено автором.

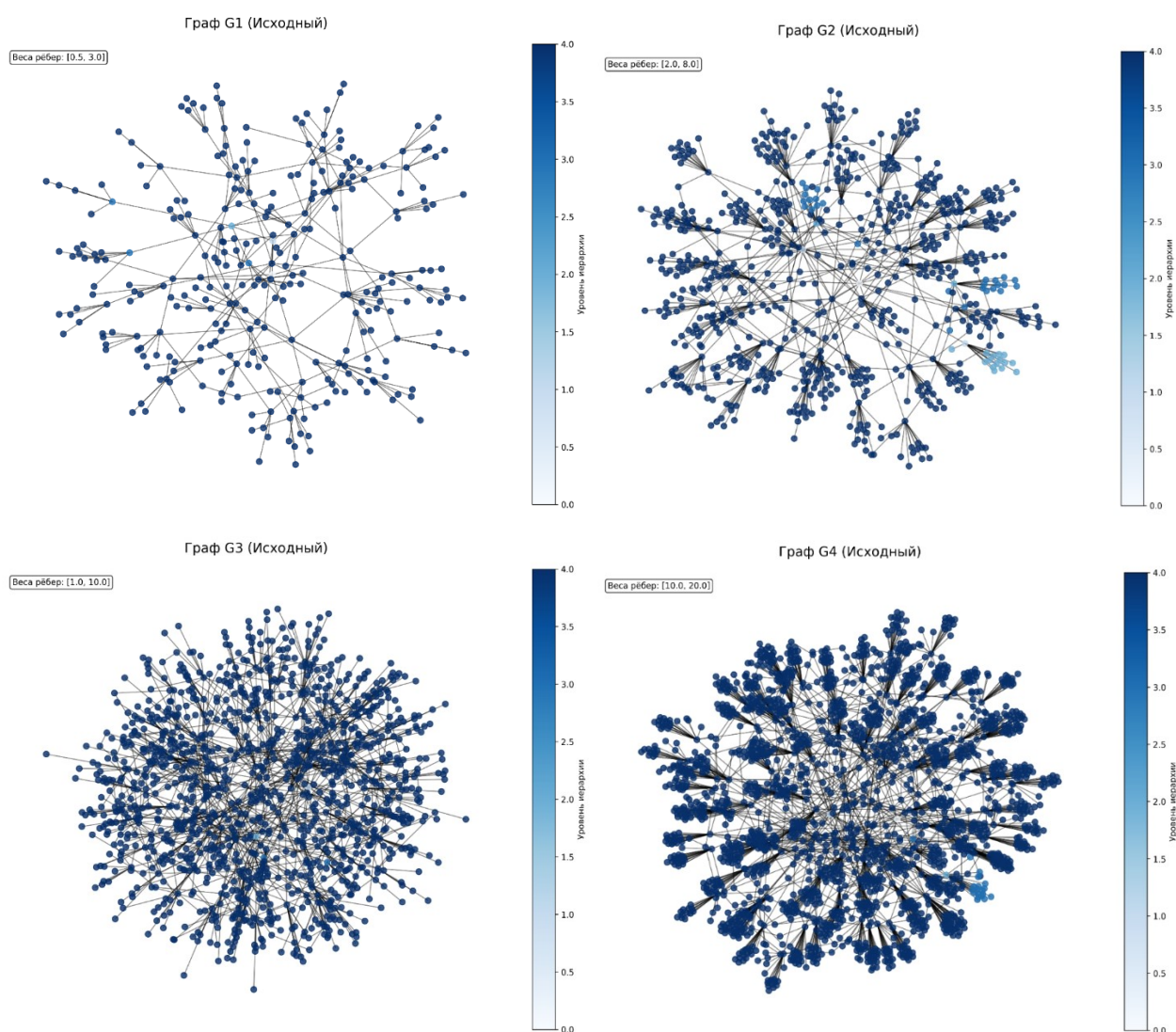
Рисунок 4.25 – Подграфы предфрактального графа G_3

Численное решение задачи выделения остовного леса

Рассмотрим задачу выделения остовного леса минимального веса, в соответствии с разработанной методикой.

Проводится конструирование (генерация) графов с разным числом вершин $|V| \in \{300, 700, 1200, 2000\}$, соответствующими диапазонами весов ребер $[0,5; 3]$, $[2; 8]$, $[1; 10]$, $[10; 20]$.

На рисунке 4.26 сгенерированы иерархические графы $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$ в соответствии с числом их вершин $\{300, 700, 1200, 2000\}$, а числа вершин n порождающих подграфов (затравок) соответственно $\{5, 15, 10, 20\}$. Принадлежность вершин к иерархиям l указаны справа от графов в виде шкалы.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.26 – Иерархические графы $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$

Каждый их иерархических графов $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$ соответствует графам четвертого уровня $L = 4$: $G_{t_1} = G_4^{t_1}, G_{t_2} = G_4^{t_2}, G_{t_3} = G_4^{t_3}, G_{t_4} = G_4^{t_4}$. То есть, каждый из рассматриваемых графов является последнего уровня в последовательности:

$$G_1^{t_1}, G_2^{t_1}, G_3^{t_1}, G_4^{t_1} = G_{t_1};$$

$$G_1^{t_2}, G_2^{t_2}, G_3^{t_2}, G_4^{t_2} = G_{t_2};$$

$$G_1^{t_3}, G_2^{t_3}, G_3^{t_3}, G_4^{t_3} = G_{t_3};$$

$$G_1^{t_4}, G_2^{t_4}, G_3^{t_4}, G_4^{t_4} = G_{t_4}.$$

Последовательность $l = 1, 2, \dots, 4$ соответствует построению графа по уровням иерархий, а с уровня $l = 4$ графы $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$ могут менять свои конфигурации в процессе функционирования СДСС. Для графа G_{t_1} это означает переход к конфигурациям $t_1 + 1, t_1 + 2, \dots$ СДСС.

Рассматривается частная постановка индивидуальной задачи выделения остовного леса $F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x))$:

$$F_1(x) = \sum_{e \in E_x} w(e) \rightarrow \min, \quad (4.11)$$

$$F_2(x) = |x| = k \rightarrow \min, \quad (4.12)$$

$$F_3(x) = \text{len}(C) \rightarrow \min, \quad (4.13)$$

где $\sum_{e \in E_x} w(e)$ – суммарный вес остовного леса x ;

k – число компонент связности;

$\text{len}(C)$ – средняя длина взвешенной цепи.

Далее предлагается решение задачи в соответствии с методикой.

Этап 1. $Z|F(x) = Z_{\text{тр}}|F(x) = Z_3|F(x)$.

Этап 2. $Z_3|F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x)), F_i(x)|P_i: P = (P_1, P_2, \dots, P_3)$.

Этап 3. Задачу $Z_3|F(x) = Z_{l_1=4}^{l_2=4}|F(x) = Z_4^4|F(x)$ классифицируем как Z_4^4 , то есть, оптимизация выполняется только на подграфах (затравках) $L = 4$ уровня. Или в общем случае $Z_{\text{тр}}|F(x) = Z_L^L|F(x)$, $l_1 = l_2 = L$, что

соответствует выделению остовных деревьев на подграфах (затравках) L -го ранга z_s^L , $s = 1, 2, \dots, n^{L-1}$.

Этап 4. В текущей задаче проводится выявление подграфов разных рангов и на них выделяются остовные деревья минимального веса.

Этап 5. На каждом подграфе выделяется остовное дерево x_s^3 .

Этап 6. Объединение всех решений x_s^3 подзадач Z_3^s в единое решение $x_3 = \cup x_s^3$ – составляет остовный лес. Далее приведены вычисления для каждого из графов $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$. Индексы для решения x не применяются, чтобы не перегружать обозначениями.

$$G_{t_1}, Z_4^4 | F(x): F_1(x) = 506,47, F_2(x) = 3, F_3(x) = 0.$$

$$G_{t_2}, Z_4^4 | F(x): F_1(x) = 3218,07, F_2(x) = 1, F_3(x) = 46,35.$$

$$G_{t_3}, Z_4^4 | F(x): F_1(x) = 5928,99, F_2(x) = 1, F_3(x) = 53,85.$$

$$G_{t_4}, Z_4^4 | F(x): F_1(x) = 29155,56, F_2(x) = 1, F_3(x) = 187,15.$$

$F_3(x) = 0$ для G_{t_1} означает отсутствие цепей между любыми вершинами, в силу разбиения графа на несвязные компоненты.

Далее задачу классифицируем как $Z_3 | F(x) = Z_3^4 | F(x)$, то есть выделяются остовные деревья минимального веса на подграфах 3 и 4 рангов.

$$G_{t_1}, Z_3^4 | F(x): F_1(x) = 507,62, F_2(x) = 1, F_3(x) = 14,56.$$

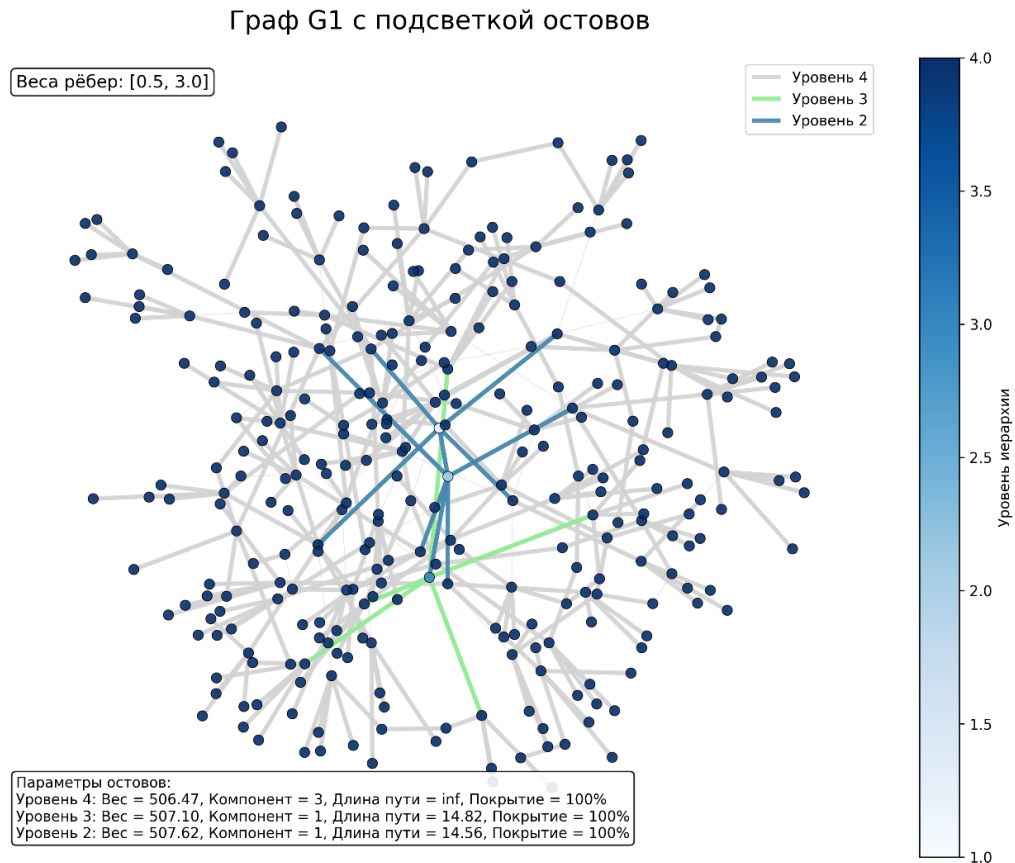
$$G_{t_2}, Z_3^4 | F(x): F_1(x) = 3342,72, F_2(x) = 1, F_3(x) = 47,05.$$

$$G_{t_3}, Z_3^4 | F(x): F_1(x) = 5934,05, F_2(x) = 1, F_3(x) = 53,86.$$

$$G_{t_4}, Z_3^4 | F(x): F_1(x) = 29426,61, F_2(x) = 1, F_3(x) = 186,96.$$

Следует отметить, что для иерархических графов $G_{t_1}, G_{t_2}, G_{t_3}, G_{t_4}$ не вводился коэффициент подобия, уменьшающий веса ребер. Тем не менее, наибольшая доля суммарного веса формируется на затравках последнего уровня.

На рисунке 4.27 представлено остовное дерево иерархического графа G_{t_1} в соответствии с числом 300 вершин. Принадлежность вершин к иерархиям l указаны справа от графов в виде шкалы. Ребра четвертого уровня $l = 4$ выделены серым цветом.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4.27 – Остовное дерево иерархического графа G_{t_1}

Дополнительно в текущем примере проведены попарные сравнения графов, используя меру сходства Жаккара: $Jaccard(G_1, G_2) = \frac{|E_1 \cap E_2|}{|E_1 \cup E_2|}$, где E_1, E_2 – множества рёбер графов G_1 и G_2 , $Jaccard \in [0, 1]$.

$$Jaccard(G_{t_1}, G_{t_2}) = 0,0046, Jaccard(G_{t_1}, G_{t_3}) = 0,0029,$$

$$Jaccard(G_{t_1}, G_{t_4}) = 0,0020, Jaccard(G_{t_2}, G_{t_3}) = 0,0074,$$

$$Jaccard(G_{t_2}, G_{t_4}) = 0,0101, Jaccard(G_{t_3}, G_{t_4}) = 0,0031.$$

Далее подробно освещаются вопросы сходства графов. В настоящем примере закономерно со структурным различием и в целом отсутствии связей при порождении графов коэффициент сходства незначителен и находится на уровне погрешности.

Численный пример в целом подтвердил применимость методики для выделения решения задач на иерархических графах с различными параметрами:

– вес остовного дерева увеличивается с ростом ранга;

- число компонент уменьшается с увеличением ранга, что соответствует объединению подграфов в связную структуру;

- средняя длина цепи возрастает, но может оптимизироваться при дополнительных условиях;

- мера сходства Жаккара отражает топологические различия графов.

Мера сходства предфрактальных графов большой размерности

Предложенные методы решения многокритериальных задач оптимизации СДСС и АТИ наилучшим образом применимы к динамическим графам большой размерности, в частности к классу предфрактальных графов.

Практически все *реальные сети (natural networks)* или *сети реального мира* обладают свойствами иерархичности, самоподобия и кластеризации. В той или иной степени, их можно распознавать в виде предфрактальных графов. С другой стороны, при формировании (генерации) искусственных сетей в них можно закладывать (программировать) требуемые структурно-функциональные характеристики, либо элементы самоорганизующихся сетей.

Следует отметить, что аппарат предфрактальных графов является строго теоретическим, в котором могут учитываться или не учитываться изменения, вызванные внешними воздействиями, иногда деструктивного характера или наоборот в целях оперативного локального улучшения.

Таким образом, предлагается использование меры сходства двух графов для применения всего аппарата предфрактальных графов. Одной из известных задач выявления структурной эквивалентности является задача изоморфизма двух графов. Данная задача входит в класс NP-трудных задач, то есть, для нее не существует или пока не найдено полиномиальных алгоритмов решения. С другой стороны, уже применяются так называемые *квазиполиномиальные* или *почти полиномиальные* алгоритмы [330], которые показывают приемлемые результаты, особенно на высокопроизводительных и параллельных вычислительных системах.

В настоящей работе используется *мера структурного сходства* двух графов [331]. В случае полного сходства графов можно говорить об их

изоморфизме. Для измерения структурного сходства могут применяться различные меры и алгоритмы, например, расстояние Хэмминга, мера Жаккара, Евклидово расстояние, косинусное расстояние и многие другие [332-334]. Каждый из этих разновидностей мер имеет как недостатки, так и преимущества. В качестве меры структурного сходства графов в настоящей работе может использоваться любая с основным условием нормализации ее значения на отрезке $[0; 1]$, так как рассматривается частичное сходство, которое может выражаться в сходстве одного или нескольких подграфов. Обозначим *меру структурного сходства* (МСС) двух графов MSS (measure of structural similarity). Значения меры сходства лежат на отрезке от нуля до единицы: $MSS(G_1, G_2) \in [0; 1]$. Численные значения меры сходства называем *коэффициентом структурного сходства* и обозначаем K_{MSS} . Значение коэффициента сходства $K_{MSS} = 1$ подтверждает изоморфизм графов двух G_1, G_2 . Если при сравнении учитываются только весовые (функциональные) атрибуты вершин и ребер, то используется обозначение *меры функционального сходства* (МФС) двух графов MFS (measure of functional similarity): $MFS(G_1, G_2) \in [0; 1]$. Для $K_{MFS} = 1$ означает неизменность весов ребер G_1, G_2 , при неизменности структуры G_1 . Если при сравнении учитываются структурные и весовые (функциональные) атрибуты вершин и ребер, то используется обозначение *меры структурно-функционального сходства* (МСФС) двух графов MSFS (measure of structural-functional similarity): $MSFS(G_1, G_2) \in [0; 1]$.

Также для $K_{MSFS} = 1$ означает изоморфизм G_1, G_2 с учетом весовых атрибутов. Очевидно, что из $K_{MSFS} = 1$ следует $K_{MSS} = 1$, при этом обратное утверждение не всегда выполняется. Наряду с остальными используется обозначение коэффициента структурно-функционального сходства K_{G_1, G_2} для указания сравниваемых графов.

Мера сходства применяется для двух задач: 1) определения сходства исследуемого графа и теоретического графа из специального класса, в том числе класса предфрактальных графов; 2) определения степени изменения

динамического графа в траектории при переходе от одной конфигурации к другой.

Таким образом, изменение конфигурации СДСС от G_t к G_{t+1} приводит к возможному изменению его структурно-функционального состояния, изменению структуры связей и весовых атрибутов элементов. Для оценки изменения или по-другому сходства G_{t+1} и предыдущего G_t и применяется мера сходства MSFS (MSS, MFS), в которой учитываются изменения простым сложением структурных и весовых изменений, структурное изменение ребра повторно не учитывается в функциональном изменении.

Одним из важных вопросов является какова степень изменения структурно-функциональных характеристик СДСС, в частности применительно к АТИ – насколько отличается ATI_{t+1} от ATI_t .

На динамическом графе большой размерности без отнесения его к какому-то специальному классу диапазон изменения значений АТИ может быть достаточно большим, который не позволит принимать оперативные решения по реконфигурации СДСС.

Проанализируем поведение меры сходства на классе предфрактальных графов. Для чего рассмотрим предфрактальный граф $G_L = (V_L, E_L)$, порожденный множеством затравок $H = \{H\}$, $H = (W, Q)$, $|W| = n$.

В случае H – полный граф на затравках z_s^L , $s = \overline{1, n^{L-1}}$ имеется n вершин и не более $n^2 \geq \frac{n(n-1)}{2}$ ребер на каждой затравке. Всего на графе G_L – n^L вершин и не более $n^2(1 + n + n^2 + \dots + n^{L-1}) = n^2 \frac{n^L - 1}{n - 1} \leq n^2 \cdot n^{L-1} = n^{L+1}$ ребер.

Число ребер $l = 1$ ранга $n^2 \cdot 1 = n^2$ на одной затравке z_1^1 .

Число ребер $l = 2$ ранга $n^2 \cdot n = n^3$ на n затравках $z_{s_2}^2$, $s_2 = \overline{1, n}$.

Число ребер $l = 3$ ранга $n^2 \cdot n^2 = n^4$ на n^2 затравках $z_{s_3}^3$, $s_3 = \overline{1, n^2}$.

.....

Число ребер $l = L$ ранга $n^2 \cdot n^{L-1} = n^{L+1}$ на n^{L-1} затравках $z_{s_L}^L$, $s_L = \overline{1, n^{L-1}}$.

Число ребер L -го ранга и всех ребер графа G_L сопоставимо и ограничивается сверху числом $n^{L+1} = n \cdot N$. Где с ростом ранга L значение числа вершин на заправке n будет снижаться.

Рассмотрим случай структурного изменения одной заправки L -го ранга графа G_L , то есть, переход от конфигурации G_t к G_{t+1} . Под структурным изменением заправки понимается любое изменение состава ребер. Тогда изменится n^2 ребер из всех n^{L+1} ребер графа G_L , а неизменными остались $(n^{L+1} - n^2)$, что составляет $\frac{(n^{L+1}-n^2)}{n^{L+1}}$ долю от всех n^{L+1} ребер. Откуда мера сходства $MSS(G_t, G_{t+1}) = K_{MSS} = K_{G_t, G_{t+1}}^{MSS} = \frac{(n^{L+1}-n^2)}{n^{L+1}}$.

Для наглядности проведем несколько примеров.

$$n = 3, L = 5: K_{G_t, G_{t+1}}^{MSS} = \frac{(n^{L+1}-n^2)}{n^{L+1}} = \frac{(3^{5+1}-3^2)}{3^{5+1}} = \frac{729-9}{729} \approx 0,98.$$

$$n = 6, L = 2: K_{G_t, G_{t+1}}^{MSS} = \frac{(n^{L+1}-n^2)}{n^{L+1}} = \frac{(6^{2+1}-6^2)}{6^{2+1}} = \frac{216-36}{216} \approx 0,83.$$

Рассматривая далее случаи изменения $s_L = 1, 2, \dots, n^{L-1}$ заправок, получаем следующие значения:

$$K_{G_t, G_{t+1}}^{MSS} : \frac{(n^{L+1}-n^2)}{n^{L+1}}, \frac{(n^{L+1}-2n^2)}{n^{L+1}}, \dots, \frac{(n^{L+1}-n^{L-1} \cdot n^2)}{n^{L+1}}.$$

При этом приближаясь к числу изменяемых заправок n^{L-1} , K_{MSS} приближается к нулевому значения, что говорит о присутствии значительного числа ребер L -го ранга в графе и влиянии на меру сходства MSS .

Для случая изменения ребер ранга $l = 1, 2, \dots, L$ заправок $s_l = 1, 2, \dots, n^{l-1}$ получаем:

$$K_{G_t, G_{t+1}}^{MSS} : \frac{(n^{L+1}-n^2)}{n^{L+1}}, \frac{(n^{L+1}-2n^2)}{n^{L+1}}, \dots, \frac{(n^{L+1}-n^{l-1} \cdot n^2)}{n^{L+1}}.$$

Повторим примеры для изменения всех ребер ранга $l = 2$.

$$n = 3, L = 5: K_{G_t, G_{t+1}}^{MSS} = \frac{(n^{L+1}-n^{l-1} \cdot n^2)}{n^{L+1}} = \frac{(3^{5+1}-3 \cdot 3^2)}{3^{5+1}} = \frac{729-27}{729} \approx 0,96.$$

$$n = 6, L = 2: K_{G_t, G_{t+1}}^{MSS} = \frac{(n^{L+1}-n^{l-1} \cdot n^2)}{n^{L+1}} = \frac{(6^{2+1}-6 \cdot 6^2)}{6^{2+1}} = \frac{216-216}{216} \approx 0.$$

Во втором примере для $n = 6, L = 2$ изменение всех ребер $l = 2$.

Представленные выше формулы соответствуют расчету в худшем случае, то есть, максимально возможное число изменяемых ребер и с другой стороны минимально возможное значение меры сходства.

Помимо рассмотренных случаев изменения конфигураций на уровне ребер l -го ранга возможные и другие правила, при необходимости об этом упоминается дополнительно.

Рассмотрим далее случай функционального изменения затравок l -го ранга графа G_L при переходе от конфигурации G_t к G_{t+1} . Под *функциональным изменением* затравки понимается любое изменение весов ребер. Веса ребер l -го ранга лежат в диапазоне $(\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b)$, $l = 1, 2, \dots, L$, $a > 0$, $\theta < 1/b$. Как и для структурного изменения рассматриваем изменение весов всех ребер n^2 на затравках. При этом учитывается сам факт изменения весов. Минимальные и максимальные веса ребер все равно лежат в диапазоне $(\theta^{l-1}a, \theta^{l-1}b)$. Рассмотрение превышения указанного диапазона, а также с учетом количественной оценки изменения весов ребер требует дополнительного анализа за рамками настоящего исследования.

Тогда для функционального и структурно-функционального изменения ребер ранга $l = 1, 2, \dots, L$ затравок $s_l = 1, 2, \dots, n^{l-1}$ также получаем:

$$K_{G_t, G_{t+1}}^{\text{MFS}} : \frac{(n^{L+1}-n^2)}{n^{L+1}}, \frac{(n^{L+1}-2n^2)}{n^{L+1}}, \dots, \frac{(n^{L+1}-n^{l-1} \cdot n^2)}{n^{L+1}},$$

$$K_{G_t, G_{t+1}}^{\text{MSFS}} : \frac{(n^{L+1}-n^2)}{n^{L+1}}, \frac{(n^{L+1}-2n^2)}{n^{L+1}}, \dots, \frac{(n^{L+1}-n^{l-1} \cdot n^2)}{n^{L+1}}.$$

Переход СДСС от одной конфигурации G_t к другой G_{t+1} , управляемый либо под воздействием внешних факторов, также отражается на изменении ATI_t к ATI_{t+1} . Следует понимать насколько велико изменение ATI_t и ее составляющих $m_i = \text{норм} F_i(x)$, соответственно, параметров F_i . Вычисление параметров F_i , как было представлено ранее, означает оптимизацию многокритериальной функции $F(x)$ с критериями $F_i(x)$. Тогда необходимо выяснить каким образом изменение конфигурации СДСС влияет на решение многокритериальной задачи на при переходе динамического графа G_t к G_{t+1} .

Подробнее об этом говорится в следующей главе, в которой представлены алгоритмы с оценками решения многокритериальных задач на динамических графах большой размерности, в частности на предфрактальных графах.

В настоящем разделе рассматривается сам процесс изменения ребер разных рангов. Предложенная классификация индивидуальных задач Z_1, Z_2 и т.д. служит в том числе для определения применяемых алгоритмов и сопутствующих методов решения. Для каждой из задач можно определить являются ли решения на динамическом графе наследственными или составными. Под *наследственным* решением понимается возможность применения решения, полученного на предыдущем шаге, для формирования решения на текущем. *Составное* решение – это одна из разновидностей наследственного решения, когда текущее решение формируется на основе многих решений на предыдущих шагах, либо из нескольких решений одного предыдущего шага.

Рассмотрим задачу Z_1 выделения кратного центра $p = n^{L-1}$ предфрактального графа G_L . Решением задачи является p -центр, вершины которого находятся на затравках L -го ранга $z_s^L, s = \overline{1, n^{L-1}}$. При переходе от $G_L = G_t$ к G_{t+1} и изменении любых ребер рангов $1, 2, \dots, L-1$ решение x^* задачи $ATI_t|F(x^*)$ сохраняется, то есть, $ATI_t|F(x^*) = ATI_{t+1}|F(x^*)$ или по другому для индивидуальной задачи Z_1 верно $ATI_t|Z_1 = ATI_{t+1}|Z_1$ при изменении ребер рангов $l \leq L-1$. Решение x^* задачи Z_1 является наследственным в последовательности конфигураций $G_t, G_{t+1}, \dots$ при изменении ребер ранга $l \leq L-1$ предфрактального графа G_L .

Последнее утверждение верно и для задачи Z_3 об остовных лесах. Решение x^* индивидуальной задачи Z_3 является наследственным в последовательности конфигураций $G_t, G_{t+1}, \dots$ при изменении ребер ранга $l \leq L-1$ предфрактального графа G_L , а также верно $ATI_t|Z_3 = ATI_{t+1}|Z_3$.

Мера сходства по сути позволяет переносить инструменты оптимизации одного класса графов в другой класс графов, в частности в класс предфрактальных графов.

Практическим применением меры сходства как составной части метода многокритериальной оптимизации является сравнение известных классов графов и графов конфигураций СДСС, адаптация инструментария (метода, алгоритмов и других) оптимизации к реальным условиям эксплуатации СДСС НПМ БР.

Трудноразрешимые задачи оптимизации

Одним из видов трудноразрешимых задач являются NP-полные и NP-трудные задачи [335]. Вообще проблеме NP-задач посвящено много научных и прикладных работ. В настоящее время проблема решения задач из класса NP остается открытой.

Настоящий раздел посвящен NP-полным задачам, возникающим при управлении СДСС НПМ БР. Рассматриваются задачи выделения гамильтоновых циклов, остовов с максимальными висячими вершинами, клик и др. Предлагаются решения для частных задач на предфрактальных графах с дополнительными условиями. Специальный класс графов – предфрактальных графов обладает свойствами самоподобия, которые способствуют снижению вычислительной сложности в ряде случаев.

При управлении СДСС НПМ БР появляется ряд вычислительных проблем в частности при решении NP-полных задач. Такие задачи как оптимизация маршрутизации, минимизация задержек и максимизация надежности, трудно решить за разумное время, особенно с учетом изменений характеристик ребер и узлов во времени.

Известные метаэвристические методы оптимизации [336] могут иметь некоторые недостатки в контексте сложных систем. К ключевым недостаткам можно отнести:

- застревание в локальных минимумах (метаэвристические методы, такие как генетические алгоритмы и алгоритмы роя частиц, могут застревать в локальных оптимумах, особенно при высоком уровне сложности задачи и множестве возможных решений);

- чувствительность к параметрам (производительность метаэвристических алгоритмов сильно зависит от настройки параметров (например, скорость обучения или вероятность мутации));

- медленная сходимость (несмотря на то, что метаэвристические алгоритмы могут обеспечивать хорошие решения за полиномиальное время, в

некоторых случаях они могут сходиться слишком медленно для применения в системах реального времени).

Для преодоления этих недостатков требуются методы, справляющиеся с большой размерностью и сложностью вычислений.

Целью настоящего раздела является разработка метода решения NP-полных задач для СДСС НПМ БР на основе адаптации классических NP-полных задач на больших предфрактальных графах. Метод включает в себя формирование условий разрешимости для частных постановок, что приводит к повышению производительности и адаптивности системы в условиях большой размерности и структурной динамики.

Анализ классических NP-полных задач

Методы решения NP-полных задач, таких как перечисление возможных решений и выделение подграфов с заданными характеристиками, играют ключевую роль в области дискретной оптимизации, особенно при работе с большими динамическими графами и сетями. Эти задачи традиционно формулируются в рамках теории сложных задач, описанной в [337, 338], также выражаются через теоретико-графовую терминологию [339; 340]. Несмотря на значительное количество исследований, решение таких задач на больших графах по-прежнему открытой.

Сложность решения NP-полных задач на больших графах также повышается для динамичных сетевых структур. В условиях постоянных изменений топологии, возникающих при реконфигурации сетей или изменении параметров узлов и ребер, нахождение решения является не очевидным. Дополнительное увеличение вычислительной сложности затрудняет применение известных (в том числе приближенных) алгоритмов дискретной оптимизации, которые предполагают статичность структуры графа.

Для преодоления таких ограничений в современной литературе предлагаются различные частные постановки задач, а также выделение подклассов графов, для которых можно найти решения при определенных условиях [341; 342]. Такие подходы позволяют упростить решения некоторых

задач в специальных случаях, снижая их вычислительную сложность до полиномиальной. Например, можно выделить задачи на планарных или двудольных графах, где известны специальные методы решения.

Некоторые исследования сосредоточены на улучшении эффективности вычислений для отдельных NP-полных задач. В работе [273] предлагается метод оценки эффективности и неэффективности узлов графа для разработки подходов к решению NP-полных задач. Метод позволяет определять потенциально критические узлы в процессе оптимизации для снижения сложности анализа. В [320] применяются генетические алгоритмы декомпозиции иерархических подсистем крупных программных систем для эффективного решения задачи на сложно-структурированных графах.

Несмотря на успехи в решении отдельных NP-полных задач, исследования в основном фокусируются на частных случаях и не предлагают единого подхода к решению всего класса или подкласса задач. Более того, большинство исследований ориентированы на статичные или слабо изменяющиеся графы, тогда как для динамических систем, таких как ПРИСМ, остается необходимость разработки методов, учитывающих изменчивость структуры и характеристик ребер и узлов во времени.

В настоящем исследовании предлагается использовать класс предфрактальных графов для решения частных постановок NP-полных задач. Предфрактальные графы представляют собой динамические структуры, которые обладают свойствами самоподобия и иерархичности. Они обеспечивают возможность моделирования пространственно-распределенных систем мониторинга с высоким уровнем сложности. Применение предфрактальных графов позволяет описывать такие задачи, как изоморфизм подграфа, построение остова с ограниченной степенью, поиск остова с максимальным числом висячих вершин, а также задачи, связанные с двудольными и планарными подграфами.

Для использования предфрактальных графов в решении NP-полных задач требуется адаптировать постановки задач под специальные свойства этого семейства графов. А именно учитывать большую размерность,

динамичность структуры, специальные условия разрешимости и масштабирования алгоритмов.

Адаптация NP-полных задач к предфрактальным графам

Предфрактальные графы представляют собой класс графов, характеризующихся свойствами самоподобия и иерархической структурой. Эти особенности делают их привлекательными для моделирования сложных СДСС НПМ БР. Однако для эффективного решения NP-полных задач на таких графах необходимо адаптировать существующие методы с учетом их специфических свойств. Особенности адаптации NP-полных задач к предфрактальным графам следующие.

Использование свойства самоподобия. Предфрактальные графы состоят из повторяющихся структурных элементов на различных масштабах. Это позволяет применять рекурсивные алгоритмы, которые решают задачу на базовом уровне иерархии и затем масштабируют решение на более высокие уровни. Например, при оптимизации маршрутизации можно сначала найти оптимальные пути на малых подграфах (графлетах, затравках) или блоках и затем объединить их для всего графа.

Иерархическая декомпозиция задач. Благодаря иерархической структуре предфрактальных графов, сложные задачи могут быть разбиты на набор более простых подзадач, решаемых независимо. Это снижает общую вычислительную сложность и позволяет использовать параллельные вычисления.

Модификация алгоритмов под структуру графа. Классические алгоритмы, применяемые для NP-полных задач, могут быть адаптированы с учетом особенностей предфрактальных графов. Например, алгоритмы поиска на графах могут быть изменены для более эффективного обхода иерархических структур, избегая избыточных вычислений.

Применение локальных эвристик. В предфрактальных графах высока степень локальной связности, что позволяет использовать локальные эвристические методы для быстрого приближенного решения задач в

отдельных областях графа. Затем эти локальные решения могут быть интегрированы в глобальное решение.

Адаптация метаэвристических методов. Метаэвристические алгоритмы, такие как генетические алгоритмы или алгоритмы роя частиц, могут быть модифицированы для учета иерархической и самоподобной природы предфрактальных графов. Например, можно вводить операторы скрещивания и мутации, учитывающие структуру графа, что снижает вероятность застревания в локальных минимумах.

Учет динамичности графа. В условиях динамичности структуры графа алгоритмы должны быть устойчивы к таким изменениям. Это может быть достигнуто через инкрементальные алгоритмы, которые обновляют решение при изменении графа без необходимости пересчета с нуля.

Изучение и адаптация всех аспектов решения сложных NP-полных задач на предфрактальных графах выходит далеко за рамки проводимого исследования, поэтому рассмотрим решение для наиболее значимых направлений, а именно: использование свойств самоподобия и иерархической декомпозиции задач.

Развитие этих направлений возможно за счет:

- разбиения задачи на иерархические подзадачи, соответствующие уровням предфрактального графа;
- применения рекурсивных или итеративных алгоритмов, которые используют решения подзадач для построения общего решения;
- уменьшения вычислительной сложности за счет обработки меньших подграфов;
- возможности параллельного выполнения подзадач, что ускоряет обработку в реальном времени.

Учитывая вышеизложенное, что соответствует цели исследования – разработке методики решения NP-полных задач для СДСС НПМ БР на основе адаптации классических NP-полных задач к их решению на предфрактальных графах.

Исследование NP-полных задач на предфрактальных графах

1. Гамильтонов цикл.

Теорема 4.1. Если на затравке H имеется гамильтонов цикл, и между любой ее парой вершин имеется гамильтонова цепь, а старые ребра не пересекаются, то на предфрактальном графе G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ существует гамильтонов цикл.

Доказательство.

На графе G_1 существует гамильтонов цикл $C_1 = C_1^1$ по условию теоремы, так G_1 представляет собой затравку H . На следующем шаге ко всем вершинам G_1 применяется процедура ЗВЗ и формируется G_2 при этом старые ребра первого ранга не пересекаются. Или по-другому к вершинам гамильтонова цикла C_1 применяется процедура ЗВЗ и старые ребра первого ранга не пересекаются. Ребра первого ранга смежные в C_1 оказались разделенными затравками H . На каждой затравке выделяется гамильтонова цепь C_s^2 между ребрами первого ранга, которые были смежными в C_1 . Таким образом, охвачены все вершины G_2 и построен гамильтонов цикл C_2 .

Продолжая замещать вершины C_l , $l = 2, 3, \dots, L - 1$ затравками H и выделяя на них гамильтоновы цепи C_s^{l+1} , $s = 1, 2, \dots, n^{l-1}$, формируются гамильтоновы циклы C_{l+1} на предфрактальных графах G_{l+1} . Таким образом, для каждого предфрактального графа G_l ранга $l \in [1, 2, \dots, L]$ выделен гамильтонов цикл C_l .

Теорема доказана.

Условие теоремы о непересечении старых ребер позволяет на каждом шаге разделять гамильтонов цикл подграф-затравками и достраивать недостающие части гамильтоновыми цепями. Обратное условие сохранения смежности старых ребер не позволяет построить гамильтонов цикл далее графа G_1 , так как затравки H на каждом шаге порождения склеиваются к существующим вершинам, и цикл проходит общие вершины не менее двух раз.

Следствие 4.2. Если смежность старых ребер предфрактального графа G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ сохраняется, то на нем не существует гамильтонова цикла.

Следствие 4.3. При выполнении условий теоремы о существовании гамильтонова цикла полиномиальный алгоритм выделяет гамильтонов цикл на предфрактальном графе G_l за время $O(c \cdot N)$, где $N = n^l$ и $c = 2^n - \text{const}$.

Используя переборный алгоритм, выделение гамильтонова цикла или цепи на затравке H в худшем случае потребует выполнения 2^n операций. Всего на предфрактальном графе G_l присутствует $\frac{n^l - 1}{n - 1} \leq n^l = N$ затравок.

2. Остов с максимальным числом висячих вершин.

Теорема 4.2. Если на затравке H существует остов, у которого не менее $k \leq n$ висячих вершин и смежность старых ребер сохраняется, то на предфрактальном графе G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ существует остов, у которого не менее $K = (k - 1) \cdot n^{l-1}$ висячих вершин.

Доказательство.

На графе G_1 существует остов $T_1 = T_1^1$, у которого не менее $k \leq n$ висячих вершин по условию теоремы, так G_1 представляет собой затравку H . На следующем шаге ко всем вершинам G_1 применяется процедура ЗВЗ и формируется G_2 с сохранением смежности старых ребер. Или по-другому к вершинам остова T_1 применяется процедура ЗВЗ с сохранением смежности старых ребер. Поскольку все вершины T_1 замещаются затравками, то ни одна такая вершина не является висячей в G_2 . Выделяя остовы T_s^2 на затравках второго ранга и добавляя остов T_1 , формируется остов T_2 на G_2 . В остова T_2 висячими могут являться только висячие вершины в T_s^2 . На любой затравке не менее $k \leq n$ висячих вершин. Остовы T_s^2 фактически склеиваются с вершинами T_1 одной из своих вершин. В худшем случае остов T_s^2 может склеиваться своей висячей вершиной, тогда количество висячих вершин остова T_2 в G_2 равно произведению числа висячих вершин без одной на затравке на число затравок второго ранга: $(k - 1)n$.

Продолжая процедуру порождения траектории G_l , $l = 2, 3, \dots, L$ затравками H и выделяя на них остовы T_s^l , $s = 1, 2, \dots, n^{l-1}$, формируются остовы T_l на предфрактальных графах G_l . Таким образом, для каждого

предфрактального графа G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ выделен остов T_l с не менее $(k - 1)n^{l-1}$ вершин.

Теорема доказана.

Следствие 4.4. При выполнении условий теоремы о существовании полиномиальный алгоритм выделяет на предфрактальном графе G_l остов, у которого не менее $K = (k - 1) \cdot n^{l-1}$ висячих вершин, за время $O(c \cdot N)$, где $N = n^{l-1}$ и $c = 2^n - \text{const}$.

Выделение остовных деревьев с максимальным числом висячих вершин на затравках может осуществляться любым известным алгоритмом, в худшем случае потребует выполнения 2^n операций. Всего на предфрактальном графе G_l присутствует $\frac{n^l - 1}{n - 1} \leq n^l = N$ затравок.

3. Монохроматический треугольник.

Теорема 4.3. На предфрактальном графе G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ не существует треугольников, состоящих из ребер соседних рангов.

Доказательство.

Рассматривается предфрактальный граф второго ранга G_2 . Предположим, что существует треугольник, состоящий из двух ребер первого ранга и одного ребра второго ранга. Применим операцию стягивания затравок, обратную ЗВЗ, тогда два смежных ребра первого ранга стягиваются в кратное ребро, что противоречит определению предфрактального графа. Предположим, что существует треугольник, состоящий из двух ребер второго ранга и одного ребра первого ранга. Применив операцию стягивания затравок, два смежных ребра второго ранга стягиваются в вершину, а ребро первого ранга представляет собой петлю, что также противоречит определению предфрактального графа.

Рассматривается предфрактальный граф l -го ранга G_l . Предположим, что существует треугольник, состоящий из двух ребер $(l - 1)$ -го ранга и одного ребра l -го ранга. Применив операцию стягивания затравок l -го ранга, получим, что два смежных ребра $(l - 1)$ -го ранга стягиваются в кратное ребро, что противоречит определению предфрактального графа. Предположим, что

существует треугольник, состоящий из двух ребер l -го ранга и одного ребра $(l - 1)$ -го ранга. Применяя операцию стягивания затравок l -го ранга, два смежных ребра l -го ранга стягиваются в вершину, а ребро $(l - 1)$ -го ранга представляет собой петлю, что также противоречит определению предфрактального графа. Таким образом, на предфрактальном графе G_l невозможно построить треугольник из ребер соседних рангов.

Теорема доказана.

Теорема 4.4. На предфрактальном графе G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ не существует треугольников, состоящих из ребер разных рангов.

Доказательство.

На предфрактальном графе G_l невозможно построить треугольник из ребер соседних рангов, как было доказано в предыдущей теореме.

Рассматривается предфрактальный граф l -го ранга G_l . Предположим, что существует треугольник, состоящий из двух ребер l_1 -го ранга и одного ребра l_2 -го ранга, $l_1 < l_2$, где $l_1, l_2 \in [1, 2, \dots, L]$. Применив операцию стягивания затравок l_2 -го ранга, получим, что два смежных ребра l_1 -го ранга стягиваются в кратное ребро, что противоречит определению предфрактального графа. Предположим, что существует треугольник, состоящий из двух ребер l_2 -го ранга и одного ребра l_1 -го ранга, $l_1 < l_2$. Применяя операцию стягивания затравок l_2 -го ранга, два смежных ребра l_2 -го ранга стягиваются в вершину, а ребро l_1 -го ранга представляет собой петлю, что также противоречит определению предфрактального графа. Теперь предположим, существует треугольник, состоящий из одного ребра l_1 -го ранга, одного ребра l_2 -го ранга и одного ребра l_3 -го ранга $l_1 < l_2 < l_3$, где $l_1, l_2, l_3 \in [1, 2, \dots, L]$. Применяя операцию стягивания затравок l_3 -го ранга, получим что два смежных ребра l_1 -го и l_2 -го рангов стягиваются в кратное ребро, что противоречит процедуре порождения предфрактального графа и выводит из класса предфрактальных графов замкнутых относительно операции ЗВЗ. Таким образом, на предфрактальном графе G_l невозможно построить треугольник из ребер разных рангов.

Теорема доказана.

Теорема 4.5. Если затравка H – монохроматический треугольник, то предфрактальный граф G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ также монохроматический треугольник.

Доказательство.

Предфрактальный граф G_1 является монохроматическим треугольником по условию теоремы, так представляет собой затравку H . То есть E_1 можно разбить на два непересекающихся подмножества E_1^1 и E_2^1 , каждое из которых не содержит треугольников.

На графе второго ранга G_2 к графу G_1 добавляются затравки H , множество ребер каждой из них можно разбить на два непересекающихся E_{s1}^2 и E_{s2}^2 . Объединяем все E_{s1}^2 в одно множество E' , а все E_{s2}^2 во второе множество E'' . Новые треугольники после объединения не могут появиться, так как ребра затравок второго ранга не пересекаются. Добавляя E_1^1 к E' , а E_2^1 к E'' также новых треугольников не образуется, в силу выполнения теоремы о невозможности существования треугольников из ребер разных рангов. Таким образом, ребра G_2 разделены на два непересекающихся подмножества E' и E'' , не содержащих треугольников.

Рассматривается предфрактальный граф l -го ранга G_l , $l \in [2, 3, \dots, L]$ полученный из G_{l-1} операцией ЗВЗ H . Ребра каждой затравки l -го ранга можно разбить на два непересекающихся подмножества E_{s1}^l и E_{s2}^l . Объединяем все E_{s1}^l в одно множество E' , а все E_{s2}^l во второе множество E'' . Новых треугольников после объединения не может появиться, так как ребра затравок l -го ранга не пересекаются. Добавляя E_{s1}^{l-1} к E' , а E_{s2}^{l-2} к E'' также новых треугольников не образуется, в силу выполнения теоремы о невозможности существования треугольников из ребер разных рангов. Получаем, что ребра G_l разделены на два непересекающихся подмножества E' и E'' , не содержащих треугольников.

Таким образом, предложена процедура разделения множества ребер предфрактального графа G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ на два непересекающихся подмножества E' и E'' , не содержащих треугольников. Процедура проводится пошагово от графа G_1 к G_2 и так далее до G_l включительно.

Теорема доказана.

Следствие 4.5. При выполнении условий теоремы о монохроматическом треугольнике полиномиальный алгоритм разделяет множество ребер предфрактального графа G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ на два непересекающихся подмножества, не содержащих треугольники, за время $O(c \cdot N)$, где $N = n^{l-1}$ и $c = 2^n - \text{const}$.

Используя переборный алгоритм, разделение множества ребер на затравке H , в худшем случае потребует выполнения 2^n операций. Всего на предфрактальном графе G_l присутствует $\frac{n^l - 1}{n - 1} \leq n^l = N$ затравок.

4. Клика.

Теорема 4.6. Если на затравке H существует клика размером не менее $k \leq n$, то на предфрактальном графе G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ существует клика размером не менее k .

Доказательство.

На предфрактальном графе G_l на затравках l -го ранга существуют клики размером не менее $k \leq n$ в силу условия теоремы.

Клики размера k , выделенные на затравках l -го ранга, нельзя увеличить за счет старых ребер предыдущих рангов. Клика состоит из треугольников, и для того, чтобы перейти к клике размера $(k + 1)$, необходимо использовать ребра предыдущих рангов (ребра разных затравок одинакового ранга не пересекаются). Но построить треугольники из ребер разных рангов нельзя в силу ограничений теоремы о существовании треугольников, состоящих из ребер разных рангов. Таким образом, выбирая любую клику размера k на затравках, невозможно увеличить ее до размера $(k + 1)$ на предфрактальном графе.

Теорема доказана.

5. Независимое множество.

Теорема 4.7. Если затравка H содержит независимое множество мощности не менее $k \leq n$ и смежность старых ребер сохраняется, то предфрактальный граф G_l , $l \in [1, 2, \dots, L]$ содержит независимое множество мощности $K \leq k \cdot n^{l-1}$.

Доказательство.

По условию теоремы G_1 содержит независимое множество V'_1 мощности не менее $k \leq n$, так как представляет собой затравку H . Выделяя независимое множество V'_1 на G_1 , смежные вершины перемещаются во множество V''_1 . На следующем шаге из G_2 удаляются вершины V''_1 и перемещаются в V'_2 , тогда в G'_2 все новые затравки второго ранга не пересекаются (в силу сохранения смежности старых ребер), так как вершины со смежными старыми ребрами первого ранга удалены. На урезанных затравках G'_2 выделяются независимые множества и сохраняются в V'_2 , а все смежные вершины помещаются в V''_2 . Множество V''_2 содержит в себе удаленные вершины на первом шаге G_1 и втором шаге G_2 .

На следующем шаге из G_3 удаляются вершины V''_2 и перемещаются в V'_3 , тогда в G'_3 все новые затравки третьего ранга не пересекаются, так как вершины со смежными старыми ребрами второго ранга удалены. На урезанных затравках G'_3 выделяются независимые множества и сохраняются в V'_3 , а все смежные вершины помещаются в V''_3 . Множество V''_3 содержит в себе удаленные вершины на первом шаге G_1 , втором шаге G_2 и третьем шаге G_3 .

Продолжая процедуру порождения траектории G_l , $l \in [2, 3, \dots, L]$ затравками H , на предфрактальных графах G_l формируются независимые множества V'_l . Таким образом, для каждого G_l ранга $l \in [1, 2, \dots, L]$ выделено независимое множество V'_l мощности $K \leq k \cdot n^{l-1}$.

Теорема доказана.

Для понимания возможности использования инструментария предфрактальных графов для любых классов графов ранее предложена мера сходства в качестве метрики оценки двух графов.

Использование специальных свойств предфрактальных графов для решения NP-полных задач открывает возможности для создания эффективных алгоритмов по сравнению с известными. Свойства самоподобия и масштабируемости позволяют решать задачи оптимизации быстрее, чем при использовании «традиционных» классов графов.

Выводы к главе 4

Научным результатом, полученным в четвертой главе, является новый метод реконfigurирования СДСС НПМ БР, отличающийся от известных методов, а) построением начального графа конфигурации в соответствии с заданными требованиями, б) формированием агрегированного топологического индекса текущего графа конфигурации, в) реконfigurированием графа конфигурации в условиях деструктивных воздействий, а также применением теоретико-графовой модели, учитывающей иерархические уровни на предфрактальных графах, что позволяет сохранять структурно-функциональные характеристики системы на заданном уровне при изменении ее состава и структуры. В рамках основного научного результата получены следующие частные результаты.

1) Сформирована и описана последовательность действий с момента построения конфигурации СДСС НПМ БР и далее в процессе функционирования в условиях деструктивных воздействий. Также сформирована подробная схема метода динамического реконfigurирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий на основе описанной выше последовательности действия и методик.

2) Разработана методика построения графа конфигурации СДСС НПМ БР, описан класс предфрактальных графов и механизм порождения последовательности конфигураций. Описана класс иерархических графов и построение конфигураций СДСС НПМ БР на их основе. Предложены примеры расчетов АТИ для различных конфигураций СДСС НПМ БР на основе предфрактальных и иерархических графов.

3) Разработана методика реконfigurирования, являющейся частью метода реконfigurирования СДСС НПМ БР в части изменения графа конфигурации для обеспечения требуемых значений АТИ и штатного функционирования системы в условиях деструктивных воздействий. Методика реконfigurирования обеспечивает функционирование СДСС НПМ БР в результате деструктивных воздействий посредством перенастройки теоретико-графовой модели в части изменения ее графа конфигурации. Методика как составная часть метода реконfigurирования в

непосредственной связи с теоретико-графовой моделью обеспечивает жизненный цикл СДСС НПМ БР. Методика реконфигурирования представлена следующими действиями: 1) операция воздействия (деструктивного, управляющего) на граф конфигурации СДСС НПМ БР и его влияние на агрегированный топологический индекс; 2) процедура и описание операции реконфигурирования СДСС НПМ БР в результате деструктивного воздействия; 3) операция распределенного параллельного реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий.

4) Разработана методика управления информационным обменом между средствами мониторинга в процессе реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий. Методика управления информационным обменом включает в себя процедуру управления информационным обменом, вычисление радиуса устойчивости решения, частные методики уточнения и корректировки информационных каналов.

5) Разработана методика многокритериальной оптимизации СДСС НПМ БР при возникновении аномальных вычислительных сложностей. Каждая из трех составляющих – теоретико-графовая модель, АТИ, методика реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий подразумевает решение оптимизационных задач. Значения структурно-функциональных характеристик соответствуют значениям критериев оптимизации многокритериальной задачи конфигурирования. В частности, сформулирована постановка задачи многокритериальной оптимизации СДСС НПМ БР при возникновении аномальной вычислительной сложности, разработана частная методика противодействия аномальной вычислительной сложности оптимизации СДСС НПМ БР, проведена классификация многокритериальных задач на многовзвешенных предфрактальных графах с действительными и нечеткими числами, разработана частная методика решения многокритериальных задач класса предфрактальных графов большой размерности, проведено исследование NP-полных задач на предфрактальных графах и выделены условия для ряда задач, при которых возможно выделить решения.

Глава 5

Программно-алгоритмический комплекс реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

При решении оптимизационных задач реконfigurирования СДСС НПМ БР в ряде случаев возникают вычислительные сложности, при которых время ожидания результатов алгоритма больше времени реконfigurирования самой СДСС НПМ БР, что не позволяет принять своевременное и оптимальное решение о реконfigurировании.

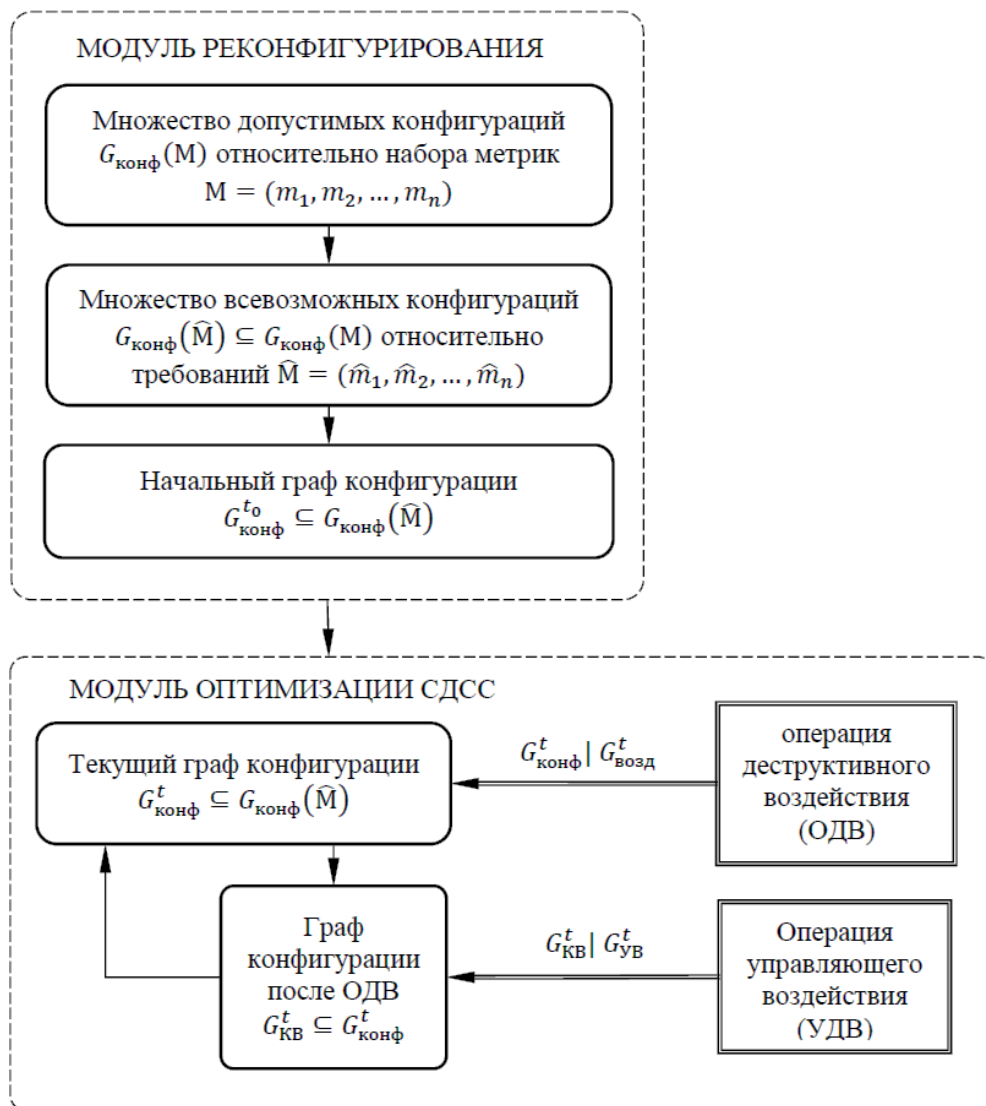
В связи с увеличением вычислительной сложности выполнения алгоритмов в данном разделе представлен программно-аппаратный комплекс, необходимый для реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности на больших предфрактальных графах и предназначены для анализа и оптимизации СДСС НПМ БР, при аномальных вычислительных нагрузках включая вычисление связности, кластеризации и др.

В диссертации под временной сложностью понимается время выполнения алгоритма α , которое обозначается $\tau_p(\alpha)$, при этом временная сложность последовательного алгоритма принимается равной его вычислительной сложности $\tau_{p=1}(\alpha) = \tau(\alpha)$ [343]. Для параллельных алгоритмов с при количестве вычислителей (процессоров) два и более временная сложность меньше временной сложности последовательной реализации алгоритма $\tau_{p \geq 2}(\bar{\alpha}) = \tau(\bar{\alpha})$.

В данном разделе приняты следующие обозначения: алгоритм α , примененный к задаче Z_t , обозначается $\alpha(Z_t)$; результатом работы алгоритма $\alpha(Z_t)$ является МА X_α , а $\tau(X_\alpha)$ является сложностью нахождения алгоритмом α указанного МА X_α задачи из Z_t .

5.1 Состав программно-алгоритмического комплекса реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

В соответствии с разработанным методом, представленным в главе 4, программно-алгоритмический комплекс реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности состоит из модуля конфигурирования и модуля оптимизации СДСС НПМ БР на основе представленных оптимальных по вычислительным ресурсам алгоритмам, схема представлена на рисунке 5.1.



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.1 – Схема программно-алгоритмического комплекса реконfigurирования СДСС НПМ БР

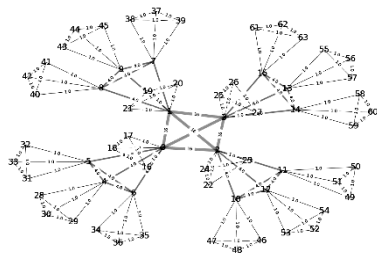
Функционирование ПАК, состоящего из двух модулей, осуществляется в следующем порядке: вначале запускается модуль реконфигурации на основе определения значения количества вершин затравки H [344]. Список возможных затравок H : $H1$ (треугольник); $H2$ (квадрат); $H3$ (квадрат с диагональю); $H4$ (полный граф 4-вершинный граф); $H5$ (звезда). Ранг предфрактального графа определяется параметром n_rank [345]. Процесс реконфигурации предфрактального графа состоит из двух частей. Первая – это описание графа по заданным начальным параметрам (затравка, номер ранга) и занесение значений в матрицу инцидентности. В качестве матрицы инцидентности используется контейнер *graph*, содержащий в себе нумерацию всех вершин, ребер и значения связи между ними. В контейнере *graph* вычисляются геометрические веса ребер (*weight*) при заданном коэффициенте пропорциональности (*tetta*). Функция *simple_prefractal_graph* формирует и заполняет контейнер *graph*.

Вторая часть – визуализация, то есть построение изображения предфрактального графа из заполненного контейнера *graph* [346]. Функция *draw_graph* рисует предфрактальный граф и сохраняет изображение в файл.

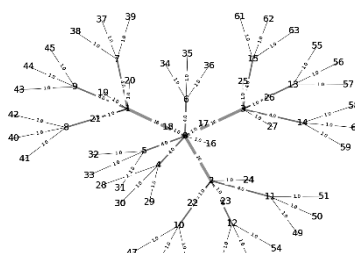
На рисунке 5.2 представлены результаты работы модуля реконфигурирования на примере различных вариантов предфрактального графа с затравкой H и при условии сохранения смежности старых ребер [347]. На некоторых изображениях не указаны номера вершин, чтобы визуально не перегружать рисунки.

Модуль оптимизации СДСС НПМ БР в составе ПАК основан на конструирование предфрактального графа с произвольной смежностью старых ребер. Как и предыдущем случае определяется перечень возможных затравок H : $H1$ (треугольник); $H2$ (квадрат); $H3$ (квадрат с диагональю); $H4$ (полный граф 4-вершинный граф); $H5$ (звезда). Ранг предфрактального графа задан параметром n_rank .

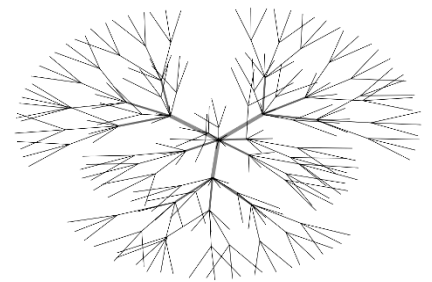
В процессе построения предфрактального графа пронумеровываются вершины и задаются веса ребер [348]. Для отображения процедуры выделения остоного дерева всем ребрам приписаны веса равные единицы. Функция *draw_min_spanning_tree* выделяет остоное дерево предфрактального графа, описанного в контейнере *graph*.



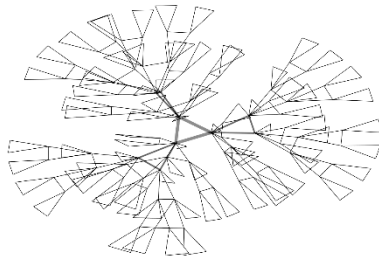
H4, n_rank=3



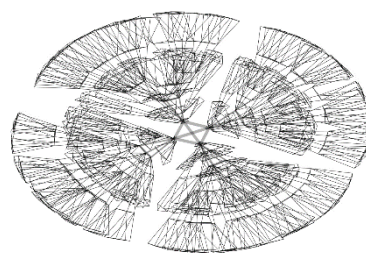
H5, n_rank=3



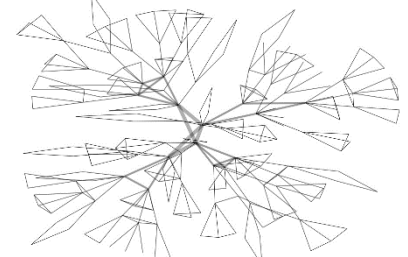
H5, n_rank=4



H1, n_rank=4



H4, n_rank=4

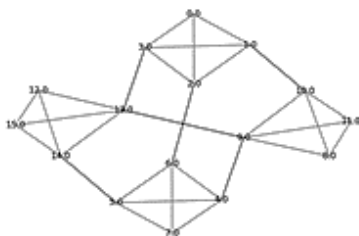


H, n_rank=4

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.2 – Визуализация графов при сохранении смежности старых ребер

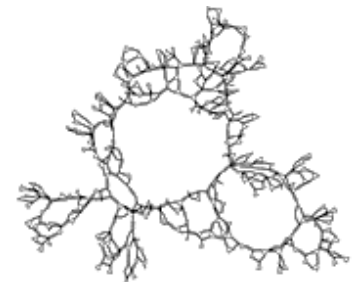
На рисунке 5.3 представлена работа функции выделения ОДМВ на предфрактальных графах, порожденных различными затравками.



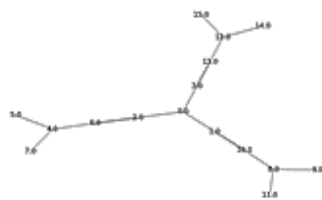
H4, n_rank=2



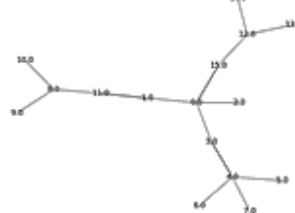
H3, n_rank=2



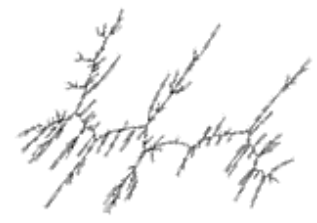
H1, n_rank=6



ОДМВ: H4, n_rank=2



ОДМВ: H3, n_rank=2



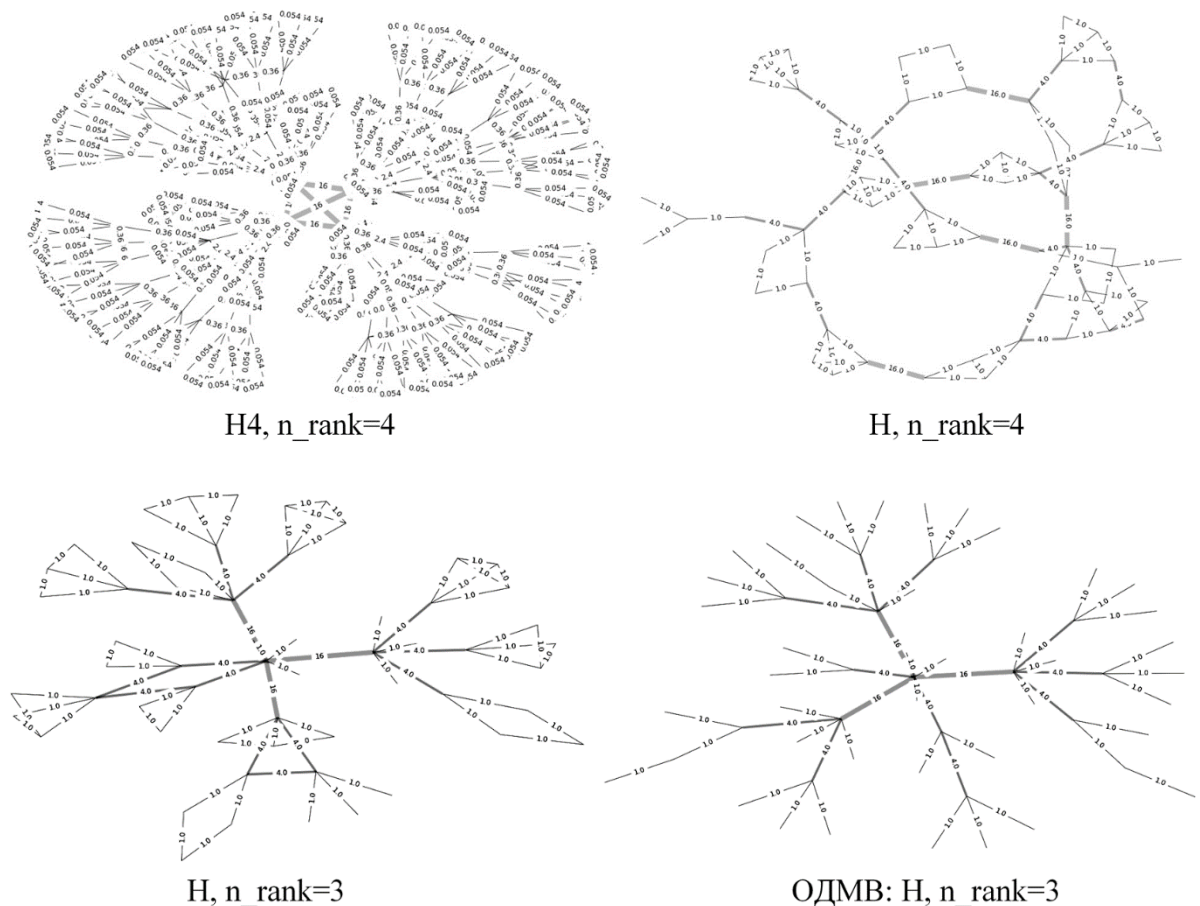
ОДМВ: H1, n_rank=6

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.3 – Визуализация графов с произвольной смежностью старых ребер

Каждому ребру приписывается вес, зависящий от ранга. Далее представлены примеры, где в качестве веса ребер первого ранга принимается значение $weight=16$, а коэффициент пропорциональности $tetta=0,15$. В данном блоке происходит повышение вычислительной сложности алгоритмов за счет произвольной смежности ребер, что приводит к необходимости разработки модифицированных алгоритмов. На многовзвешенном графе ребрам приписывается один из трех типов весов: интервальное число, нечеткое множество и временной ряд. Все значения заносятся в таблицу весов, которая определяется функцией: $df=pd.DataFrame()$, где задаются столбцы $df['номер']$, $df['ребро']$, $df['вес']$.

На рисунке 5.4 представлена визуализация взвешенного графа.



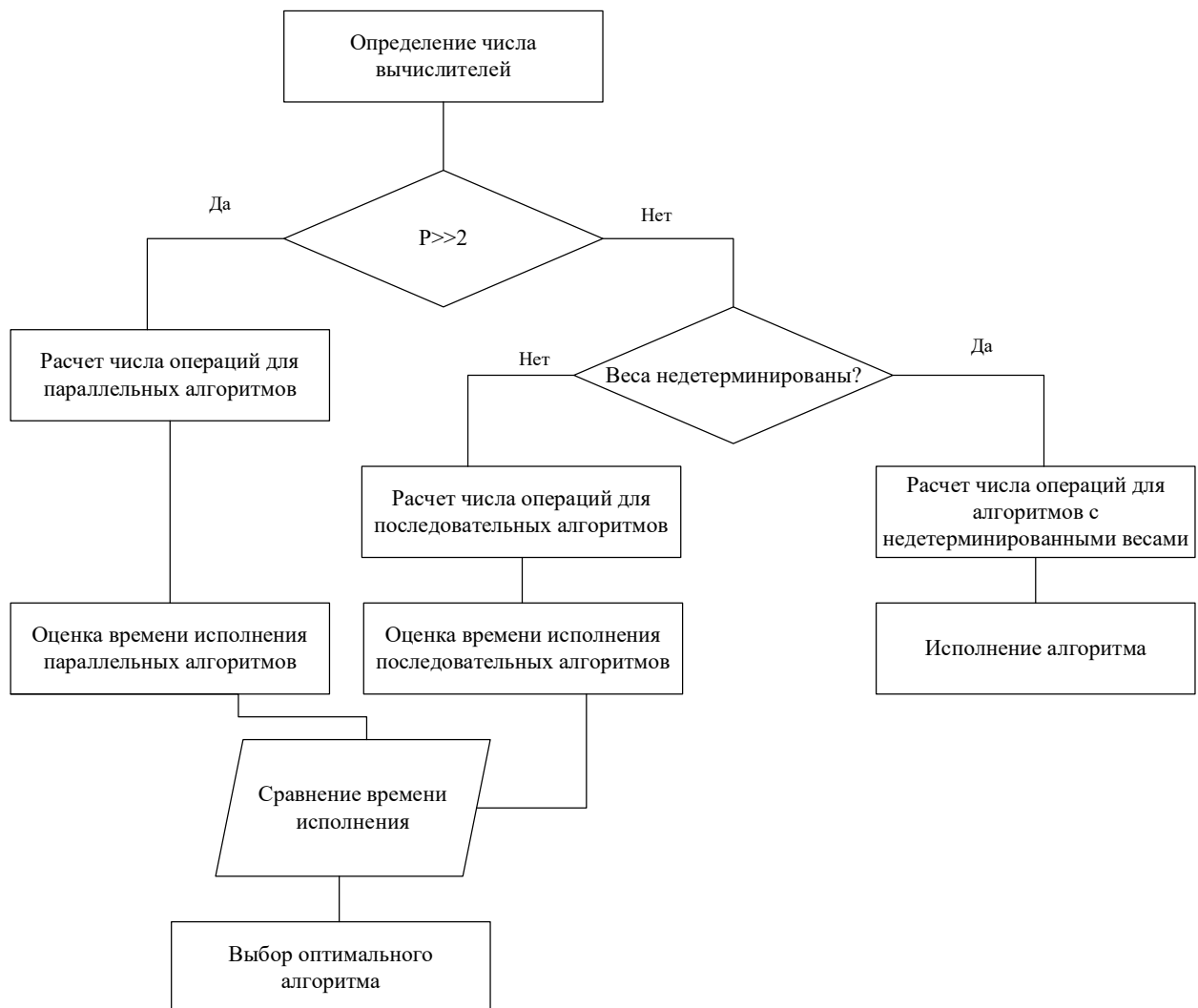
Источник: составлено автором.

Рисунок 5.4 – Визуализация взвешенных графов

А именно, визуализация взвешенного графа G_4 , порожденного затравкой H_4 , при сохранении смежности старых ребер; визуализация

взвешенного графа G_4 , порожденного множеством затравок H , с произвольной смежностью старых ребер; визуализация взвешенного графа G_3 , порожденного множеством затравок H , при сохранении смежности старых ребер; визуализация результатов работы функции выделения ОДМВ для представленного графа G_3 .

Поскольку каждая СДСС НПМ БР состоит из разного числа вычислителей (процессоров) и элементов, то перед формализацией работы модулей необходимо сформировать схему выбора алгоритма в зависимости от числа вычислителей и недетерминированности весов ребер графа. Схема комплексного алгоритма с учетом числа вычислителей и недетерминированности весов представлен на рисунке 5.5.



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.5 – Схема комплексного алгоритма с учетом числа вычислителей и недетерминированности весов



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.6 – Алгоритмы оптимизации СДСС НПМ БР при возникновении аномальных вычислительных сложностей в составе ПАК

На рисунке 5.6 представлены алгоритмы, которые обеспечивают базовую функциональность СДСС НПМ БР в условиях ограниченных

ресурсов, позволяя быстро оценивать АТИ и принимать решения о маршрутизации данных на основе рисунка 5.2. В интересах минимизации времени выполнения алгоритма производится минимальный по времени выбор под заданную СДСС НПМ БР.

Для обеспечения оптимального времени конфигурирования необходимо определить наилучший алгоритм по критерию вычислительной сложности.

5.2 Алгоритмы ПАК оптимизации на больших предфрактальных графах при возникновении аномальных вычислительных сложностей

В ряде случаев принятие своевременного решения о реконфигурации системы затруднительно в силу высокой вычислительной сложности алгоритмов оптимизации. Время ожидания результатов алгоритма больше времени реконфигурации СДСС НПМ БР, при котором необходимо заново запускать расчет по алгоритму.

Классификация алгоритмов по структурной принадлежности состоит в том, что на графе G_L алгоритм обрабатывает отдельные подграфы, а после объединяет результаты в различной конфигурации в зависимости от критериев задачи. В качестве подграфов при решении задачи компенсации аномальной вычислительной сложности являются затравки и блоки разных рангов для последующей классификации алгоритмов по структурной принадлежности.

Анализ показал [349-351], что параллельные вычисления для динамической обработки данных, несмотря на множество примеров применения в прикладных задачах, связаны с аномальной вычислительной сложностью. Данные алгоритмы не учитывают самоподобие и иерархичность графов СДСС НПМ БР, обеспечивая устойчивость к структурным изменениям. Адаптация к предфрактальным графам должна обеспечивать применимость к гетерогенным сетям, улучшая управление информационными потоками. В данном разделе предлагается сравнение вычислительной

сложности новых алгоритмов (последовательных и параллельных) с классическими методами, такими как алгоритмы Дейкстры или Краскала, по метрикам времени исполнения на предфрактальных графах СДСС НПМ БР.

Для группы алгоритмов α с последовательной, параллельной реализацией и с недетерминированными весами приводятся развернутые описания вычислительных сложностей, для остальных алгоритмов, сокращенное без дополнительных материалов.

Эффективность и новизна данных алгоритмов заключается в оригинальном представлении предфрактальных графов и в том, что в качестве медианы предфрактального графа G_L выбирается вершина x_0 с наименьшим передаточным числом $\sigma(x_0) = \min_{s_1} [\sigma(x_{s_1}^1)]$. В сравнении с классическими алгоритмами данные алгоритмы обеспечивают точное и оперативное решение задачи о размещении кратного центра.

На основе представленных алгоритмов имеется возможность формирования многоступенчатого ПАК, для которого полностью компенсируются воздействия аномальной вычислительной сложности.

Быстрые последовательные алгоритмы при решении задач реконфигурации

Алгоритм размещения центров

Достижение требуемой оперативности принятия решения о реконфигурации СДСС НПМ БР обеспечивается по результатам поиска центра предфрактального графа с учетом аномальной вычислительной сложности. Пусть x – подмножество, состоящее из p вершин множества V_L , $d(x, v_k)$ – кратчайшее из расстояний между вершинами множества x и вершиной v_k , то есть $d(x, v_k) = \min_{v_j \in x} [d(v_j, v_k)]$ по фиксированному набору весов из M .

Число разделения $s(x) = \max_{v_k \in V_L} [d(x, v_k)]$. Множество x^* , для которого $s(x^*) = \min_{x \subseteq V_L} [s(x)]$, называется p -центром предфрактального графа G_L .

Кратные центры $\{x\}$ на G_L образуют МДР $X = X(G_L) = \{x\}$ [352].

На МДР x определяется ВЦФ и критерии (5.1-5.5) [353; 354]:

$$F(x) = (F_1(x), \dots, F_M(x), \dots, F_{2M}(x), F_{2M+1}(x), F_{2M+2}(x)), \quad (5.1)$$

$$F_i(x) = s_i(x) \rightarrow \min, i = 1, 2, \dots, M, \quad (5.2)$$

$$F_{M+i}(x) = \sum_{t=1}^p \rho_{it} \rightarrow \min, i = 1, 2, \dots, M, \quad (5.3)$$

$$F_{2M+1}(x) = h \rightarrow \min, \quad (5.4)$$

$$F_{2M+2}(x) = p \rightarrow \min, \quad (5.5)$$

где $s_i(x)$ – число разделения по i -му набору весов;

ρ_{it} – радиус t -вершины p -центра;

h – количество типов центров разного ранга;

p – количество вершин кратного центра.

Множество алгоритмов $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{L-1}$ решает многокритериальную задачу размещения кратного центра на графе G_L [355]. В качестве обобщенного алгоритма размещения кратного центра используется следующее обозначение: $\alpha = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{L-1}\}$. Множество алгоритмов $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{L-1}$ может быть расширено новыми группами алгоритмов для разных классов графов.

На рисунке 5.7 представлен алгоритм α_l выделения p -центра G_L .

Алгоритм α_l	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	x_l – p -центр G_L .
Шаг 1.	Найти центр для B_s^{L-l} , $s = 1, 2, \dots, n^l$, $l \in [1, L-1]$ посредством α_0 .
Шаг 2.	Объединение n^l подграфов B_s^{L-l} составляет p -центр x_l графа G_L .

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.7 – Алгоритмы α_l размещения центра

На рисунке 5.8 представлен алгоритм α_0 выделения центра G_L .

Алгоритм α_0	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	вершина x_0 – центр G_L .
Шаг 1.	Для $x_{s_L}^L$ из $z_{s_L}^L$, $s_L = 1, 2, \dots, n^{L-1}$ найти $s(x_{s_L}^L) = \max_{j_L=1,2,\dots,n-1} [d(x_{s_L}^L, v_{j_L}^L)]$, где $d(x_{s_L}^L, x_{s_L}^L) = 0$, посредством алгоритма Дейкстры.
Шаг $L - l + 1$.	Для всех $l = L - 1, L - 2, \dots, 2$ выполнить: Для $x_{s_l}^l$ из $z_{s_l}^l$ найти $s(x_{s_l}^l) = \max_{j_l} [d(x_{s_l}^l, v_{j_l}^l) + s(x_{j_l}^{l+1})]$, $s_l = 1, 2, \dots, n^{l-1}$, где $d(x_{s_l}^l, x_{s_l}^l) = 0$, посредством алгоритма Дейкстры.
Шаг L .	Для $x_{s_1}^1$ из z_1^1 найти $s(x_{s_1}^1) = \max_{j_1} [d(x_{s_1}^1, v_{j_1}^1) + s(x_{j_1}^2)]$, $s_1 = 1, 2, \dots, n$, где $d(x_{s_1}^1, x_{s_1}^1) = 0$ посредством алгоритма Дейкстры.
Шаг $L + 1$.	Выбрать из $x_{s_1}^1$, $s_1 = 1, 2, \dots, n$ такой x_0 , что $s(x_0) = \min_{s_1} [s(x_{s_1}^1)]$.

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.8 – Алгоритмы α_0 размещения центра

Алгоритм α выделяет кратный центр x_{il} , $l \in [1, 2, \dots, L]$ на графе G_L оцениваемый по критериям $a \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \leq F_i(x_{il}) \leq b(n-1) \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}$, $i = 1, 2, \dots, M$, $an^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \leq F_i(x_{il}) \leq b(n-1)n^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}$, $i = M+1, M+2, \dots, 2M$, $F_{2M+1}(x_{il}) = l$ и $F_{2M+2}(x_{il}) = n^l$.

В качестве оценки критерия $i = 1, 2, \dots, M$ принята верхняя оценка числа разделения: $a \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \leq F_i(x_{il}) \leq b(n-1) \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}$.

Верхняя оценка суммы радиусов кратного центра:

$$an^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \leq F_i(x_{il}) \leq b(n-1)n^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}, i = M+1, M+2, \dots, 2M.$$

Число центров разного ранга $F_{2M+1}(x_{il}) = l$. Общее число вершин кратного центра $F_{2M+2}(x_{il}) = n^l$.

Представленные алгоритмы размещения кратного центра позволяют в условиях аномальной вычислительной сложности принять решение о реконфигурации СДСС НПМ БР. В сравнении с классическими алгоритмами данные алгоритмы обеспечивают точное и оперативное решение задачи о размещении кратного центра.

Рассмотрим вычислительную сложность алгоритмов α размещения центров. Для быстрых последовательных алгоритмов вычислительная сложность $\tau(\alpha_0) = O(4n^2N)$. Поиск кратчайшего пути процедурой Дейкстры

и выбор максимального элемента на одной подграф-затравке требует $2n^2$ операций. Для обработки всех затравок требуется выполнение операций:

$$2n^{L+1} + 2n^L + 2n^{L-1} + \dots + 2n^3 + n^3 + n^2 \leq 2n^{L+1} + 2n^L + 2n^{L-1} + \dots + 2n^3 + 2n^2 + n^3 = 2 \frac{n^{L+1}n - n^2}{n-1} + n^3 \leq 2n^{L+2} - n^2 + n^3 \leq 2n^{L+2} + 2n^{L+2} = 4n^2n^L = 4n^2N.$$

Таким образом, $\tau(\alpha_0)$ меньше вычислительной сложности алгоритма Флойда-Уоршелла в $n^{L-2}/4$ раз.

Для алгоритма α_l вычислительная сложность $\tau(\alpha_l) = O(4n^2N)$. Процедура α_0 выделяет центр на отдельных блоках B_S^{L-l} за $4n^2n^{L-l} = 4n^{L-l+2}$ операций. Выделение кратного центра потребует выполнения $4n^{L-l+2}n^l = 4n^2n^L = 4n^2N$ операций, где n^l – количество всех блоков.

Для алгоритма α вычислительная сложность составляет $\tau(\alpha) = O(4n^2N)$. По каждому из множества алгоритмов $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{L-1}$ приведены вычислительные сложности. Наибольшая вычислительная сложность принимается в качестве вычислительной сложности алгоритма α .

Алгоритм размещения медиан

Алгоритм размещения медиан необходим для оптимизации размещения компонент СДСС НПИМ БР таким образом, чтобы минимизировать суммарные потери при реконфигурации от начального положения до всех других точек [356; 357]. Алгоритм находит «медиану графа» – вершину, сумма кратчайших расстояний от которой до всех других вершин минимальна, и находит наиболее эффективное место для расположения компонента СДСС НПИМ БР.

Пусть x – подмножество, состоящее из p вершин множества V_L , $d(x, v_k) = \min_{v_j \in x} [d(v_j, v_k)]$ – кратчайшее из расстояний между вершинами множества x и вершиной v_k по фиксированному набору весов из M [358].

Передающее число $\sigma(x) = \sum_{v_k \in V_L} [d(x, v_k)]$. Множество x^* , для которого $s(x^*) = \min_{x \subseteq V_L} [\sigma(x)]$, называется p -медианой предфрактального графа G_L [359]. Кратные медианы $\{x\}$ на G_L образуют МДР $X = X(G_L) = \{x\}$.

На МДР x определяется ВЦФ и критерии (5.6-5.10):

$$F(x) = (F_1(x), \dots, F_M(x), \dots, F_{2M}(x), F_{2M+1}(x), F_{2M+2}(x)), \quad (5.6)$$

$$F_i(x) = \sigma_i(x) \rightarrow \min, i = 1, 2, \dots, M, \quad (5.7)$$

$$F_{M+i}(x) = \sum_{t=1}^p \rho_{it} \rightarrow \min, i = 1, 2, \dots, M, \quad (5.8)$$

$$F_{2M+1}(x) = h \rightarrow \min, \quad (5.9)$$

$$F_{2M+2}(x) = p \rightarrow \min, \quad (5.10)$$

где $\sigma_i(x)$ – передаточное число по i -му набору весов;

ρ_{it} – радиус t -вершины p -медианы;

h – количество типов медиан разного ранга;

p – количество вершин кратной медианы.

На рисунке 5.9 представлен алгоритм β_l выделения p -медианы G_L .

Алгоритм β_l	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	x_l – p -медиана G_L .
Шаг 1.	Последовательно для B_s^{L-l} , $s = 1, 2, \dots, n^l$, $l \in [1, L - 1]$ найти медиану, используя процедуру β_0 .
Шаг 2.	На выходе шага 1 получены n^l медиан блоков B_s^{L-l} , которые формируют p -медиану x_l графа G_L .

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.9 – Алгоритмы β_l размещения кратной медианы

На рисунке 5.10 представлен алгоритм β_0 выделения медианы G_L [360].

Алгоритм $\beta = \{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{L-1}\}$ решает многокритериальную задачу размещения кратной медианы на графе G_L .

Алгоритм β выделяет кратную медиану x_{il} , $l \in [1, 2, \dots, L]$ на графе G_L оцениваемую по критериям $La(n-1)\theta^l \leq F_i(x_{il}) \leq Lb(n-1)^{L+1} \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}$,
 $i = 1, 2, \dots, M$, $an^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \leq F_i(x_{il}) \leq b(n-1)n^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}$, $i = M+1, M+2, \dots, 2M$, $F_{2M+1}(x_{il}) = l$ и $F_{2M+2}(x_{il}) = n^l$.

По каждому из множества алгоритмов $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{L-1}$ приведены оценки критериев. Наихудшие полученные оценки алгоритмов принимается

для обобщенного алгоритма β . Вычислительная сложность быстрых последовательных алгоритмов для размещения медиан составляет $\tau(\beta_0) = O(4n^2N)$, что в $n^{L-2}/4$ раза меньше вычислительной сложности алгоритма Флойда-Уоршелла. Тогда для $\tau(\beta_l) = O(4n^2N)$ и $\tau(\beta) = O(4n^2N)$.

Алгоритм β_0	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	вершина x_0 – медиана G_L .
Шаг 1.	Для каждой вершины $x_{s_L}^L$ подграф-затравки L -го ранга $z_{s_L}^L$, $s_L = 1, 2, \dots, n^{L-1}$ найти передаточное число $\sigma(x_{s_L}^L) = \sum_{j_L=1,2,\dots,n-1} [d(x_{s_L}^L, v_{j_L}^L)]$, где $d(x_{s_L}^L, x_{s_L}^L) = 0$, посредством алгоритма Дейкстры.
Шаг $L - l + 1$.	Для всех $l = L - 1, L - 2, \dots, 2$ выполнить: Для $x_{s_l}^l$ из $z_{s_l}^l$ найти передаточное число $\sigma(x_{s_l}^l) = \sum_{j_l} [d(x_{s_l}^l, v_{j_l}^l) + \sigma(x_{j_l}^{l+1})]$, $s_l = 1, 2, \dots, n^{l-1}$, где $d(x_{s_l}^l, x_{s_l}^l) = 0$, посредством алгоритма Дейкстры.
Шаг L .	Для $x_{s_1}^1$ из $z_{s_1}^1$ найти передаточное число $\sigma(x_{s_1}^1) = \sum_{j_1} [d(x_{s_1}^1, v_{j_1}^1) + \sigma(x_{j_1}^2)]$, $s_1 = 1, 2, \dots, n$, где $d(x_{s_1}^1, x_{s_1}^1) = 0$, посредством алгоритма Дейкстры.
Шаг $L + 1$.	Выбрать из $x_{s_1}^1$, $s_1 = 1, 2, \dots, n$ такую x_0 , что $\sigma(x_0) = \min_{s_1} [\sigma(x_{s_1}^1)]$.

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.10 – Алгоритмы β_0 размещения медианы

Представленный алгоритм $\beta = \{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{L-1}\}$, необходимый для размещения компонент в СДСС является оптимальным с точки зрения затрат на вычисления [361]. 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 $\sigma(x_0) = \min_{s_1} [\sigma(x_{s_1}^1)]$.

Алгоритм выделения остовного леса минимального веса

В интересах маршрутизации компонент СДСС НПМ БР после реконфигурирования с учетом ограничений по вычислительной сложности необходимо минимизировать время работы алгоритма выделения остовного леса минимального веса [362].

Пусть $x = (V_L, E_x)$ – остовный лес предфрактального графа G_L . Множество x^* , для которого суммарный вес ребер $\min \sum_{e \in E_x} w(e)$, называется

остовным лесом минимального веса (ОЛМВ) предфрактального графа G_L [363].

Остовные леса $\{x\}$ на G_L образуют МДР $X = X(G_L) = \{x\}$

На МДР x определена ВЦФ и критерии (5.11-5.15):

$$F(x) = (F_1(x), \dots, F_M(x), F_{M+1}(x), F_{M+2}(x), F_{M+3}(x)), \quad (5.11)$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x} w_i(e) \rightarrow \min, i = 1, 2, \dots, M, \quad (5.12)$$

$$F_{M+1}(x) = |x| \rightarrow \min, \quad (5.13)$$

$$F_{M+2}(x) = \deg D_k \rightarrow \min, \quad (5.14)$$

$$F_{M+3}(x) = |D_k| \rightarrow \min, \quad (5.15)$$

где $\sum_{e \in E_x} w_i(e)$ – суммарный вес x по i -му набору весов;

$|x|$ – количество компонент x ;

$\deg D_k = \max_{v \in D_k} \deg v$ – степень компоненты D_k в x , $k = \frac{n^L - 1}{n - 1}$;

$|D_k|$ – количество вершин D_k .

На рисунке 5.11 представлен алгоритм χ_l выделения ОЛМВ G_L .

Алгоритм χ_l	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	x_l – ОЛМВ G_L .
Шаг 1.	Последовательно для B_s^{L-l} , $s = 1, 2, \dots, n^l$, $l \in [1, L - 1]$ найти ОДМВ x_s^{L-l} , используя процедуру χ_0 .
Шаг 2.	На выходе шага 1 получены n^l ОДМВ блоков B_s^{L-l} , которые формируют ОЛМВ x_l графа G_L .

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.11 – Алгоритмы χ_l выделения ОЛМВ

На рисунке 5.12 представлен алгоритм χ_0 выделения ОДМВ G_L .

Алгоритм $\chi = \{\chi_0, \chi_1, \dots, \chi_{L-1}\}$ решает многокритериальную задачу выделения ОЛМВ на графе G_L .

Алгоритм χ выделяет ОЛМВ x_{il} , $l \in [1, 2, \dots, L]$ на графе G_L оцениваемый по критериям $F_{M+1}(x_{il}) = n^l$, $2 \leq F_{M+2}(x_{il}) \leq (n - 1)(L - l)$, $F_{M+3}(x_{il}) = n^{L-l}$ и $a(n - 1) \frac{(n\theta)^L - (n\theta)^l}{n\theta - 1} \leq F_i(x_{il}) \leq b(n - 1) \frac{(n\theta)^L - (n\theta)^l}{n\theta - 1}$, $i = 1, 2, \dots, M$.

Алгоритм χ_0	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	остовное дерево x_0 – ОДМВ G_L .
Для $l = L, L - 1, \dots, 1$ выполнить:	
Для $s = 1, 2, \dots, n^{l-1}$ выполнить:	
Шаг $L - l + 1. s$.	Выделить ОДМВ x_s^l на z_s^l с помощью процедуры Прима.
Шаг $L + 1$.	На выходе шага L выделены $k = \frac{n^L - 1}{n - 1}$ ОДМВ x_s^l на z_s^l , что соответствует ОДМВ на G_L .
Процедура Прима	
Вход:	взвешенный граф.
Выход:	ОДМВ.

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.12 – Алгоритмы χ_0 выделения ОДМВ

Алгоритм $\chi = \{\chi_0, \chi_1, \dots, \chi_{L-1}\}$ решает многокритериальную задачу выделения ОЛМВ на графе G_L .

Алгоритм χ выделяет ОЛМВ x_{il} , $l \in [1, 2, \dots, L]$ на графе G_L оцениваемый по критериям $F_{M+1}(x_{il}) = n^l$, $2 \leq F_{M+2}(x_{il}) \leq (n - 1)(L - l)$, $F_{M+3}(x_{il}) = n^{L-l}$ и $a(n - 1) \frac{(n\theta)^L - (n\theta)^l}{n\theta - 1} \leq F_i(x_{il}) \leq b(n - 1) \frac{(n\theta)^L - (n\theta)^l}{n\theta - 1}$, $i = 1, 2, \dots, M$.

По каждому из множества алгоритмов $\chi_0, \chi_1, \dots, \chi_{L-1}$ приведены оценки критериев. Наихудшие полученные оценки алгоритмов принимается для обобщенного алгоритма χ .

Решения, получаемые алгоритмами $\chi_0, \chi_1, \dots, \chi_{L-1}$, являются наследственными, а характеристики сохраняются. Доказательство этого следует из доказательств работы алгоритмов $\chi_0, \chi_1, \dots, \chi_{L-1}$ [364; 365].

Решения, получаемые алгоритмами $\chi_0, \chi_1, \dots, \chi_{L-1}$, на предфрактальном графе при сохранении смежности старых ребер являются составными. В процессе роста предфрактального графа все вершины текущего ранга замещаются взвешенными затравками. При сохранении смежности старых ребер ко всем вершинам примыкают подграфы одинакового веса. Тогда решение, выделенное на графе G_1 , будет входить в решение G_2 , а оно в свою очередь в решение G_3 и так далее до G_L включительно. Соответственно, представленный алгоритм выделения остовного леса минимального веса χ является оптимальным с точки зрения вычислительной сложности

необходимо минимизировать время работы алгоритма выделения остовного леса минимального веса.

Для быстрых последовательных алгоритмов вычислительная сложность алгоритмов ОЛМВ $\tau(\chi_0) = O(4n^2N)$ [366]. Тогда $\tau(\chi_0)$ меньше чем у алгоритма Прима в $n^{L-2}/4$ раз, и $\tau(\chi_l) = O(4n^2N)$, $\tau(\chi) = O(4n^2N)$, $\tau(\chi_L^*) = O(n^2N)$.

Таким образом, в данном разделе представлены оригинальные быстрые последовательные алгоритмы при решении задач реконфигурации. Применение данных алгоритмов возможно для СДСС НПМ БР с большим числом компонент. Однако, при увеличении числа связности компонент СДСС НПМ БР необходимо использовать параллельные алгоритмы, поскольку в таком случае необходимо множество вычислителей.

Параллельные алгоритмы для решения задачи оптимизации

В случае, если в СДСС НПМ БР имеется несколько вычислителей, то в интересах повышения оперативности принятия решения о реконфигурировании необходимо перейти к параллельным алгоритмам для обработки больших графов конфигураций в реальном времени [367]. Параллельная реализация последовательных алгоритмов позволяет уменьшать временную сложность на количество используемых процессоров [351; 368].

Параллельные алгоритмы сокращают время обработки данных в СДСС НПМ БР с динамической топологией, что повышает оперативность доставки информации и устойчивость к дестабилизирующим факторам [369]. Что особенно важно для систем с большой размерностью с тысячами и более узлами, в том числе при возникновении аномальной вычислительной сложности. Для параллельных алгоритмов вычислительная сложность определяется как числом вычислителей, так и от ранга предфрактального графа. В связи с чем при оценках вычислительной сложности параллельных алгоритмов учитывается полное число единиц ускорения. Особенно важно учитывать специфику больших вычислительных сложностей при реконфигурировании многосоставных СДСС НПМ БР, разделенных на подсистемы меньшего уровня.

Параллельный алгоритм размещения центра

Оперативность реконфигурирования СДСС НПМ БР с большим числом связности и увеличенным количеством вычислителей также определяется по результатам поиска центра предфрактального графа с учетом аномальной вычислительной сложности [370; 371].

На рисунке 5.13 представлен алгоритм $\bar{\alpha}_l$, функционирующий аналогично алгоритму α_l , но на блоках $(L - l)$ -го ранга B_s^{L-l} осуществляет поиск центра параллельно разными процессорами [372; 373].

Алгоритм $\bar{\alpha}_l$	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	x_l – кратный центр G_L .
Шаг 1.	Параллельно и независимо друг от друга n^l процессоров $p_1, p_2, \dots, p_{s=n^l}$ осуществляют для каждого B_s^{L-l} , $s = 1, 2, \dots, n^l$, $l \in [1, L - 1]$ поиск центра, используя процедуру α_0 .
Шаг 2.	На выходе шага 1 получены n^l центров блоков B_s^{L-l} , которые формируют кратный центр x_l графа G_L .

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.13 – Параллельный алгоритм $\bar{\alpha}_l$ размещения кратного центра

На рисунке 5.14 представлен алгоритм $\bar{\alpha}_0$, функционирующий аналогично алгоритму α_0 , но на подграф-затравках разного ранга рассчитывает числа разделения вершин параллельно разными процессорами.

Все алгоритмы и следствия, предложенные ранее для α_0 , действительны и для алгоритма $\bar{\alpha}_0$. Представленные параллельные алгоритмы размещения кратного центра позволяют в условиях аномальной вычислительной сложности принять решение о реконфигурировании СДСС НПМ БР.

Временная сложность для алгоритма $\bar{\alpha}_0$ $\tau_{p=n^{L-1}}(\bar{\alpha}_0) = O(4Ln^3)$. На подграф-затравках рангов $l = L, L - 1, \dots, 2$ параллельно и независимо вычисляются числа разделения за время $2n^2$ [374]. Поиск кратчайших путей между n вершинами занимает время $n^2 \cdot n = n^3$, определения минимального среди них значения n^2 . Тогда суммарное время составляет $(L - 1)2n^2 + n^3 + n^2 \leq 2Ln^2 + n^3 + n^2 \leq 2n^2 + n^3 + n^2 \leq 4Ln^3$.

Алгоритм $\overline{\alpha_0}$	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	вершина x_0 – центр G_L .
Шаг 1.	Параллельно и независимо друг от друга $s = n^{L-1}$ процессоров $p_1, p_2, \dots, p_s$ осуществляют поиск чисел разделения вершин $x_{s_L}^L$ подграф-затравок L -го ранга $z_{s_L}^L$, $s_L = 1, 2, \dots, n^{L-1}$: $s(x_{s_L}^L) = \max_{j_L=1,2,\dots,n-1} [d(x_{s_L}^L, v_{j_L}^L)]$, где $d(x_{s_L}^L, x_{s_L}^L) = 0$ посредством алгоритма Дейкстры. Для $l = L - 1, L - 2, \dots, 2$ выполнить:
Шаг $L - l + 1$.	Параллельно и независимо друг от друга $s = n^{l-1}$ процессоров $p_1, p_2, \dots, p_s$ осуществляют поиск чисел разделения вершин $x_{s_l}^l$ подграф-затравок l -го ранга $z_{s_l}^l$: $s(x_{s_l}^l) = \max_{j_l} [d(x_{s_l}^l, v_{j_l}^l) + s(x_{j_l}^{l+1})]$, $s_l = 1, 2, \dots, n^{l-1}$, где $d(x_{s_l}^l, x_{s_l}^l) = 0$.
Шаг L .	p_1 для $x_{s_1}^1$ из z_1^1 находит число разделения $s(x_{s_1}^1) = \max_{j_1} [d(x_{s_1}^1, v_{j_1}^1) + s(x_{j_1}^2)]$, $s_1 = 1, 2, \dots, n$, где $d(x_{s_1}^1, x_{s_1}^1) = 0$.
Шаг $L + 1$.	Выбрать из $x_{s_1}^1$, $s_1 = 1, 2, \dots, n$ такую x_0 , что $s(x_0) = \min_{s_1} [s(x_{s_1}^1)]$.

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.14 – Параллельный алгоритм $\overline{\alpha_0}$ размещения центра

Время исполнения параллельного алгоритма $\overline{\alpha_0}$ линейно зависит от ранга L предфрактального графа. Ускорение $\overline{\alpha_0}$ от α_0 при $p = n^{L-1}$ составляет $\frac{N}{Ln} = \frac{n^{L-1}}{L}$. При увеличении рангов L количество вершин графа $N = n^L$ увеличивается быстрее. На единицу увеличения L приходится дополнительно n/L единиц ускорения параллельного алгоритма:

$$\tau_{1 \leq p \leq n^{L-1}}(\overline{\alpha_0}) = O\left(\frac{n^{L-1}}{p} 4Ln^3\right);$$

$$\tau_{p=n^l}(\overline{\alpha_l}) = O(4n^{L-l+2}), \text{ где } l \in [1, L-1].$$

Одновременно и независимо n^l процессоров выделяют центры на затравках с помощью процедуры α_0 . Время исполнения процедуры α_0 равно $4n^2 \cdot n^{L-l} = 4n^{L-l+2}$.

Время исполнения алгоритма $\overline{\alpha_l}$ при $l = L - 1$ сравнимо со временем, затрачиваемым на поиск центра на одной затравке. Ускорение $\overline{\alpha_l}$ от α_l при $p = n^l$, $l \in [1, L - 1]$ составит n^l . Тогда $\tau_{1 \leq p \leq n^l}(\overline{\alpha_l}) = O\left(\frac{n^l}{p} 4n^{L-l+2}\right)$.

В сравнении с классическими алгоритмами данные алгоритмы обеспечивают точное и оперативное решение задачи о размещении кратного

центра, что обеспечивает формирование решений с гарантированными оценками и сокращение времени оптимизации для принятия оперативных действий по структурной реконфигурации системы в условиях аномальной вычислительной сложности.

Параллельный алгоритм размещения медианы

Аналогично быстрому алгоритму параллельный алгоритм размещения медиан необходим для оптимизации размещения компонент СДСС НПМ БР таким образом, чтобы минимизировать суммарные потери при реконфигурации.

На рисунке 5.15 представлен алгоритм $\overline{\beta}_l$, функционирующий по тому же принципу, что и алгоритм β_l , но на блоках $(L-l)$ -го ранга B_s^{L-l} осуществляет поиск медиан параллельно разными процессорами.

Алгоритм $\overline{\beta}_l$	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	x_l – кратная медиана G_L .
Шаг 1.	Параллельно и независимо друг от друга $s = n^l$ процессоров $p_1, p_2, \dots, p_{s=n^l}$ осуществляют для каждого B_s^{L-l} , $s = 1, 2, \dots, n^l$, $l \in [1, L-1]$ поиск медианы, используя процедуру β_0 .
Шаг 2.	На выходе шага 1 получены n^l центров блоков B_s^{L-l} , которые формируют кратную медиану x_l графа G_L .

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.15 – Параллельный алгоритм $\overline{\beta}_l$ размещения кратной медианы

На рисунке 5.16 представлен алгоритм $\overline{\beta}_0$, функционирующий аналогично алгоритму β_0 , но на подграф-затравках разного ранга рассчитывает числа разделения вершин параллельно разными процессорами.

Новизна представленного комплекса алгоритмов ПАК для специализированного размещения медианы заключается в оригинальном распределении вычислительных ресурсов между процессорами, что позволяет осуществлять поиск медиан параллельно разными процессорами. Временная сложность алгоритма размещения медианы составляет $\tau_{p=n^{L-1}}(\overline{\beta}_0) = O(4Ln^3)$.

Ускорение $\overline{\beta}_0$ от β_0 при $p = n^{L-1}$ составляет $\frac{N}{Ln} = \frac{n^{L-1}}{L}$, тогда:

$$\tau_{1 \leq p \leq n^{L-1}}(\bar{\beta}_0) = O\left(\frac{n^{L-1}}{p} 4Ln^3\right); \tau_{p=n^l}(\bar{\beta}_l) = O(4n^{L-l+2}), \text{ где } l \in [1, L-1].$$

Ускорение $\bar{\beta}_l$ от β_l при $p = n^l$, $l \in [1, L-1]$ составит n^l , тогда:

$$\tau_{1 \leq p \leq n^l}(\bar{\beta}_l) = O\left(\frac{n^l}{p} 4n^{L-l+2}\right) [375].$$

Алгоритм β_0	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	вершина x_0 – медиана G_L .
Шаг 1.	Параллельно и независимо друг от друга $s = n^{L-1}$ процессоров $p_1, p_2, \dots, p_s$ осуществляют поиск передаточного числа каждой вершины $x_{s_L}^L$ подграф-затравки L -го ранга $z_{s_L}^L$, $s_L = 1, 2, \dots, n^{L-1}$: $\sigma(x_{s_L}^L) = \sum_{j_L=1,2,\dots,n-1} [d(x_{s_L}^L, v_{j_L}^L)]$, где $d(x_{s_L}^L, x_{s_L}^L) = 0$ посредством алгоритма Дейкстры. Для $l = L-1, L-2, \dots, 2$ выполнить:
Шаг $L-l+1$.	Параллельно и независимо друг от друга $s = n^{l-1}$ процессоров $p_1, p_2, \dots, p_s$ осуществляют поиск передаточного числа каждой вершины $x_{s_l}^l$ подграф-затравки l -го ранга $z_{s_l}^l$: $\sigma(x_{s_l}^l) = \sum_{j_l} [d(x_{s_l}^l, v_{j_l}^l) + \sigma(x_{j_l}^{l+1})]$, $s_l = 1, 2, \dots, n^{l-1}$, где $d(x_{s_l}^l, x_{s_l}^l) = 0$.
Шаг L .	p_1 для $x_{s_1}^1$ из z_1^1 находит передаточное число $\sigma(x_{s_1}^1) = \sum_{j_1} [d(x_{s_1}^1, v_{j_1}^1) + \sigma(x_{j_1}^2)]$, $s_1 = 1, 2, \dots, n$, где $d(x_{s_1}^1, x_{s_1}^1) = 0$.
Шаг $L+1$.	Выбрать из $x_{s_1}^1$, $s_1 = 1, 2, \dots, n$ такую x_0 , что $\sigma(x_0) = \min_{s_1} [\sigma(x_{s_1}^1)]$.

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.16 – Параллельный алгоритм $\bar{\beta}_0$ размещения медианы

При таком значении временной сложности и наличии нескольких вычислителей представленный алгоритм вычисления медианы будет оптимальным по времени по сравнению с известными и также позволит компенсировать влияние аномальной вычислительной сложности.

Параллельный алгоритм выделения остовных лесов

Аналогично последовательным алгоритмам необходимо минимизировать время работы алгоритма выделения остовного леса минимального веса.

На рисунке 5.17 представлен алгоритм $\bar{\chi}_l$ – параллельная реализация алгоритма χ_l .

Алгоритм $\overline{\chi}_l$	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	x_l – ОЛМВ G_L .
Шаг 1.	Параллельно и независимо друг от друга n^l процессоров $p_1, p_2, \dots, p_{s=n^l}$ выделяют ОДМВ x_s^{L-l} для B_s^{L-l} , $s = 1, 2, \dots, n^l$, $l \in [1, L-1]$ найти, используя процедуру χ_0 .
Шаг 2.	На выходе шага 1 получены n^l ОДМВ блоков B_s^{L-l} , которые формируют ОЛМВ x_l графа G_L .

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.17 – Параллельный алгоритм $\overline{\chi}_l$ выделения ОЛМВ

На рисунке 5.18 представлен алгоритм $\overline{\chi}_0$, который параллельно каждым из процессоров $p_1, p_2, \dots, p_s$, $s = n^{l-1}$ выделяет на затравках l -го ранга z_s^l , $l = L, L-1, \dots, 1$ ОДМВ с помощью процедуры Прима.

Алгоритм $\overline{\chi}_0$	
Вход:	взвешенный граф G_L .
Выход:	остовное дерево x_0 – ОДМВ G_L .
Шаг $L-l+1$ s.	Для $l = L, L-1, \dots, 1$ выполнить: Параллельно и независимо друг от друга $s = n^{l-1}$ процессоров $p_1, p_2, \dots, p_s$ выделяют ОДМВ x_s^l на z_s^l с помощью процедуры Прима.
Шаг $L+1$.	На выходе шага L выделены $k = \frac{n^{L-1}}{n-1}$ ОДМВ x_s^l на z_s^l , что соответствует ОДМВ на G_L .
Вход:	Процедура Прима взвешенный граф.
Выход:	ОДМВ.

Источник: составлено автором.

Рисунок 5.18 – Параллельный алгоритм $\overline{\chi}_0$ выделения ОДМВ

Новизна представленных алгоритмов состоит в объединении процедуры Прима и параллельных вычислений с переносом времени вычислений на другие процессоры [376]. Временная сложность алгоритма выделения остовных лесов составляет $\tau_{p=n^{L-1}}(\overline{\chi}_0) = O(4Ln^2)$. Ускорение $\overline{\chi}_0$ от

χ_0 при $p = n^{L-1}$ составляет $\frac{N}{L} = \frac{n^L}{L}$, тогда:

$$\tau_{1 \leq p \leq n^{L-1}}(\overline{\chi}_0) = O\left(\frac{n^{L-1}}{p} 4Ln^2\right); \tau_{p=n^l}(\overline{\chi}_l) = O(4n^{L-l+2}), \text{ где } l \in [1, L-1].$$

Ускорение $\overline{\chi}_l$ от χ_l при $p = n^l$, $l \in [1, L-1]$ составит n^l , поэтому:

$$\tau_{1 \leq p \leq n^l}(\overline{\chi}_l) = O\left(\frac{n^l}{p} 4n^{L-l+2}\right).$$

При таком значении временной сложности и наличии нескольких вычислителей представленный алгоритм выделения остовных лесов будет оптимальным по времени по сравнению с известными и позволит компенсировать влияние аномальной вычислительной сложности.

Алгоритмы на графах с недетерминированными весами

В подразделе представлена формализация алгоритмов для многокритериальной оптимизации СДСС НПМ БР, учитывающие недетерминированные веса рёбер [377]. Алгоритмы вычисления центра графа и выделения остовного леса включают интервальные вычисления на предфрактальных графах с оценками на предфрактальных графах с недетерминированными весами для минимизации времени вычислений с учётом АТИ как целевой функции.

Алгоритмы обеспечивают гибкость управления СДСС НПМ БР в условиях неопределённости при реконфигурации при значительных вычислительных сложностях и большом количестве элементов, позволяя оптимизировать информационные потоки при изменяющихся приоритетах [378-380]. Их интеграция с АТИ повышает адаптивность системы к реальным сценариям.

Алгоритм $_{in}\alpha$

Алгоритм $_{in}\alpha_0$ размещения центра интервально-взвешенного предфрактального графа работает аналогично алгоритму α_0 , при этом применяется интервальная арифметика для выполнения необходимых операций [381].

Алгоритм $_{in}\alpha = \{_{in}\alpha_0, _{in}\alpha_1, \dots, _{in}\alpha_{L-1}\}$ решает многокритериальную задачу размещения кратного центра на интервально-взвешенном графе G_L . Множество рассмотренных алгоритмов может быть расширено новыми группами алгоритмов для разных классов графов.

Алгоритм $_{in}\alpha$ выделяет кратный центр x_{il} , $l \in [1, 2, \dots, L]$ на интервально-взвешенном графе G_L оцениваемый по критериям $F_i(x_{il}) \subseteq$

$$\subseteq \left[a \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}; b(n-1) \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \right], i = 1, 2, \dots, M, F_i(x_{il}) \subseteq \left[an^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}; b(n-1)n^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \right], i = M+1, M+2, \dots, 2M, F_{2M+1}(x_{il}) = l \text{ и } F_{2M+2}(x_{il}) = n^l.$$

В качестве оценки критерия $i = 1, 2, \dots, M$ принята наихудшая оценка числа разделения $F_i(x_{il}) \subseteq \left[a \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}; b(n-1) \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \right], i = 1, 2, \dots, M$ среди алгоритмов $in\alpha_0, in\alpha_1, \dots, in\alpha_{L-1}$. Также и для суммы радиусов кратного центра: $F_i(x_{il}) \subseteq \left[an^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}; b(n-1)n^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \right], i = M+1, M+2, \dots, 2M$.

Число центров разного ранга $F_{2M+1}(x_{il}) = l$. Общее число вершин кратного центра $F_{2M+2}(x_{il}) = n^l$. Гибкость управления СДСС обеспечивается выделением кратного центра графа на основе принятия наихудшей оценки числа разделения $F_i(x_{il}) \subseteq \left[a \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}; b(n-1) \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \right], i = 1, 2, \dots, M$ среди алгоритмов $in\alpha_0, in\alpha_1, \dots, in\alpha_{L-1}$.

Алгоритм $in\beta$

Алгоритм $in\beta = \{in\beta_0, in\beta_1, \dots, in\beta_{L-1}\}$ аналогично параллельным алгоритмам решает многокритериальную задачу размещения кратной медианы на интервально-взвешенном графе G_L .

Алгоритм $in\beta$ выделяет кратную медиану $x_{il}, l \in [1, 2, \dots, L]$ на интервально-взвешенном графе G_L оцениваемую по критериям: $F_i(x_{il}) \subseteq \left[La(n-1)\theta^l; Lb(n-1)^{L+1} \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \right], i = 1, 2, \dots, M, F_i(x_{il}) \subseteq \left[an^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1}; b(n-1)n^l \frac{\theta^{L+l-1}-\theta^l}{\theta-1} \right], i = M+1, M+2, \dots, 2M, F_{2M+1}(x_{il}) = l$ и $F_{2M+2}(x_{il}) = n^l$.

Алгоритм $in\chi$

Алгоритм $in\chi = \{in\chi_0, in\chi_1, \dots, in\chi_{L-1}\}$ решает многокритериальную задачу выделения остовного леса минимального веса на интервально-взвешенном графе G_L .

Алгоритм $in\chi$ выделяет остовный лес минимального веса $x_{il}, l \in [1, 2, \dots, L]$ на интервально-взвешенном графе G_L оцениваемый по

критериям: $F_i(x_{il}) \subseteq \left[a(n-1) \frac{(n\theta)^L - (n\theta)^l}{n\theta - 1}; b(n-1) \frac{(n\theta)^L - (n\theta)^l}{n\theta - 1} \right]$, $i = 1, 2, \dots, M$,
 $F_{M+1}(x_{il}) = n^l$, $2 \leq F_{M+2}(x_{il}) \leq (n-1)(L-l)$ и $F_{M+3}(x_{il}) = n^{L-l}$.

Классификация алгоритмов с недетерминированными весами

Алгоритмы решения задач tsZ_t на графах, взвешенных временными рядами, выделяются индексом $ts - ts\alpha$, $ts\beta$, $ts\chi$, алгоритмы задач fuZ_t соответственно – $fu\alpha$, $fu\beta$, $fu\chi$, алгоритмы задач $inZ_t - in\alpha$, $in\beta$, $in\chi$.

При выполнении арифметических операций над недетерминированными весами используются известные арифметики для нечетких чисел. Для интервальных весов применяется интервальное исчисление [382], для нечетких множеств – теория нечетких множеств. В случае необходимости любое из нечетких чисел можно привести к действительному числу. Для интервальных чисел используется метод взвешенных границ, для временных рядов – методы прогнозирования, нечеткие множества в два этапа, сначала приводятся к интервальным числам, после к действительным.

Для алгоритмов $in\alpha$, $in\beta$, $in\chi$ работающих на интервально-взвешенных графах, используется параметр $\Lambda = \lambda(e) = (\lambda_1, \lambda_2)$, представляющий собой множество пар коэффициентов для взвешенной свертки интервального веса каждого ребра [383]. В частном случае для всех ребер задается одна единая пара (λ_1, λ_2) для всех интервалов. Для алгоритмов $fu\alpha$, $fu\beta$, $fu\chi$ используется параметр $\mu(e)$ – функция принадлежности, заданная на отрезке $[0; 1]$ для каждого ребра графа.

Введем следующие обозначения алгоритмов решения многокритериальных задач на графах, взвешенных недетерминированными весами [384]:

$fu\alpha = \{fu\alpha_0, fu\alpha_1, \dots, fu\alpha_{L-1}\}$ – алгоритм размещения кратного центра на графе G_L , взвешенного нечеткими множествами;

$ts\alpha = \{ts\alpha_0, ts\alpha_1, \dots, ts\alpha_{L-1}\}$ – алгоритм размещения кратного центра на графе G_L , взвешенного временными рядами;

$fu\beta = \{fu\beta_0, fu\beta_1, \dots, fu\beta_{L-1}\}$ – алгоритм размещения кратной медианы на графе G_L , взвешенного нечеткими множествами;

$ts\beta = \{ts\beta_0, ts\beta_1, \dots, ts\beta_{L-1}\}$ – алгоритм размещения кратной медианы на графе G_L , взвешенного временными рядами;

$fu\chi = \{fu\chi_0, fu\chi_1, \dots, fu\chi_{L-1}\}$ – алгоритм выделения остовного леса минимального веса графа G_L , взвешенного нечеткими множествами;

$ts\chi = \{ts\chi_0, ts\chi_1, \dots, ts\chi_{L-1}\}$ – алгоритм выделения остовного леса минимального веса графа G_L , взвешенного временными рядами.

Представленные алгоритмы отличаются от известных тем, что приводятся недетерминированные веса на основе методов прогнозирования и нечетких множеств в интервальных числах с последующим приведением к действительным.

Вычислительная сложность алгоритмов вычисления центров с недетерминированными весами определяется как $\tau(in\alpha_0) = O(10n^2N)$. В худшем случае, если все операции рассматривать как сложение (сравнение) границ интервалов, вычислительная сложность $O(4n^2N)$ увеличится вдвое и составит $O(8n^2N)$. Также для сравнения вложенных интервалов используется метод взвешенных границ, для одного интервала потребуется 3 операции для всех весов ребер $\frac{n(n-1)}{2} \cdot \frac{n^{L-1}}{n-1} = \frac{n^{L+1}}{2}$, итого $3 \frac{n^{L+1}}{2}$ операций. Суммарная вычислительная сложность алгоритма $in\alpha_0$ составит: $8n^2N + 3 \frac{n^{L+1}}{2} = 8n^2N + +3nN/2 \leq 10n^2N$.

По каждому из множества алгоритмов $in\alpha_0, in\alpha_1, \dots, in\alpha_{L-1}$ приведены вычислительные сложности. Наибольшая вычислительная сложность принимается в качестве вычислительной сложности алгоритма α . Тогда вычислительная сложность $\tau(in\alpha) = O(10n^2N)$.

Процедура приведения нечеткого множества к действительному числу посредством вычисления центра тяжести составит $5n$, где n – мощность нечеткого множества. Тогда вычислительная сложность $O(4n^2N)$ увеличится на $5nN$ операций и составит $O(9n^2N)$. В итоге для разных алгоритмов вычислительная сложность составляет:

$$\tau(f_u\alpha) = O(9n^2N);$$

$$\tau(ts\alpha_0) = O(8n^2N);$$

$$\tau(ts\alpha) = O(8n^2N).$$

По каждому из множества алгоритмов $ts\alpha_0, ts\alpha_1, \dots, ts\alpha_{L-1}$ получены вычислительные сложности. Наибольшая вычислительная сложность $O(4n^2N)$. Пусть суммарное количество операций, требуемых для прогнозирования всех временных рядов, составит максимальное значение $4n^2N$. Тогда вычислительная сложность алгоритма удвоится $O(8n^2N)$.

Аналогично алгоритмам вычисления центра определяется вычислительная сложность и для других алгоритмов:

$$\tau(in\beta) = O(10n^2NM);$$

$$\tau(f_u\beta) = O(9n^2N);$$

$$\tau(ts\beta) = O(8n^2N);$$

$$\tau(in\chi) = O(10n^2N);$$

$$\tau(f_u\chi) = O(9n^2N);$$

$$\tau(ts\chi) = O(8n^2N).$$

Сравнение демонстрирует превосходство новых алгоритмов в задачах с высокой размерностью, что обосновывает их использование для оптимизации СДСС НПМ БР в реальных условиях, в том числе с аномальной сложностью [385; 386].

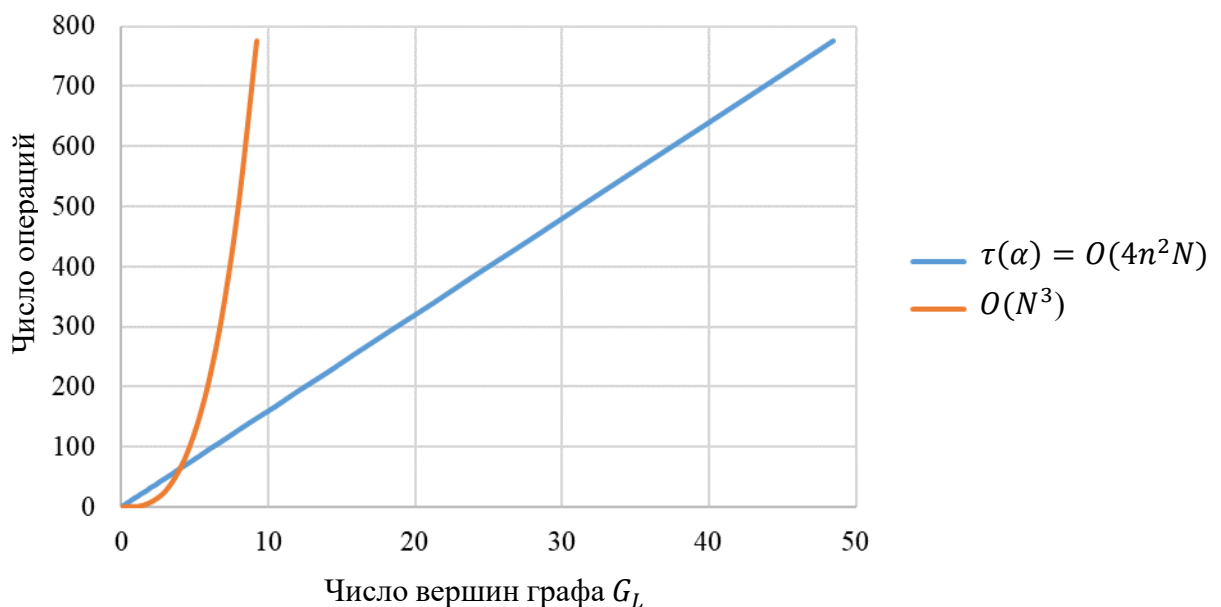
Численный анализ вычислительной сложности алгоритмов оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

В предыдущих параграфах представлена аналитическая оценка вычислительных сложностей с учетом числа элементов и вычислителей, но прикладное значение имеет численный расчет вычислительной сложности, поскольку позволяет в количественном соотношении оценить понижение вычислительной сложности представленных алгоритмов.

Алгоритм α

Для алгоритма α получена вычислительная сложность $\tau(\alpha) = O(4n^2N)$. В сравнении с вычислительной сложностью известного классического алгоритма Флойда-Уоршелла $O(N^3)$, $\tau(\alpha)$ меньше почти на два порядка N^2 .

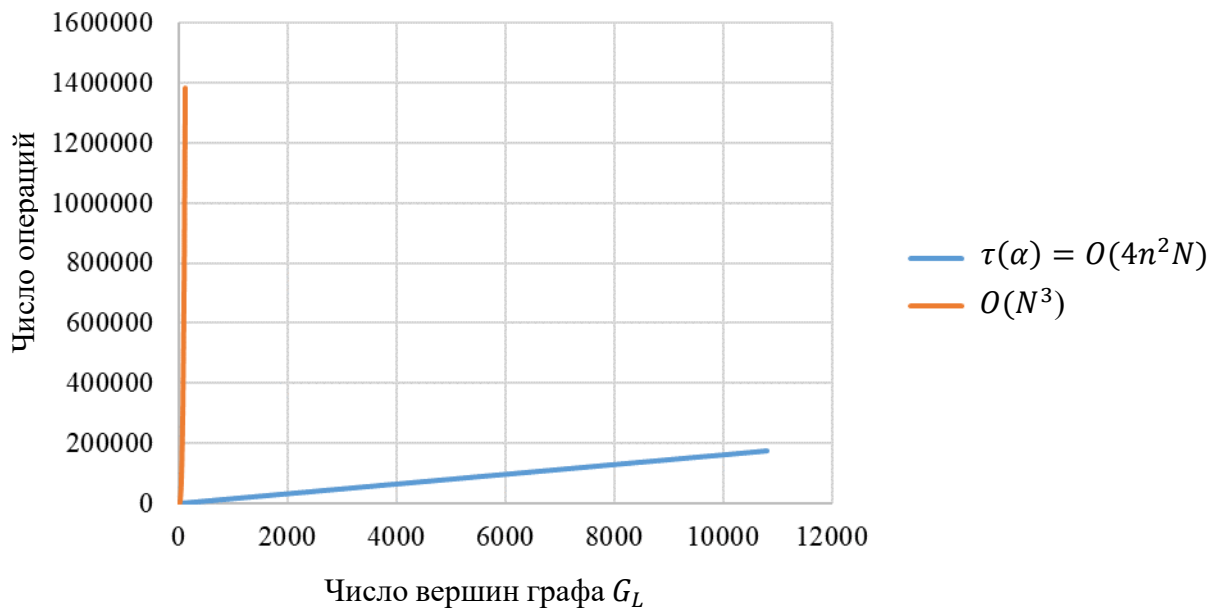
На рисунке 5.19 видно, что N^3 – степенная функция, а $4n^2N$ – параметризованная линейная функция с параметром $c = 4n^2$. Алгоритм α , начиная даже с малого числа вершин, показывает лучшие результаты по числу операций.



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.19 – Вычислительные сложности алгоритма α и известного алгоритма

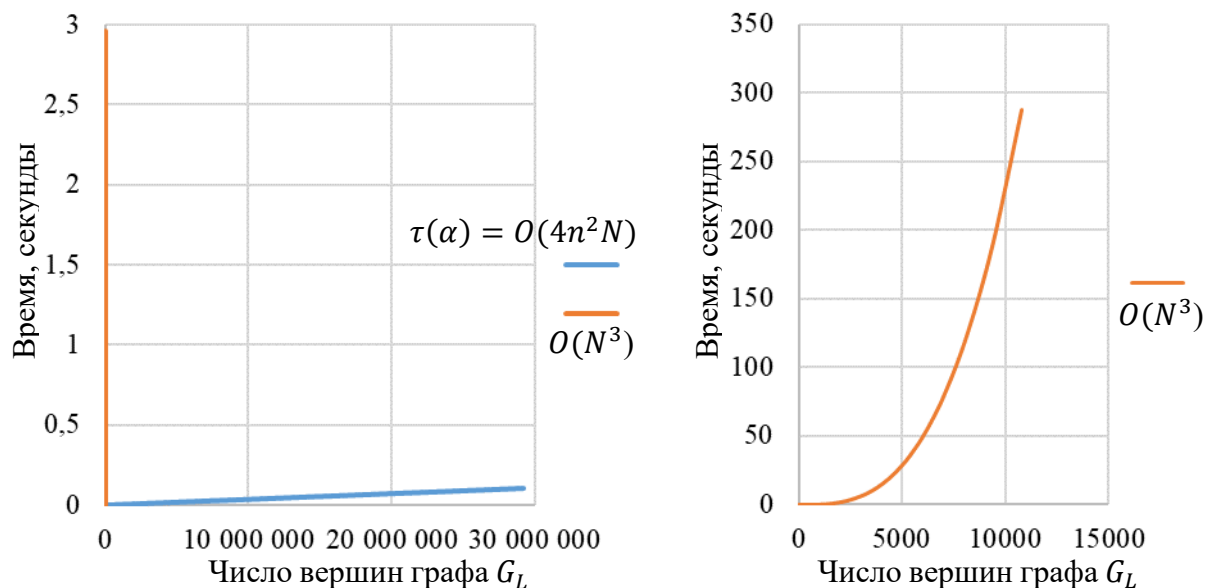
При увеличении числа вершин от 2000 и более трудоемкости указанных алгоритмов становятся фактически несопоставимыми. Алгоритм α при количестве 10 000 вершин показывает исполнение до 200 000 числа операций, при этом алгоритм Флойда-Уоршелла требует до 200 000 операций при числе до 2000 вершин. На рисунке 5.20 на графике указаны соответствующие зависимости.



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.20 – Вычислительные сложности α и известного алгоритма для числа более 10 000 вершин

На рисунке 5.21 представлено исполнение алгоритмов на современном процессоре с тактовой частотой 4,4 ГГц. Алгоритм Флойда-Уоршелла для обработки более 10 тыс. вершин требует порядка 250 секунд, что значительно уступает результатам алгоритма α , которому требуется менее 0,5 секунд для обработки 30 млн. вершин.

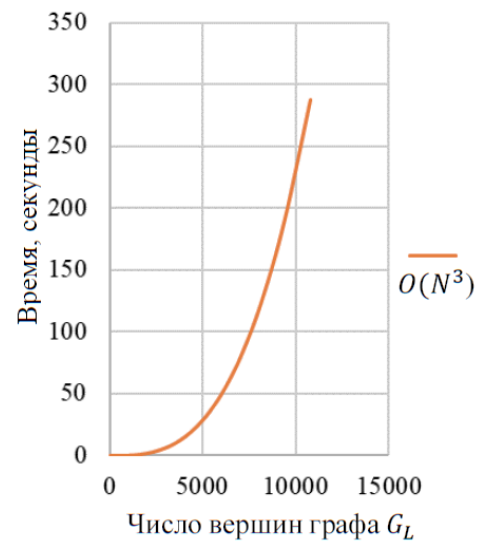
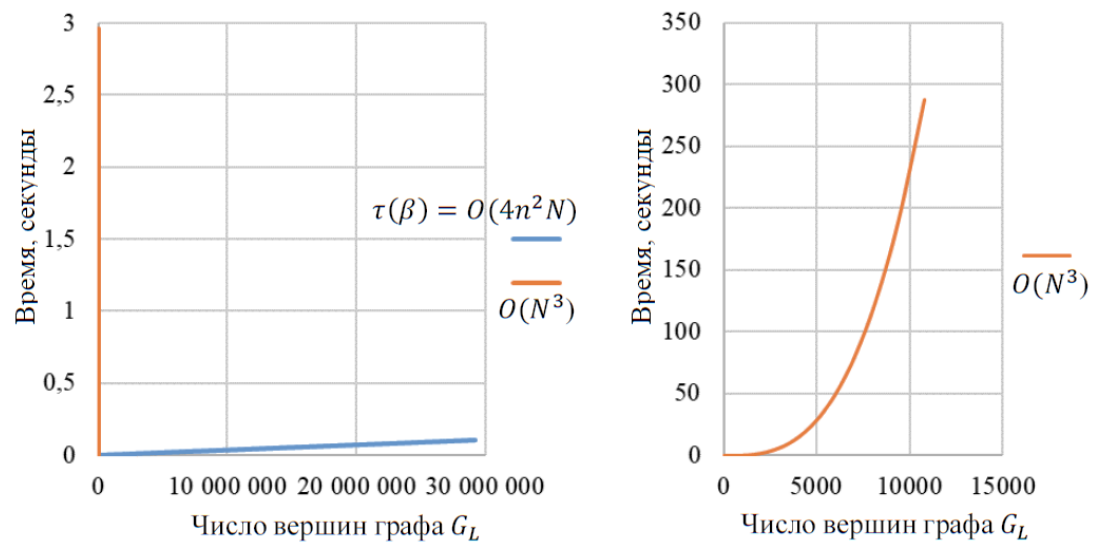
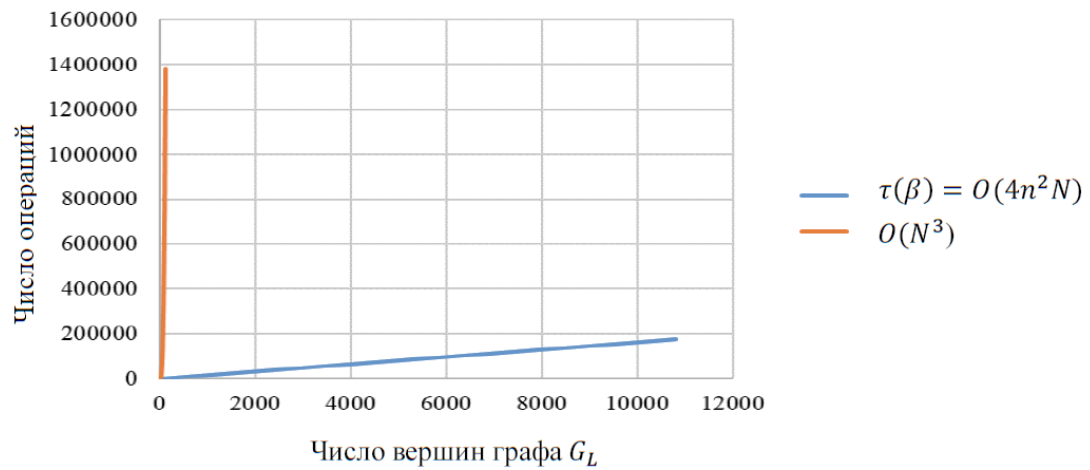
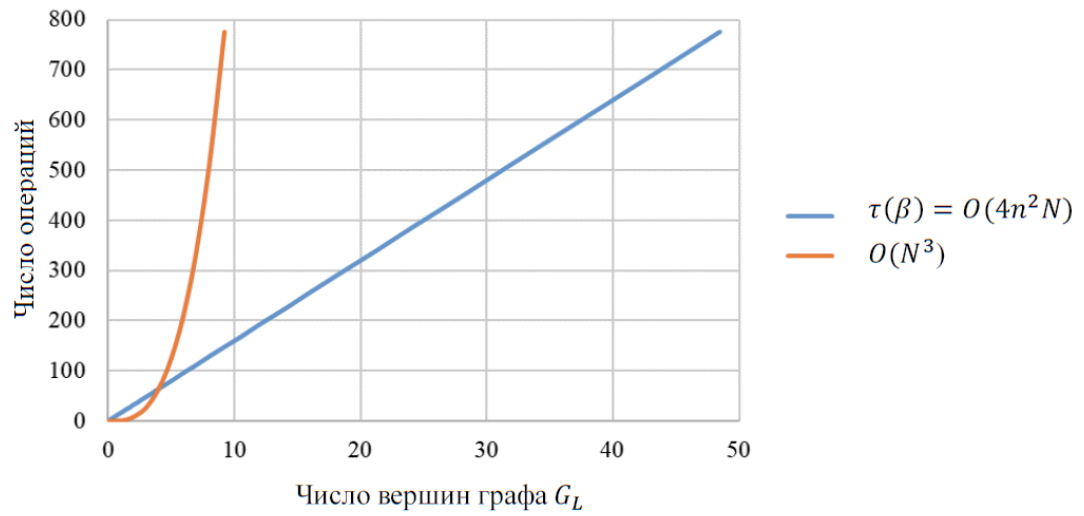


Источник: составлено автором.

Рисунок 5.21 – Время исполнения алгоритма α и известного алгоритма для большого числа вершин

Алгоритм β

Вычислительная сложность алгоритм β равна α , поэтому на рисунке 5.22 приводятся графики без дополнительного описания.



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.22 – Время исполнения алгоритма β и известного алгоритма

Следует отметить, что реализация алгоритмов на многовзвешенных графах, то есть исполнение для M весов не меняет функцию вычислительной сложности от N , а добавляет множитель к параметру $c = 4n^2 \cdot M$. Поведение вычислительной сложности алгоритма χ такое же у алгоритмов α и β .

Таким образом, все представленные алгоритмы в данном подразделе являются оптимальными с точки зрения вычислительных сложностей при значительном числе вершин и ребер. Существующие алгоритмы обладают в 20 раз большей вычислительной нагрузкой, что не позволяет своевременно принять решение о реконфигурации СДСС НПМ БР.

На основе представленных алгоритмов имеется возможность провести 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 реконфигурации системы в условиях аномальной вычислительной сложности.

5.3 Примеры поиска решений многокритериальной задачи оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности на предфрактальных графах с недетерминированными весами

В условиях изменения вычислительной сложности решение задачи оптимизации СДСС НПМ БР на предфрактальных графах осложняется недетерминированными весами [387-389]. Покажем эффективность представленного ПАК на примере частной задачи выделения ОЛМВ на G_3 , порожденном треугольником при сохранении смежности старых ребер.

Поиск остовного леса на 2-взвешенном предфрактальном графе с интервальными весами

Количество компонент покрытия $|x| = 9$, ребрам из E_3 задано два интервальных числа: $w_i(e^l) = [\theta^{l-1}a_i, \theta^{l-1}b_i]$, $i = \overline{1,2}$, $l = \overline{1,3}$, $\theta = \frac{1}{4}$.

Определены числовые отрезки взвешивания ребер разного ранга: $[a_1, b_1] = [100; 200]$, $[\theta a_1, \theta b_1] = [25; 50]$, $[\theta^2 a_1, \theta^2 b_1] = [6,25; 12,5]$; $[a_2, b_2] = [50; 150]$, $[\theta a_2, \theta b_2] = [12,5; 37,5]$, $[\theta^2 a_2, \theta^2 b_2] = [3,125; 9,375]$.

На МДР x задана ВЦФ и критерии (5.16-5.17):

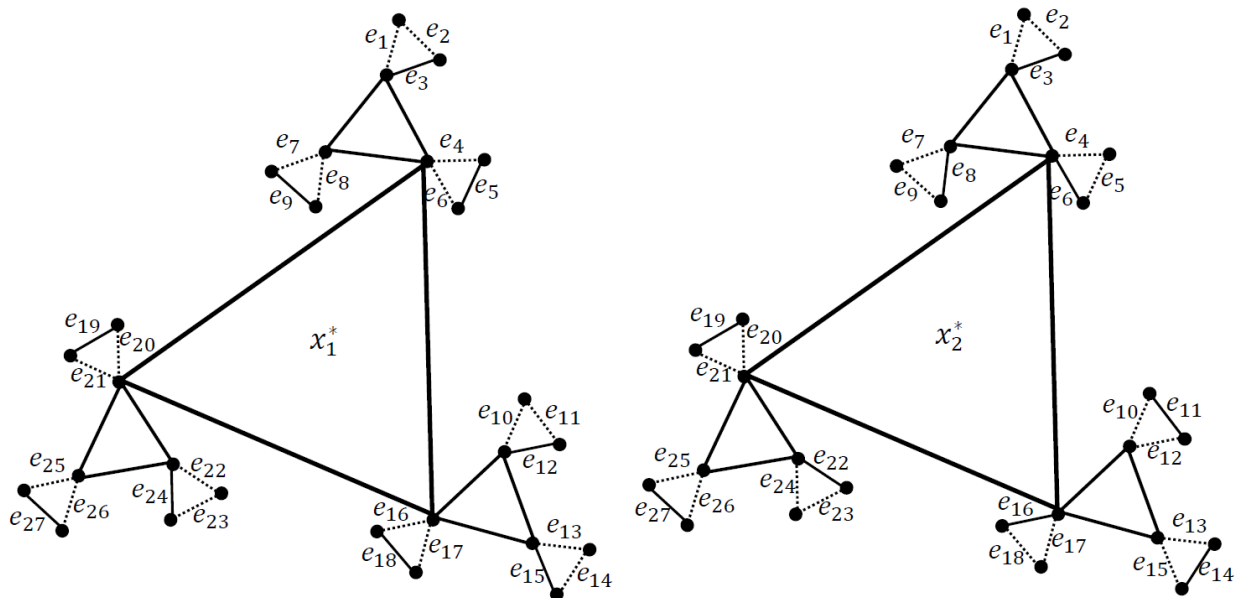
$$F(x) = (F_1(x), F_2(x)), \quad (5.16)$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x} w_i(e) \rightarrow \min, i = 1, 2, \quad (5.17)$$

где $\sum_{e \in E_x} w_i(e)$ – суммарный вес x по i -му набору весов.

МДР x содержит $3^9 = 19683$ элементов $\{x_1, x_2, \dots, x_{19683}\}$. В случае перебора всех решений и попарного сравнения значений многокритериальной функции потребуется $2 \cdot 3^3 \cdot 3^9 + 3^9$ – более миллиона операций для поиска паретовского множества. Применяя алгоритм $in\chi_{L-1}$ по первому и второму набору весов, находим решения x_1^* и x_2^* : $x_1^* = \{e_1, e_2, e_4, e_6, e_7, e_8, e_{10}, e_{11}, e_{13}, e_{14}, e_{16}, e_{17}, e_{20}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{25}, e_{26}\}$, $x_2^* = \{e_1, e_2, e_4, e_5, e_7, e_9, e_{10}, e_{12}, e_{13}, e_{15}, e_{17}, e_{18}, e_{20}, e_{21}, e_{23}, e_{24}, e_{25}, e_{26}\}$.

На рисунке 5.23 выделены покрытия x_1^* и x_2^* ОЛМВ, пунктирными линиями обозначены ребра из x_1^* и x_2^* соответственно.



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.23 – Решения x_1^* и x_2^* на графе G_3

Дополнительно рассматривается произвольное решение: $x_3 = \{e_1, e_3, e_4, e_6, e_7, e_8, e_{10}, e_{11}, e_{13}, e_{14}, e_{16}, e_{18}, e_{19}, e_{21}, e_{22}, e_{24}, e_{25}, e_{27}\}$.

Значения частных критериев по выделенным решениям:

$$F_1(x_1^*) = [135,5; 182,5], F_2(x_1^*) = [86; 129];$$

$$F_1(x_2^*) = [142; 186], F_2(x_2^*) = [81; 124];$$

$$F_1(x_3) = [143; 186,5], F_2(x_3) = [90,5; 138].$$

Взвешенные свертки критериев при $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$:

$$\widetilde{F}_1(x_1^*) = 159, \widetilde{F}_2(x_1^*) = 107,5;$$

$$\widetilde{F}_1(x_2^*) = 164, \widetilde{F}_2(x_2^*) = 102,5;$$

$$\widetilde{F}_3(x_3) = 164,75, \widetilde{F}_3(x_3) = 114,25.$$

Сравнение значений частных критериев по решениям x_1^* , x_2^* и x_3 представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнения значений критериев

x	$\widetilde{F}_1$	$\widetilde{F}_2$
x_1^*	159	107,5
x_2^*	164	102,5
x_3	164,75	114,25

Источник: составлено автором.

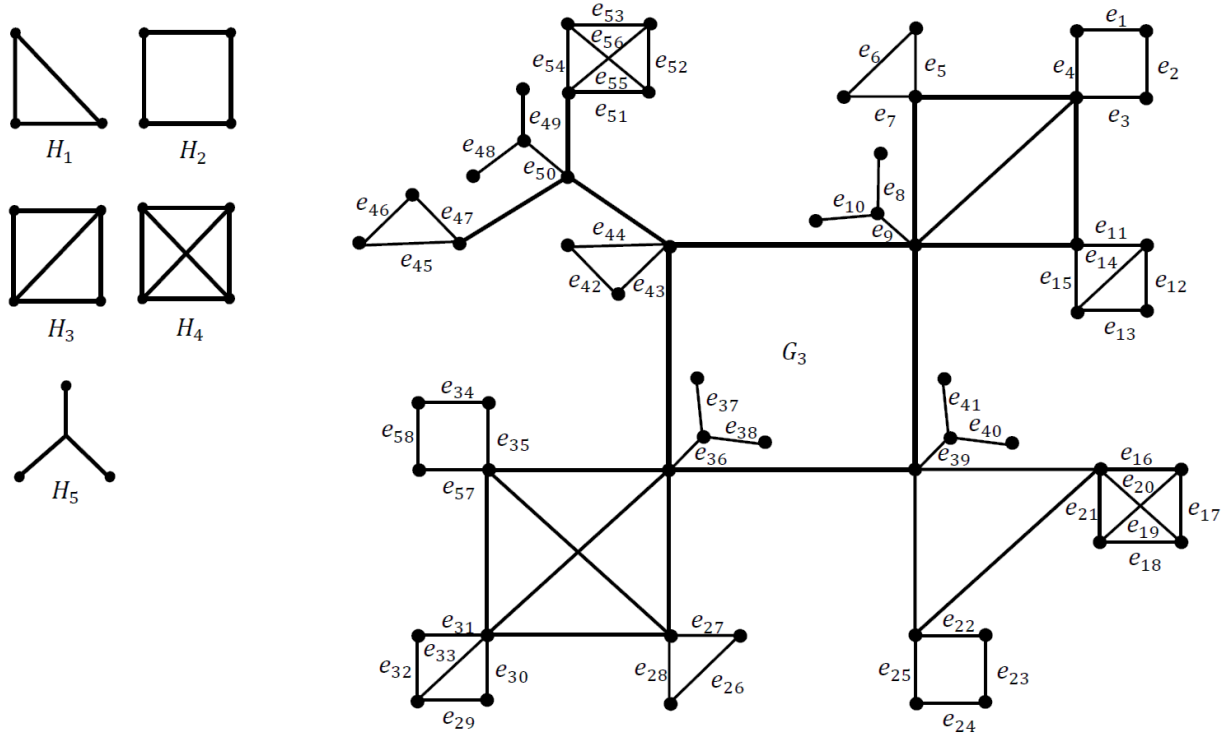
Вектор $(\widetilde{F}_1(x_1^*); \widetilde{F}_2(x_2^*)) = (159; 102,5)$ является нижней границей, ограничивающей минимально возможные значения частных критериев функции, а значение $(159; 102,5)$ – идеальной точкой во множестве значений двухкритериальной функции. Решения x_1^* и x_2^* являются несравнимыми и оба доминируют над решением x_3 .

Поиск кратного центра 3-взвешенного предфрактального графа с недетерминированными весами

Рассматривается частная задача выделения кратного центра $p = 15$ на G_3 , порожденном множеством $H = \{H\}$ при сохранении смежности старых ребер. Ребрам из E_3 задано три нечетких числа: интервал, нечеткое множество и временной ряд. Значения $i = \overline{1,3}$, $l = \overline{1,3}$, $\theta = 1/5$. Определены числовые отрезки взвешивания ребер разного ранга:

$$[a_1, b_1] = [100; 200], [\theta a_1, \theta b_1] = [20; 40], [\theta^2 a_1, \theta^2 b_1] = [4; 8].$$

На рисунке 5.24 изображен предфрактальный граф G_3 , порожденный множеством состоящим из 5 затравок.



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.24 – Предфрактальный граф G_3 , порожденный $H = \{H\}$

В таблице 5.2 указаны интервальные веса ребер третьего ранга $w_1(e^3)$.

Таблица 5.2 – Интервальные веса графа G_3

e^3	w_1	e^3	w_1	e^3	w_1	e^3	w_1	e^3	w_1	e^3	w_1
e_1	[5,9;6,4]	e_{12}	[4,3;7,6]	e_{23}	[5,5;8,0]	e_{34}	[5,7;6,2]	e_{45}	[5,1;7,6]	e_{11}	[5,2;7,3]
e_2	[4,1;6,4]	e_{13}	[4,8;7,2]	e_{24}	[4,3;7,8]	e_{35}	[5,3;6,1]	e_{46}	[5,1;7,5]	e_{22}	[5,2;6,1]
e_3	[5,6;7,3]	e_{14}	[5,3;7,2]	e_{25}	[4,8;7,1]	e_{36}	[4,6;7,0]	e_{47}	[4,2;7,7]	e_{33}	[5,6;6,6]
e_4	[5,5;7,2]	e_{15}	[4,2;7,4]	e_{26}	[4,5;7,7]	e_{37}	[4,9;7,3]	e_{48}	[4,5;6,9]	e_{44}	[4,3;6,2]
e_5	[5,9;7,9]	e_{16}	[5,5;6,6]	e_{27}	[5,0;7,0]	e_{38}	[5,3;7,2]	e_{49}	[5,2;7,1]	e_{55}	[5,6;6,6]
e_6	[5,6;7,2]	e_{17}	[5,3;6,8]	e_{28}	[5,3;7,7]	e_{39}	[4,4;6,7]	e_{50}	[4,6;6,9]	e_{56}	[5,9;7,5]
e_7	[4,5;6,8]	e_{18}	[4,0;7,6]	e_{29}	[4,8;7,0]	e_{40}	[5,8;6,4]	e_{51}	[5,1;7,0]	e_{57}	[4,9;7,7]
e_8	[4,6;6,1]	e_{19}	[4,4;7,7]	e_{30}	[5,2;6,1]	e_{41}	[5,6;6,3]	e_{52}	[4,2;8,0]	e_{58}	[3,5;5,4]
e_9	[4,8;7,2]	e_{20}	[5,7;7,8]	e_{31}	[5,1;7,6]	e_{42}	[4,2;6,2]	e_{53}	[5,4;6,6]	-	-
e_{10}	[5,5;6,5]	e_{21}	[4,2;7,5]	e_{32}	[5,4;6,5]	e_{43}	[4,3;7,4]	e_{54}	[5,4;7,9]	-	-

Источник: составлено автором.

В таблице 5.3 указаны веса $w_2(e^3)$ в виде нечетких множеств.

Таблица 5.3 – Веса графа G_3 – нечеткие множества

e^3	w_2	e^3	w_2
e_1	$\{(6 0,80), (7 0,83), (8 0,84)\}$	e_{30}	$\{(5 0,77), (6 0,29), (7 0,88)\}$
e_2	$\{(5 0,14), (6 0,40), (7 0,21)\}$	e_{31}	$\{(6 0,27), (7 0,49), (8 0,85)\}$
e_3	$\{(5 0,32), (6 0,22), (7 0,25)\}$	e_{32}	$\{(5 0,88), (6 0,39), (7 0,48), (8 0,12)\}$
e_4	$\{(5 0,97), (6 0,58), (7 0,81)\}$	e_{33}	$\{(5 0,87), (6 0,69), (7 0,75), (8 0,40)\}$
e_5	$\{(6 0,70), (7 0,41), (8 0,14)\}$	e_{34}	$\{(5 0,63), (6 0,64), (7 0,59)\}$
e_6	$\{(5 0,15), (6 0,66), (7 0,50)\}$	e_{35}	$\{(5 0,99), (6 0,31), (7 0,34)\}$
e_7	$\{(4 0,35), (5 0,71), (6 0,78)\}$	e_{36}	$\{(5 0,46), (6 0,91), (7 0,06), (8 0,43)\}$
e_8	$\{(5 0,15), (6 0,61), (7 0,14), (8 0,50)\}$	e_{37}	$\{(5 0,82), (6 0,12), (7 0,63), (8 0,02)\}$
e_9	$\{(5 0,81), (6 0,89), (7 0,08)\}$	e_{38}	$\{(4 0,19), (5 0,26), (6 0,49), (7 0,44)\}$
e_{10}	$\{(6 0,37), (7 0,09), (8 0,87)\}$	e_{39}	$\{(4 0,45), (5 0,91), (6 0,76)\}$
...	...	...	...
e_{19}	$\{(6 0,86), (7 0,22), (8 0,02)\}$	e_{48}	$\{(6 0,18), (7 0,13), (8 0,34)\}$
e_{20}	$\{(4 0,66), (5 0,32), (6 0,46), (7 0,16)\}$	e_{49}	$\{(6 0,56), (7 0,54), (8 0,92)\}$
e_{21}	$\{(4 0,84), (5 0,41), (6 0,64), (7 0,48)\}$	e_{50}	$\{(4 0,49), (5 0,19), (6 0,72), (7 0,27)\}$
e_{22}	$\{(4 0,60), (5 0,67), (6 0,53)\}$	e_{51}	$\{(6 0,46), (7 0,73), (8 0,16)\}$
e_{23}	$\{(5 0,87), (6 0,63), (7 0,19)\}$	e_{52}	$\{(6 0,96), (7 0,75), (8 0,49)\}$
e_{24}	$\{(5 0,61), (6 0,94), (7 0,85)\}$	e_{53}	$\{(4 0,60), (5 0,75), (6 0,67), (7 0,44)\}$
e_{25}	$\{(6 0,76), (7 0,71), (8 0,52)\}$	e_{54}	$\{(5 0,67), (6 0,94), (7 0,96)\}$
e_{26}	$\{(6 0,74), (7 0,03), (8 0,38)\}$	e_{55}	$\{(4 0,90), (5 0,29), (6 0,06), (7 0,08)\}$
e_{27}	$\{(4 0,37), (5 0,57), (6 0,33), (7 0,43)\}$	e_{56}	$\{(5 0,10), (6 0,56), (7 0,78), (8 0,91)\}$
e_{28}	$\{(6 0,61), (7 0,74), (8 0,02)\}$	e_{57}	$\{(5 0,87), (6 0,04), (7 0,08)\}$
e_{29}	$\{(4 0,34), (5 0,34), (6 0,31), (7 0,42)\}$	e_{58}	$\{(4 0,05), (5 0,14), (6 0,87)\}$

Источник: составлено автором.

В таблице 5.4 получены прогнозные значения для каждого веса – временного ряда. Искомые значения временных рядов рассчитаны с помощью встроенных функций. Значения временных рядов лежат на отрезке $[\theta^2 a_1, \theta^2 b_1] = [4; 8]$.

Таблица 5.4 – Веса графа G_3 – временные ряды

e^3	$\widehat{w_3}$	e^3	$\widehat{w_3}$	e^3	$\widehat{w_3}$	e^3	$\widehat{w_3}$	e^3	$\widehat{w_3}$	e^3	$\widehat{w_3}$	e^3	$\widehat{w_3}$	e^3	$\widehat{w_3}$
e_1	5,9	e_9	5,7	e_{17}	6,0	e_{25}	6,1	e_{33}	6,0	e_{41}	5,9	e_{49}	5,9	e_8	5,9
e_2	6,0	e_{10}	6,0	e_{18}	6,1	e_{26}	6,1	e_{34}	6,0	e_{42}	6,1	e_{50}	6,1	e_{16}	5,9
e_3	6,1	e_{11}	6,0	e_{19}	6,0	e_{27}	6,2	e_{35}	6,2	e_{43}	5,7	e_{51}	6,2	e_{24}	6,0
e_4	5,9	e_{12}	6,1	e_{20}	6,0	e_{28}	6,2	e_{36}	6,0	e_{44}	5,8	e_{52}	6,2	e_{32}	6,0
e_5	6,2	e_{13}	6,2	e_{21}	5,9	e_{29}	6,1	e_{37}	6,0	e_{45}	6,0	e_{53}	6,0	e_{40}	6,1
e_6	6,1	e_{14}	6,2	e_{22}	6,0	e_{30}	6,0	e_{38}	5,9	e_{46}	5,9	e_{54}	6,1	e_{48}	5,8
e_7	6,0	e_{15}	5,9	e_{23}	6,1	e_{31}	6,1	e_{39}	6,3	e_{47}	6,0	e_{55}	6,0	e_{57}	5,9

Источник: составлено автором.

На МДР x задана ВЦФ и критерии (5.18-5.22):

$$F(x) = (F_1(x), \dots, F_8(x)), \quad (5.18)$$

$$F_i(x) = s_i(x) \rightarrow \min, i = 1, 2, 3, \quad (5.19)$$

$$F_{3+i}(x) = \sum_{t=1}^p \rho_{it} \rightarrow \min, i = 1, 2, 3, \quad (5.20)$$

$$F_7(x) = h \rightarrow \min, \quad (5.21)$$

$$F_8(x) = p \rightarrow \min, \quad (5.22)$$

где $s_i(x)$ – число разделения по i -му набору весов;

ρ_{it} – радиус t -вершины p -центра;

h – количество типов центров разного ранга;

p – количество вершин кратного центра.

Применение алгоритмов $in\alpha_{L-1}$, $fu\alpha_{L-1}$, $ts\alpha_{L-1}$ позволяет найти альтернативные минимальные кратные центры $p = 15$ на подграф-затравках $(L - 1)$ -го ранга, взвешенных соответственно интервальными числами, нечеткими множествами и временными рядами.

Суммарной количество альтернативных решений равно:

– интервальными числами $3 \cdot 2^5 = 96$;

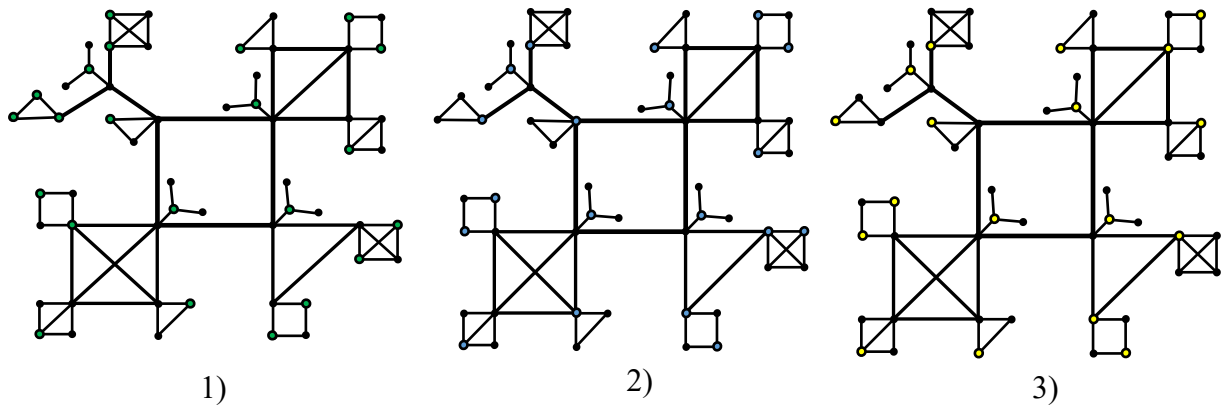
– нечеткими множествами $2^4 = 16$;

– временными рядами $2^3 = 8$.

На рисунке 5.25 представлены три варианта графа, взвешенных соответственно: 1 – интервальными числами; 2 – нечеткими множествами; 3 – временными рядами. Вершины, в которых находятся центры, выделены малыми окружностями. В конкретное решение включается один центр (вершина) на одной подграф-затравке $(L - 1)$ -го ранга.

Выбирается одно из решений по каждому набору весов и обозначается:

$$\begin{aligned} x_1^* &= \left\{ v_{1,4}, v_{6,7}, v_{8,9}, v_{13,14}, v_{16,17}, v_{22,23}, v_{26,27}, v_{32,33}, v_{34,58}, v_{37,38}, v_{40,41}, \right. \\ &\quad \left. v_{42,44}, v_{45,47}, v_{48,49}, v_{51,54} \right\}; \\ x_2^* &= \left\{ v_{1,4}, v_{6,7}, v_{8,9}, v_{13,14}, v_{16,17}, v_{22,25}, v_{27,28}, v_{32,33}, v_{34,35}, v_{37,38}, v_{40,41}, \right. \\ &\quad \left. v_{43,44}, v_{45,47}, v_{48,49}, v_{51,54} \right\}; \\ x_3^* &= \left\{ v_{3,4}, v_{6,7}, v_{8,9}, v_{11,12}, v_{16,21}, v_{22,25}, v_{26,28}, v_{29,32}, v_{34,35}, v_{37,38}, v_{40,41}, \right. \\ &\quad \left. v_{42,44}, v_{45,46}, v_{48,49}, v_{51,54} \right\}. \end{aligned}$$



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.25 – Кратные центры графа G_3 : (1) – интервальные числа; (2) – нечеткие множества; (3) – временные ряды

Получим следующие оценки весовых критериев.

$$\begin{aligned}
 \tilde{F}_1(x_1^*) &\approx 11,89, & \tilde{F}_1(x_2^*) &\approx 12,59, & \tilde{F}_1(x_3^*) &\approx 12,59, \\
 \widetilde{F}_2(x_1^*) &\approx 7,81, & \widetilde{F}_2(x_2^*) &\approx 7,32, & \widetilde{F}_2(x_3^*) &\approx 7,32, \\
 \widetilde{F}_3(x_1^*) &\approx 12,14, & \widetilde{F}_3(x_2^*) &\approx 12,10, & \widetilde{F}_3(x_3^*) &\approx 12,10, \\
 \tilde{F}_4(x_1^*) &\approx 112,39, & \tilde{F}_4(x_2^*) &\approx 113,48, & \tilde{F}_4(x_3^*) &\approx 114,43, \\
 \widetilde{F}_5(x_1^*) &\approx 72,49, & \widetilde{F}_5(x_2^*) &\approx 71,02, & \widetilde{F}_5(x_3^*) &\approx 71,57, \\
 \widetilde{F}_6(x_1^*) &\approx 109,02, & \widetilde{F}_6(x_2^*) &\approx 109,06, & \widetilde{F}_6(x_3^*) &\approx 108,73.
 \end{aligned}$$

Значения топологических критериев заданы в самой задаче:

$$\begin{aligned}
 F_7(x_1^*) &= F_7(x_2^*) = F_7(x_3^*) = 1, \\
 F_8(x_1^*) &= F_8(x_2^*) = F_8(x_3^*) = 15.
 \end{aligned}$$

Сравнение значений весовых критериев по решениям x_1^* , x_2^* и x_3^* представлено ниже в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Сравнения значений критериев

x	$\tilde{F}_1$	$\widetilde{F}_2$	$\widetilde{F}_3$	$\tilde{F}_4$	$\widetilde{F}_5$	$\widetilde{F}_6$
x_1^*	11,89	7,71	12,14	112,39	72,49	109,02
x_2^*	12,59	7,32	12,10	113,48	71,02	109,06
x_3^*	12,59	7,32	12,10	114,43	71,57	108,73

Источник: составлено автором.

Вектор $(\tilde{F}_1(x_1^*), \widetilde{F}_2(x_2^*), \widetilde{F}_3(x_3^*), \tilde{F}_4(x_1^*), \widetilde{F}_5(x_2^*), \widetilde{F}_6(x_3^*))$ является нижней границей, ограничивающей минимально возможные значения частных критериев, а значение $(11,89; 7,32; 12,10; 112,39; 71,02; 108,73)$ – идеальной точкой во множестве значений многокритериальной функции.

Рассмотрим пример взвешивания графа соответствующими весами.

Для интервальных весов свертка представлена в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Свертка интервальных весов

п.	номер	ребро	ранг	w1	w1 свертка
0	1	(0, 1)	1	[235,1; 258,6]	249,2
1	2	(0, 3)	1	[282,9; 299,1]	292,6
2	3	(0, 4)	2	[66,2; 77,7]	73,1

Источник: составлено автором.

Для нечетких множеств центры тяжести представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Центры тяжести нечетких множеств

п.	номер	ребро	ранг	w2	L	M	N	w2_c	mu	w2 свертка
0	1	(0, 1)	1	[234; 0,83], [273; 0,61], [227; 0,69]	517,38	2,13	734	242,9	0,70	146,0
1	2	(0, 3)	1	[196; 0,63], [215; 0,64], [241; 0,58]	400,86	1,85	652	216,6	0,61	130,3

Источник: составлено автором.

Для временного ряда прогнозные значения вычисляются таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Прогнозные значения временных рядов

п.	номер	ребро	ранг	временной ряд	w3
0	1	(0, 1)	1	[280,1; 307,7; 230,2; 271,6; 261,3; 204,1; 251...	235,7
1	2	(0, 3)	1	[237,6; 291,6; 213,7; 222,1; 310,1; 226,4; 283...	269,9

Источник: составлено автором.

Результат взвешивания из 3 наборов весов представлен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Взвешивания из 3 наборов весов

п.	номер	ребро	ранг	w1	w2	w3
0	1	(0, 1)	1	249,2	146,0	235,7
1	2	(0, 3)	1	292,6	130,3	269,9

Источник: составлено автором.

При повышенной вычислительной сложности алгоритм оптимизации СДСС НПМ БР рассматривается как частная задача выделения ОДМВ на графе $G_3 = (V_3, E_3)$, порожденном множеством затравок $H = \{H_1, H_2, \dots, H_5\}$ с сохранением смежности старых ребер. Каждому ребру $e \in E_3$ приписано 3 веса – интервальные числа; нечеткие множества; временные ряды, где $\theta = \frac{1}{4}$ – коэффициент подобия. Определены числовые отрезки взвешивания ребер разного ранга:

$$[a_1; b_1] = [192; 320], [\theta a_1; \theta b_1] = [48; 80], [\theta^2 a_1; \theta^2 b_1] = [12; 20].$$

На множестве x задана векторно-целевая функция (5.23-5.24):

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x)), \quad (5.23)$$

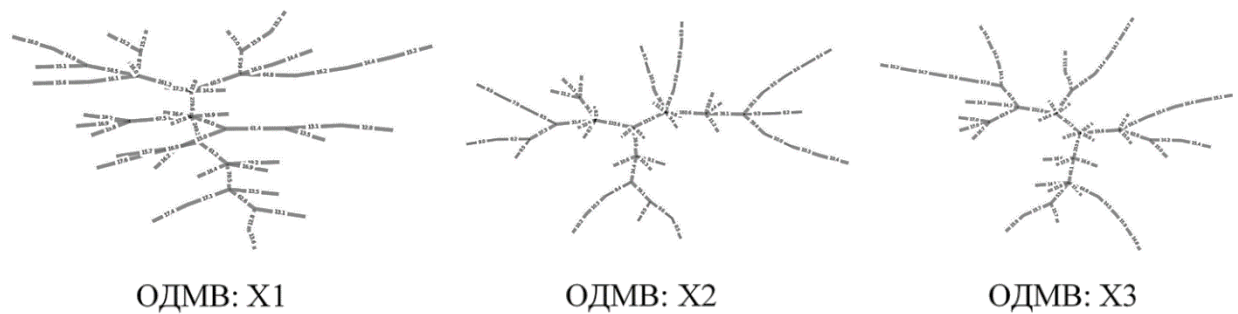
$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x} w_i(e) \rightarrow \min, i = 1, 2, 3, \quad (5.24)$$

где $\sum_{e \in E_x} w_i(e)$ – суммарный вес множества x по i -му набору весов.

Реализация программного комплекса следующая. Вначале генерируется предфрактальный граф G_3 , порожденный множеством затравок H . В качестве коэффициента самоподобия определено значение $\frac{1}{4}$.

Далее каждому ребру предфрактального графа приписывается один из трех типов весов: интервальное число, нечеткое множество и временной ряд. Веса ребер зависят от ранга и коэффициента пропорциональности $tetta=0,25$. В качестве отрезка весов ребер первого ранга выбран $[a_1; b_1] = [192; 320]$. Взвешивание ребер производится в соответствии с правилами взвешивания – интервальными числами, нечеткими множествами и временными рядами. Все значения заносятся в таблицы весов функцией $df=pd.DataFrame()$.

На рисунке 5.26 изображены остовные деревья минимального веса: x_1^* – частное решение задачи $F(x)$ по интервальному набору весов, где значение функции $F_1(x_1^*) = 2152,5$; x_2^* – частное решение задачи $F(x)$ по второму набору весов – нечеткие множества, где значение функции $F_2(x_2^*) = 1259,6$; x_3^* – частное решение задачи $F(x)$ по второму набору весов – временные ряды, где значение функции $F_3(x_3^*) = 2065,2$;



Источник: составлено автором.

Рисунок 5.26 – Интерполяция прогнозного значения временного ряда

Используя решения x_1^* , x_2^* и x_3^* , вычисляются значения функций $F_2(x_1^*)$, $F_3(x_1^*)$; $F_1(x_2^*)$, $F_3(x_2^*)$; $F_1(x_3^*)$, $F_2(x_3^*)$. Соответствующие значения представлены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Сравнительная таблица значения критериев

Допустимые решения	Многокритериальная функция		
	$F_1(x)$	$F_2(x)$	$F_3(x)$
x_1^*	2152,5	1285,9	2153,3
x_2^*	2169,9	1259,6	2124,8
x_3^*	2242,8	1333,8	2065,2

Источник: составлено автором.

Значение (2152,5; 1259,6; 2065,2) является идеальной точкой во множестве значений трехкритериальной функции. Решения x_1^* , x_2^* и x_3^* являются несравнимыми решениями.

Таким образом, представленный ПАК обладает всеми критериями для эффективной работы по решению задачи оптимизации СДСС НПМ БР в условиях повышенной вычислительной сложности, что продемонстрировано как на примерах, так и на численной оценке представленного комплекса [390–394].

Представленный ПАК необходим для реконфигурирования СДСС НПМ БР на больших предфрактальных графах и предназначен для анализа и оптимизации СДСС НПМ БР при аномальных вычислительных нагрузках, включая вычисление связности, кластеризации и др.

Выводы к главе 5

В настоящей главе разработан программно-алгоритмический комплекс реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при возникновении аномальных вычислительных сложностей, отличающийся от известных составом модулей реконфигурирования и оптимизации. В рамках основного научного результата получены следующие частные результаты.

1) Сформирован состав ПАК реконфигурирования СДСС НПМ БР. В соответствии с разработанным методом, представленным в главе 4, программно-алгоритмический комплекс реконфигурирования СДСС НПМ БР состоит из модуля конфигурирования и модуля оптимизации на основе представленных оптимальных по вычислительным ресурсам алгоритмам. Поскольку СДСС НПМ БР состоит из разного числа вычислителей и элементов, сформирована схема комплексного алгоритма с учетом числа вычислителей и недетерминированности весов графа конфигурации. Сформирован перечень алгоритмов, обеспечивающих базовую функциональность СДСС НПМ БР в условиях ограниченных ресурсов, позволяя быстро оценивать АТИ и принимать решения о маршрутизации данных. Для обеспечения оптимального времени конфигурирования определяется наилучший алгоритм по критерию вычислительной сложности.

2) В составе ПАК разработаны 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.

3) Проведен численный анализ вычислительной сложности алгоритмов оптимизации СДСС НПМ БР. Представленные в разделе алгоритмы являются оптимальными с точки зрения вычислительных сложностей при значительном числе вершин и ребер. Известные алгоритмы обладают в 10 и более раз

большей вычислительной нагрузкой, что не позволяет своевременно принять решение о реконфигурировании СДСС НПМ БР. Сравнение демонстрирует превосходство новых алгоритмов в задачах с высокой размерностью, что обосновывает их использование для оптимизации графов конфигураций в реальных условиях, в том числе с аномальной вычислительной сложностью. На основе представленных алгоритмов имеется возможность провести прогнозный расчет вычислительной сложности выполнения алгоритмов и формирование решений с гарантированными оценками в том числе при появлении недетерминированных значений весов.

4) Предложены экспериментальные расчеты на примере поиска решений многокритериальной задачи оптимизации конфигураций СДСС НПМ БР на предфрактальных графах с недетерминированными весами, а именно поиск остовного леса на 2-взвешенном предфрактальном графе с интервальными весами, поиск кратного центра 3-взвешенного предфрактального графа с недетерминированными весами.

Глава 6

Исследование эффективности метода реконfigurирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Исследование эффективности метода реконfigurирования СДСС НПМ БР включает в себя как оценку эффективности разработанного метода, так и верификацию теоретических результатов исследований, полученных в условиях высокой размерности и многокритериальности пространства решений.

С этой целью были сформированы репрезентативные выборки тестовых задач, отражающие реальные условия функционирования систем непрерывного пространственного мониторинга различного назначения. Исходные данные для вычислительных экспериментов формировались на основе анализа типовых сценариев применения сетевых систем мониторинга в различных предметных областях, включая экологический мониторинг, промышленную безопасность, транспортные системы и критически важные инфраструктурные объекты.

Практические примеры эффективности метода структурированы по принципу возрастания сложности и включают базовые тестовые конфигурации для верификации корректности алгоритмов, масштабируемые задачи для анализа поведения в условиях большой размерности, а также специализированные сценарии для исследования устойчивости к различным типам деструктивных воздействий.

6.1 Задачи вычислительных экспериментов и исходные данные с учетом параметров структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга

Разработанный в диссертации оригинальный метод реконfigurирования с использованием теоретико-графовой модели СДСС

НПМ БР на основе больших динамических предфрактальных графов с многими весами потребовал проведения детальной верификации полученных результатов в том числе в ходе вычислительных экспериментов [395; 396]. Кроме того, важной задачей исследования эффективности метода является подтверждение применимости алгоритмов оптимизации топологии сетевых систем в условиях динамически изменяющейся среды функционирования с учетом аномальных вычислительных сложностей [397].

Анализ вычислительной сложности позволил определить границы применимости предложенных методов и выявить оптимальные области их использования в зависимости от размерности решаемых задач и специфики структурно-функциональных требований к системам непрерывного пространственного мониторинга большой размерности [398]. При этом в качестве сценариев функционирования СДСС НПМ БР были приняты задачи от статических конфигураций с фиксированной топологией до высокодинамичных систем с непрерывным изменением структурно-функциональных параметров.

На основе анализа предметной области и изучения характеристик реальных систем мониторинга для проведения вычислительного эксперимента выбраны диапазоны параметров СДСС НПМ БР. В качестве исходных данных использовались следующие параметры структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга.

Количество узлов системы ($N \in [50; 200]$) обосновано анализом масштабов типовых систем мониторинга различного назначения. Нижняя граница (50 узлов) соответствует минимально необходимой конфигурации для обеспечения непрерывного покрытия контролируемой области, в то время как верхняя граница (200 узлов) отражает практические ограничения вычислительной сложности алгоритмов оптимизации при сохранении приемлемого времени отклика системы.

Количество иерархических слоев ($L = 3$) определено исходя из классической трехуровневой архитектуры сетевых систем мониторинга: уровень сбора данных (сенсорный слой), уровень предварительной обработки

(агрегирующий слой) и уровень принятия решений (управляющий слой) [399]. Такая архитектура обеспечивает оптимальный баланс между сложностью управления и эффективностью обработки информации.

Вероятность соединения узлов установлена на основе компромисса между обеспечением достаточной связности графа и минимизацией избыточности соединений. Значение 0,3 соответствует минимальной связности, гарантирующей достижимость всех узлов, в то время как значение 0,5 обеспечивает высокую отказоустойчивость при приемлемом уровне ресурсных затрат.

Коэффициенты важности критериев определены экспертным методом с учетом специфики задач оптимизации СДСС НПМ БР: коэффициент живучести ($\alpha = 1,0$) отражает критическую важность способности системы функционировать при деструктивных воздействиях; коэффициент масштабируемости ($\beta = 0,5$) учитывает необходимость адаптации к изменению размерности задач; коэффициент адаптивности ($\gamma = 0,1$) характеризует способность к динамической реконфигурации топологии.

Для проведения вычислительного эксперимента использовалась конфигурация СДСС НПМ БР, представленная четырьмя типами узлов, каждый из которых выполняет специализированные функции в рамках общей системы мониторинга.

Сенсорные узлы составляют 60% от общего количества узлов системы и выполняют функции первичного сбора данных мониторинга. Пропускная способность сенсорных узлов варьируется в диапазоне условных единиц, что соответствует ограниченным вычислительным ресурсам специализированных датчиков. Низкая пропускная способность компенсируется большим количеством узлов и их распределением по контролируемой территории.

Обрабатывающие узлы составляют 20% системы и обеспечивают предварительную обработку и фильтрацию данных, поступающих от сенсорных узлов. Пропускная способность позволяет агрегировать информацию от нескольких сенсорных узлов и выполнять базовые алгоритмы анализа данных в режиме реального времени.

Агрегирующие узлы представляют 15% системы и выполняют функции

высокоуровневой обработки и интеграции информационных потоков. Высокая пропускная способность обеспечивает консолидацию данных от множественных источников и выполнение сложных алгоритмов анализа и принятия решений.

Управляющие узлы составляют 5% системы и реализуют функции централизованного управления и координации работы всей системы. Максимальная пропускная способность гарантирует способность обработки критически важной управляющей информации и обеспечения оперативного реагирования на изменения состояния системы.

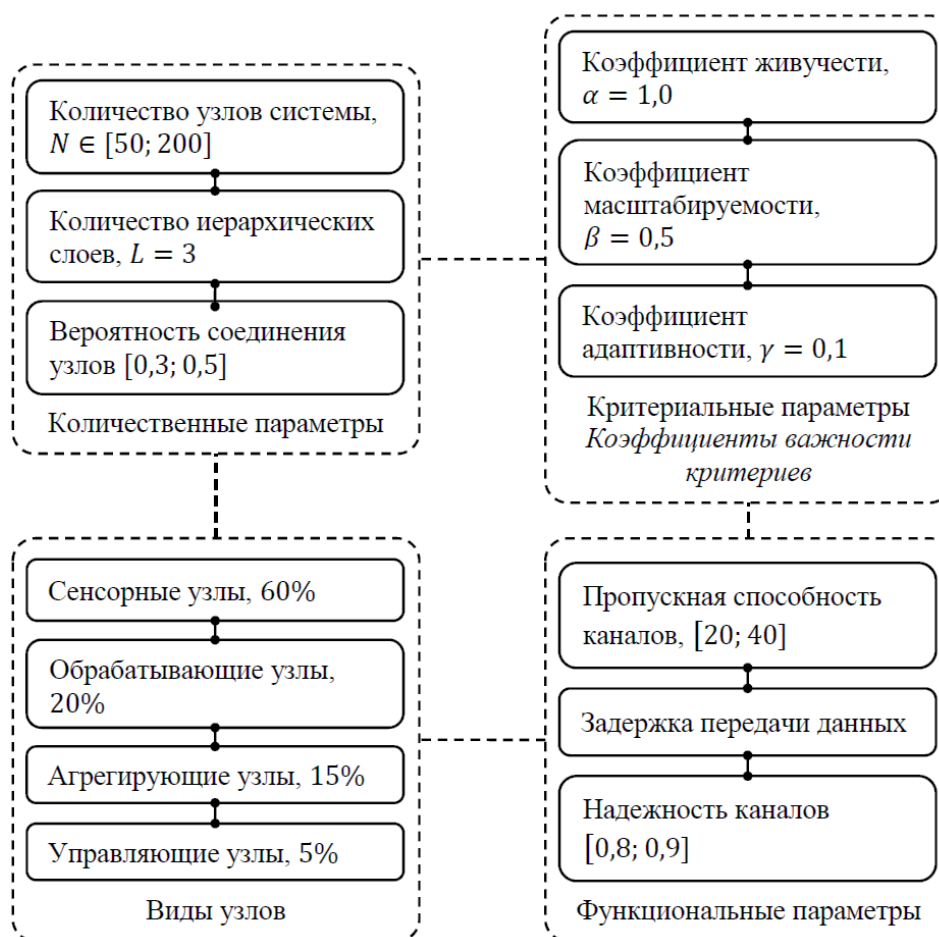
Каналы связи между узлами системы характеризуются тремя основными параметрами, определяющими качество информационного обмена [400].

Пропускная способность каналов варьируется в диапазоне условных единиц в зависимости от типа соединяемых узлов и их иерархического уровня. Внутрислойные (общей иерархии) соединения характеризуются пропускной способностью $20 \div 40$ единиц, межслойные соединения – $60 \div 100$ единиц для обеспечения эффективного вертикального информационного обмена.

Задержка передачи находится в диапазоне условных единиц времени и зависит от физического расстояния между узлами и типа используемых каналов связи. Минимальная задержка характерна для высокоскоростных соединений между управляющими узлами, максимальная – для связей между удаленными сенсорными узлами.

Надежность каналов определяется в диапазоне $[0,8; 0,99]$ и отражает вероятность успешной передачи информационных пакетов. Высокие значения надежности $[0,95; 0,99]$ характерны для критически важных управляющих соединений, в то время как сенсорные каналы могут иметь надежность $[0,8; 0,9]$ без критического влияния на общую функциональность системы.

Приведенные выше исходные данные отражают начальную конфигурацию СДСС НПМ БР, и создает основу для объективной оценки эффективности метода реконфигурирования. На рисунке 6.1 исходные данные представлены в схематическом виде.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.1 – Состав и характеристики СДСС НПМ БР для вычислительных экспериментов

Таким образом, задачей эксперимента является детальная верификация предложенных модели и метода реконфигурирования СДСС НПМ БР в числе в ходе вычислительных экспериментов. Кроме того, важной задачей исследования эффективности метода является подтверждение применимости алгоритмов оптимизации при аномальной вычислительной сложности.

6.2 Анализ эффективности метода реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Анализ эффективности метода реконфигурирования осуществляется 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 6.2 представлена схема оценки эффективности метода по множеству критериев в различных условиях функционирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.2 – Схема оценки эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР в соответствии с заданными критериями

Критерии оценки эффективности метода реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Для оценки эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР в диссертации использованы три группы критериев.

1. Структурно-функциональные критерии оценки свойств системы

Данная группа критериев характеризует топологические и функциональные свойства системы.

1.1. *Устойчивость системы* (F_1) – способность системы сохранять основные функциональные характеристики при воздействии деструктивных факторов (6.1):

$$F_1 = \frac{|V_{active}|}{|V_{total}|} \cdot \frac{|E_{active}|}{|E_{total}|}, \quad (6.1)$$

где $|V_{active}|$ – количество активных узлов;
 $|V_{total}|$ – общее количество узлов;
 $|E_{active}|$ – количество активных каналов;
 $|E_{total}|$ – общее количество каналов.

1.2. *Целостность данных* (F_2) – способность системы обеспечивать доставку и целостность информационных потоков (6.2):

$$F_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i^{delivered}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i^{generated}}, \quad (6.2)$$

где $\lambda_i^{delivered}$ – интенсивность доставленных пакетов от i -го узла;
 $\lambda_i^{generated}$ – интенсивность генерируемых пакетов.

1.3. *Живучесть системы* (F_3) – способность системы функционировать при частичной деградации компонентов (6.3):

$$F_3 = \frac{C_{current}}{C_{nominal}} \cdot \exp\left(-\alpha \cdot \frac{N_{failed}}{N_{total}}\right), \quad (6.3)$$

где $C_{current}$ – текущая пропускная способность системы;
 $C_{nominal}$ – номинальная пропускная способность;
 N_{failed} – количество отказавших элементов;
 N_{total} – общее количество элементов;
 α – коэффициент критичности отказов.

2. Числительные критерии оценки вычислительной эффективности алгоритмов

Группа критериев, характеризующих вычислительную эффективность алгоритмов.

2.1. *Временная сложность* (F_4) – оценка времени выполнения алгоритмов построения и реконфигурации (6.4):

$$F_4 = \frac{T_{ref}}{T_{actual}}, \quad (6.4)$$

где T_{ref} – эталонное время выполнения;
 T_{actual} – фактическое время выполнения.

2.2. *Пространственная сложность* (F_5) – оценка требований к памяти (6.5):

$$F_5 = \frac{M_{ref}}{M_{actual}}, \quad (6.5)$$

где M_{ref} – эталонные требования к памяти;
 M_{actual} – фактические требования к памяти.

2.3. *Масштабируемость* (F_6) – способность алгоритмов работать с графами различной размерности (6.6):

$$F_6 = \exp\left(-\beta \cdot \log\left(\frac{n}{n_0}\right)\right), \quad (6.6)$$

где n – размер графа;
 n_0 – базовый размер графа;
 β – коэффициент масштабируемости.

3. Качественные критерии оценки качества решений

Критерии, оценивающие качество получаемых решений.

3.1. *Точность агрегированного топологического индекса* (F_7) – оценка корректности расчета АТИ (6.7):

$$F_7 = 1 - \frac{|ATI_{calculated} - ATI_{reference}|}{ATI_{reference}}. \quad (6.7)$$

Агрегированный топологический индекс (АТИ) является ключевым показателем состояния СДСС НПМ БР и рассчитывается как (6.8) [401; 402]:

$$ATI = \sum_{i=1}^{13} a_i \cdot m_i, \quad (6.8)$$

где a_i – весовые коэффициенты ($a_i = 0,25$ для основных компонентов);

m_i – нормированные метрики состояния системы.

Нормирование метрик выполняется:

$$m_i = \frac{F_i - F_{i,min}}{F_{i,max} - F_{i,min}}.$$

При этом устанавливаются следующие ограничения:

$F_{i,min} = 0$ – минимально возможное значение метрики;

$F_{i,max} = 1$ – максимально возможное значение метрики.

Пороговое значение для принятия решения о необходимости реконфигурации принимается в соответствии с экспертным решением или на основе методик оптимизации, предложенных в главах 3-5.

Комплексный показатель эффективности

Для комплексной оценки эффективности метода применяется комплексный показатель эффективности в виде (6.9):

$$\text{КРЕ} = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot F_i, \quad (6.9)$$

где w_i – весовые коэффициенты, определяемые экспертным путем и удовлетворяющие условию $\sum_{i=1}^7 w_i = 1$ [403, 404].

Нормированные значения критериев F_i рассчитываются по формуле (6.10):

$$F_i = \frac{F_{i,actual} - F_{i,min}}{F_{i,max} - F_{i,min}}, \quad (6.10)$$

где $F_{i,min}$ и $F_{i,max}$ – минимальное и максимальное значения i -го критерия соответственно.

Пороговые значения критериев эффективности

Для оценки эффективности реконфигурирования СДСС НПМ БР приняты следующие пороговые значения, представленные в таблице 6.1.

На основе представленного набора критериев осуществляется оценка эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий.

Таблица 6.1 – 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 агрегированного топологического индекса (F_7)	$> 0,9$	$[0,7; 0,9]$	$[0,5; 0,7)$
Агрегированный показатель эффективности (АПЭ)	$> 0,85$	$[0,7; 0,85]$	$[0,55; 0,7)$

Источник: составлено автором.

Машинный эксперимент по оценке эффективности метода реконfigurирования структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Для проведения численного моделирования СДСС НПМ БР определены параметры, представленные в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Параметры моделирования

Параметр	Обозначение	Значение по умолчанию
Количество узлов	N	$[50; 200]$
Количество иерархических слоев	L	3
Вероятность соединения узлов	p_{conn}	$[0,3; 0,5]$
Коэффициент живучести	α	1,0
Коэффициент масштабируемости	β	0,5
Коэффициент адаптивности	γ	0,1
Коэффициент самоподобия	k	$(0; 1)$

Источник: составлено автором.

Представленные параметры графа конфигурации СДСС НПМ БР позволяют оценить эффективность метода реконfigurирования. Ниже также приведено уточняющее описание указанных параметров.

Типы узлов и их характеристики

В модели СДСС НПМ БР при проведении вычислительного эксперимента используются четыре типа узлов.

- 1) Сенсорные узлы (sensor): 60% от общего количества:

- пропускная способность $C_s \in [1; 10]$ условных единиц;
- функция: сбор первичных данных мониторинга.
- 2) Обработывающие узлы (processor): 20% от общего количества:
 - пропускная способность $C_p \in [10; 50]$ условных единиц;
 - функция: предварительная обработка данных.
- 3) Агрегирующие узлы (aggregator): 15% от общего количества:
 - пропускная способность: $C_a \in [50; 100]$ условных единиц;
 - функция: агрегация и фильтрация данных.
- 4) Управляющие узлы (controller): 5% от общего количества:
 - пропускная способность $C_c \in [80; 100]$ условных единиц;
 - функция: координация и управление сетью.

Характеристики каналов связи

Каждый канал связи характеризуется тремя параметрами:

$B_{ij} \in [1; 100]$ – пропускная способность канала;

$D_{ij} \in [1; 50]$ – задержка передачи;

$R_{ij} \in [0,8; 0,99]$ – надёжность канала.

Вычислительный эксперимент по оценке эффективности метода реконфигурирования структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности на этапе конфигурирования

На рисунке 6.3 представлен порядок проведения вычислительного эксперимента по оценке эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР.

Порядок проведения вычислительного эксперимента по оценке эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР представляет последовательность шагов [405-407]. Далее приведено описание конкретных действий вычислительного эксперимента.

Шаг 1. Конфигурирование системы

Создание конфигурации системы с заданными параметрами:

config = *SDSSConfig*(

$num\_nodes = 100,$
 $num\_layers = 3,$
 $connectivity\_prob = 0.4,$
 $alpha\_survivability = 1.0,$
 $beta\_scalability = 0.5).$

Шаг 2. Генерация предфрактального графа

Генерация графа конфигурации со следующими последовательными операциями.

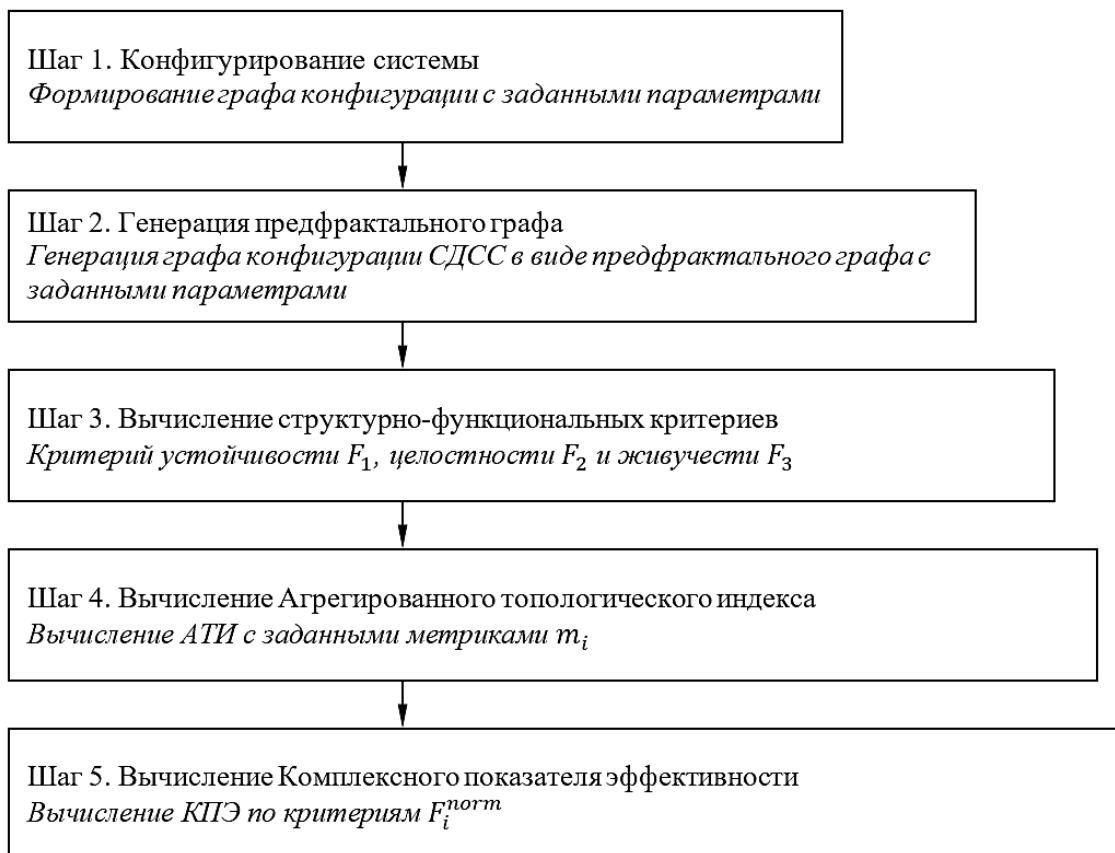
Генерация графа уровня L :

Определение размера графа: $N_L = N_0 \cdot 2^{L-1}$.

Создание узлов с псевдослучайным распределением типов.

Назначение узлам иерархических слоёв: $layer_i \in [0, L - 1]$.

Генерация рёбер с учётом иерархии и типов узлов.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.3 – Порядок проведения вычислительного эксперимента исследования эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР

Шаг 3. Вычисление критериев

Критерий устойчивости F_1 :

$$F_1 = \frac{|V_{active}|}{|V_{total}|} \cdot \frac{|E_{active}|}{|E_{total}|}.$$

Критерий целостности F_2 :

$$- \text{ для связного графа: } F_2 = \min \left(1.0, \frac{1}{100} \overline{B \cdot R} \right);$$

$$- \text{ для несвязного графа: } F_2 = \frac{|V_{max\_component}|}{|V_{active}|}.$$

Критерий живучести F_3 :

$$F_3 = \frac{C_{current}}{C_{nominal}} \cdot \exp \left(-\alpha \cdot \frac{N_{failed}}{N_{total}} \right).$$

На рисунке 6.4 представлен пошаговый процесс построения графа конфигурации $G_{\text{конф}}^3$, состоящем из 4-х типов вершин: сенсорные узлы (sensor), обрабатывающие узлы (processor), агрегирующие узлы (aggregator), управляющие узлы (controller).

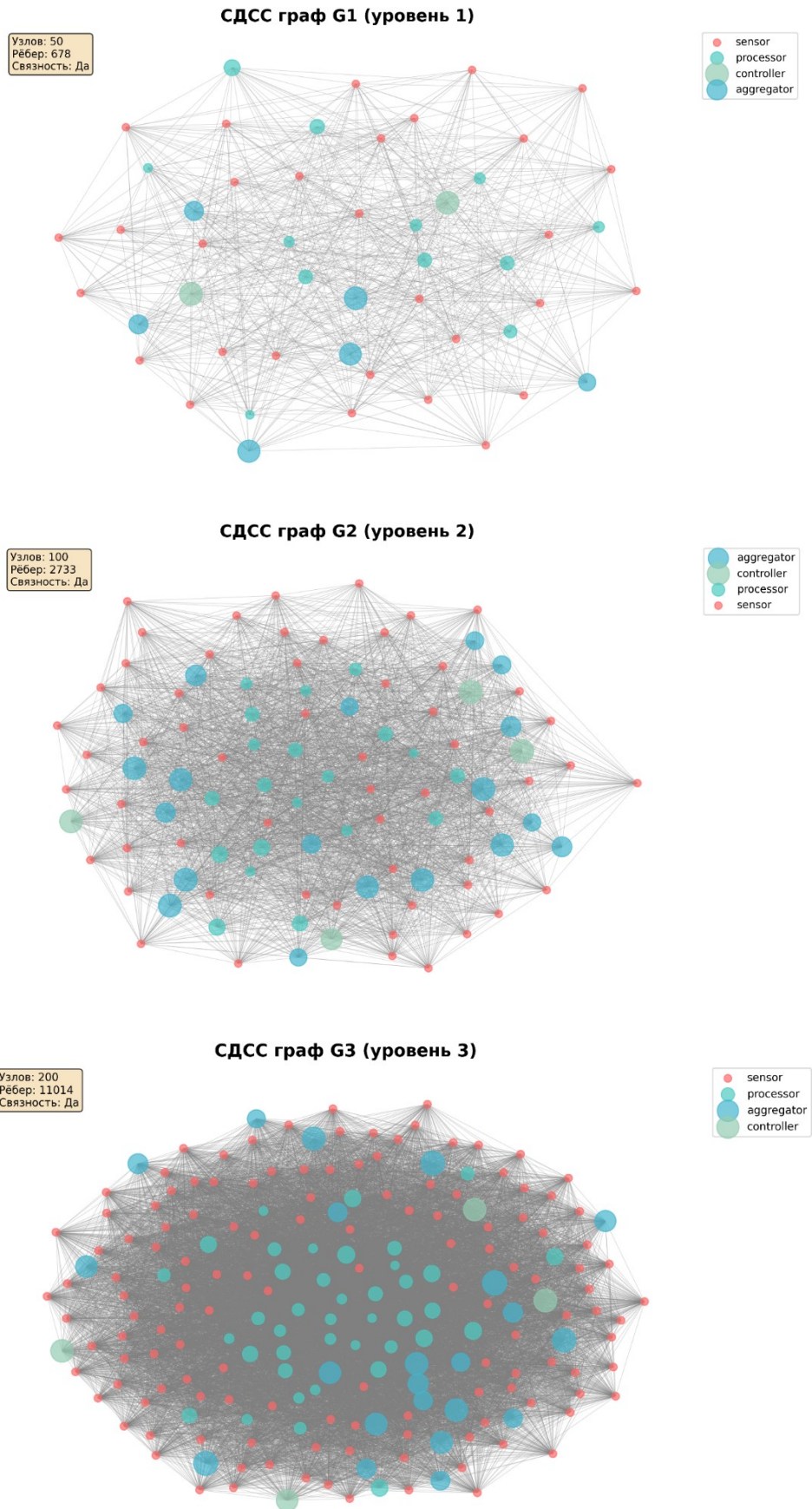
На рисунке 6.5 на графике представлены значения структурно-функциональных критериев F_1 , F_2 и F_3 . Критерий целостности F_2 демонстрирует значения ниже 0,5, а критерии устойчивости F_1 и живучести F_3 – максимально возможные значения, равные 1. Что свидетельствует о работоспособности метод реконфигурирования и наилучших значений метрик по критериям F_1 и F_3 .

Шаг 4. Вычисление АТИ

В вычислительном эксперименте в условиях деструктивных воздействий в агрегированный топологический индекс входит 13 компонент (6.11):

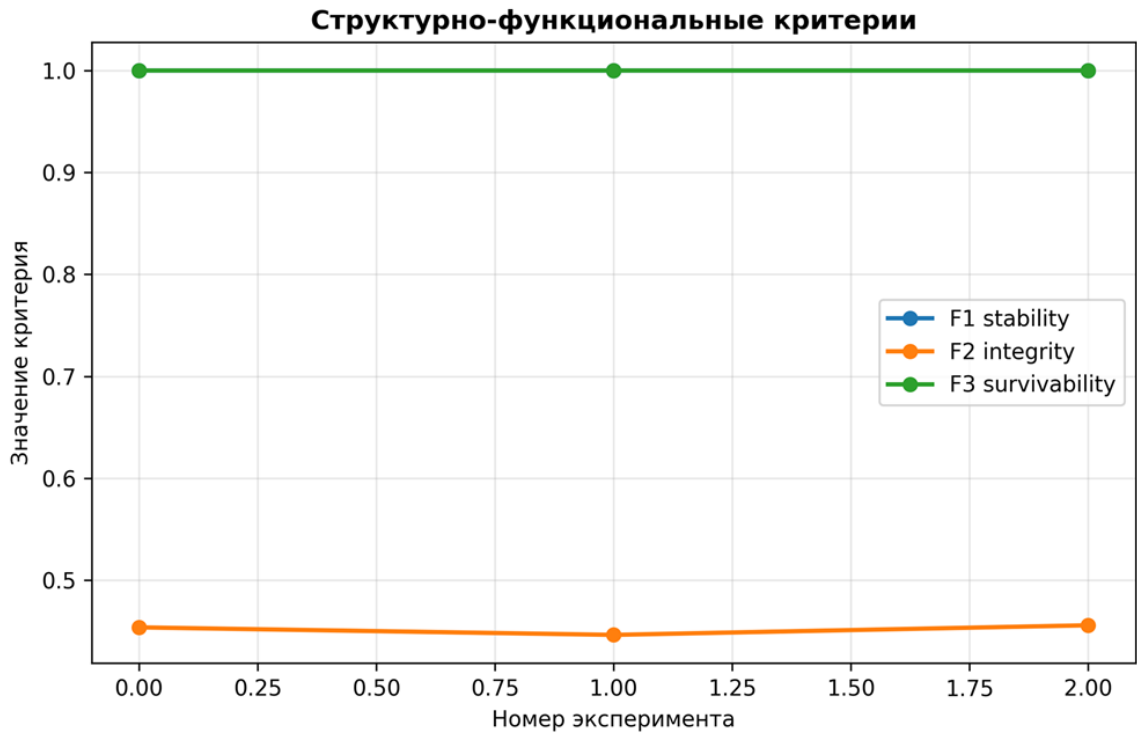
$$ATI = \sum_{i=1}^{13} a_i \cdot m_i, \quad (6.11)$$

где a_i – весовые коэффициенты, по умолчанию $a_i = \frac{1}{13}$.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.4 – Построение графа системы третьего уровня



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.5 – Структурно-функциональные критерии F_1 , F_2 и F_3

Вычисляются следующие топологические метрики [408; 409]:

m_1 – нормированная средняя степень узлов: $m_1 = \frac{\overline{deg}}{N-1}$;

m_2 – коэффициент кластеризации: $m_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$;

m_3 – плотность графа: $m_3 = \frac{2|E|}{N(N-1)}$;

m_4 – обратный нормированный диаметр: $m_4 = \frac{1}{1+d/N}$;

m_5 – обратная средняя длина пути: $m_5 = \frac{1}{1+l/N}$;

m_6 – средняя центральность по посредничеству;

m_7 – средняя центральность по близости;

m_8 – средняя собственная центральность;

m_9 – модуль коэффициента ассортативности;

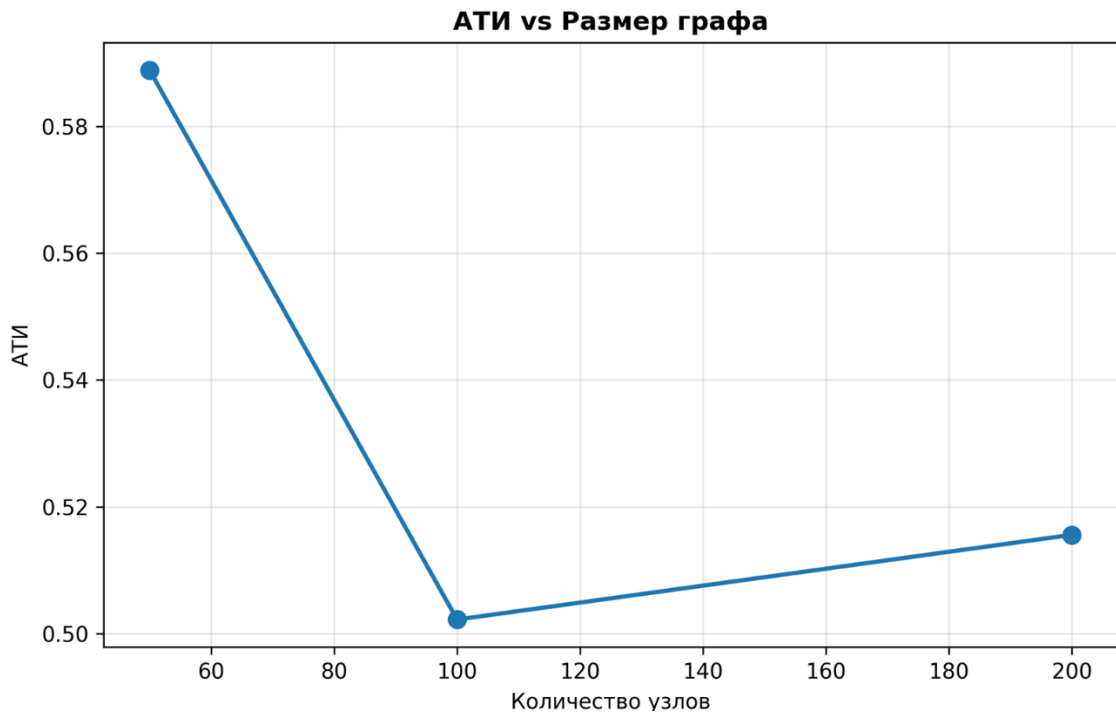
m_{10} – нормированная связность рёбер;

m_{11} – нормированная связность узлов;

m_{12} – обратное число компонент связности;

m_{13} – глобальная эффективность сети.

Значения АТИ отражают текущее состояние системы в заданных условиях функционирования [410; 411]. На рисунке 6.6 представлено поведение значения АТИ при разном количестве узлов. Наибольшее значение АТИ 0,59 при количестве 50 узлов, при этом все значения АТИ выше отметки 0,5.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.6 – Агрегированный топологический индекс в связи с количеством узлов

Значения АТИ при разном количестве узлов отражают состояние стабильности системы, где все значения находятся выше 0,5, а также подтверждают сбалансированность составных метрик самого АТИ.

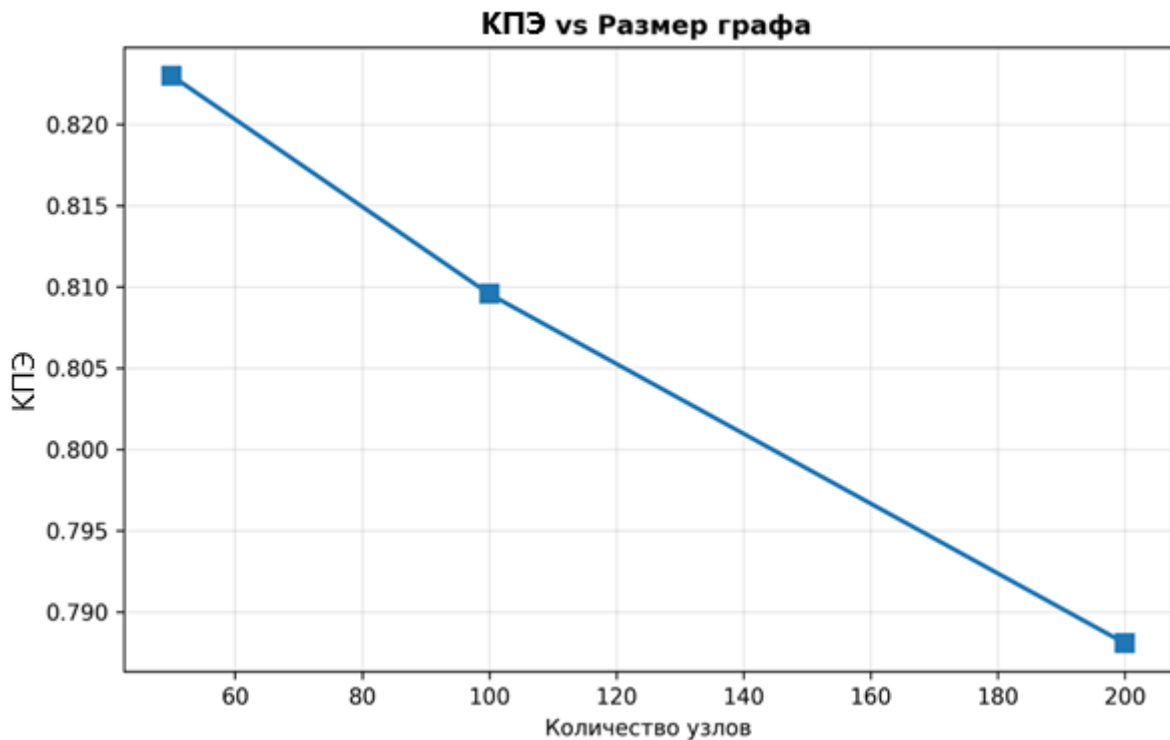
Шаг 5. Расчёт КПЭ

Комплексный показатель эффективности вычисляется в виде (6.12):

$$КРЕ = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot F_i^{norm}, \quad (6.12)$$

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 6.7 приставлены значения комплексного показателя эффективности при разном количестве узлов.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.7 – Комплексный показатель эффективности в связи с количеством узлов

Увеличение количества элементов очевидно приводит к снижению значений комплексного показателя эффективности, 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.

Сценарии вычислительного эксперимента реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях деструктивных воздействий.

Для комплексной оценки эффективности разработанного в диссертации метода реконфигурирования рассмотрено поведение системы в различных условиях функционирования. По результатам анализа предметной области [412-417] применения систем непрерывного пространственного мониторинга выявлены необходимые для формирования типовых сценариев требования к сценариям.

1. Репрезентативность – сценарии должны отражать типовые классы проблем, встречающихся в действующих системах мониторинга.

2. Ортогональность – сценарии должны быть независимыми и исследовать различные аспекты эффективности метода. Номинальный режим характеризует базовое поведение; структурные отказы изучают способность к восстановлению после воздействий; деградация каналов исследует адаптацию к долгосрочным плавным изменениям. Эти три типа воздействий требуют качественно различных управляющих стратегий.

3. Полнота – совокупность сценариев должна охватывать весь спектр работоспособности системы от оптимального функционирования до граничных условий. Это обеспечивает объективную оценку границ применимости метода.

4. Измеримость – результаты должны поддаваться количественной оценке по единой системе критериев, что позволяет проводить сравнения и выявлять закономерности.

Далее представлены описание вычислительных экспериментов в соответствии со сценариями и их назначение, то есть каждый сценарий призван подтвердить эффективность метода реконфигурирования СДСС НПМ БР.

Сценарий 1. Номинальное функционирование СДСС НПМ БР.

Назначение. Установление базовых значений параметров для всех последующих оценок и верификация корректности реализации алгоритмов.

Сценарий 2. Структурные отказы СДСС НПМ БР в условиях деструктивных воздействий.

Назначение. Исследование поведения СДСС НПМ БР при внезапных, локализованных повреждениях, моделирующих отказы физических компонентов сети.

Сценарий 3. Деградация каналов связи (функциональные воздействия) СДСС НПМ БР.

Назначение. Исследование функциональной деградации без полного разрыва соединений, моделирующей долгосрочное ухудшение качества коммуникаций.

Каждый сценарий реализуется следующие пункты:

1) описание сценария, характер и масштаб воздействия;

- 2) вызванные изменения, как изменяются структурно-функциональные параметры системы;
- 3) поведение метрик, динамика критериев эффективности;
- 4) операции реконфигурирования, выполненные системой;
- 5) результаты восстановления, восстановлены ли параметры системы и до какого уровня;
- 6) сравнение с альтернативными методами, преимущества предложенного подхода.

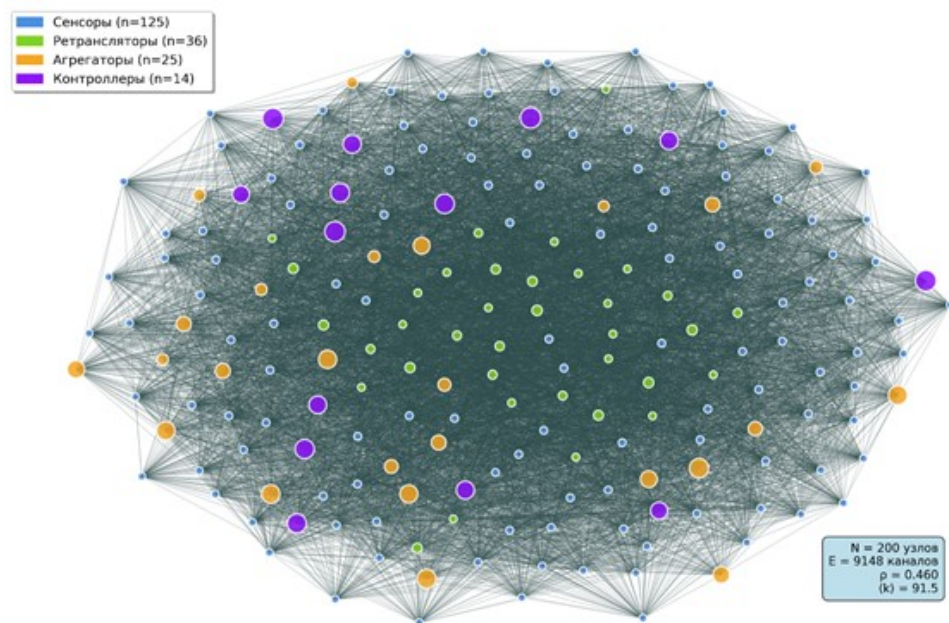
Вычислительный эксперимент по Сценарию 1.

Номинальное функционирование системы при текущем графе конфигурации

В соответствии с заданными параметрами проведена генерация графа G_6 с 4 типами узлов. На полученном графе конфигурации осуществлены измерения численных характеристик метода реконфигурирования в части:

- 1) измерение времени генерации и оценки;
- 2) расчёт всех метрик эффективности;
- 3) анализ масштабируемости алгоритмов.

На рисунке 6.8 представлен граф конфигурации $G_{\text{конф}}^6 = G_6$ с количеством узлов $N = 200$, ребер $E = 9148$.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.8 – Граф конфигурации $G_{\text{конф}}^6 = G_6$ с 4 типами узлов СДСС НПМ БР

На рисунке 6.8 изображен граф конфигурации СДСС НПМ БР с 200 узлами и 9148 рёбрами, построенный в соответствии с требованиями к теоретико-графовой модели СДСС НПМ БР на основе трёхуровневой иерархической структуры. В таблице 6.3 представлены четыре типа узлов графа конфигурации, обозначенные разными цветами:

Таблица 6.3 – Типы узлов и их описание

Обозначение	Цвет	Тип узла	Описание и функция
контроллеры	фиолетовый	controller	5% от всех узлов (10 узлов). Координируют работу системы, принимают решения о реконфигурации. Высокая пропускная способность $C_c \in [80; 100]$ условных единиц. Расположены на верхних иерархических уровнях.
агрегаторы	желтый	aggregator	15% от всех узлов (30 узлов). Интегрируют информацию от множественных источников. Пропускная способность $C_a \in [50; 100]$ условных единиц. Выполняют роль промежуточного уровня между сенсорами и управлением.
ретрансляторы	зелёный	processor	20% от всех узлов (40 узлов). Выполняют предварительную обработку и фильтрацию данных. Пропускная способность $C_p \in [10; 50]$ условных единиц. Распределены по системе для локальной аналитики.
сенсоры	голубой	sensor	60% от всех узлов (120 узлов). Сбор первичных данных мониторинга. Низкая пропускная способность $C_s \in [1; 10]$ условных единиц. Наиболее многочисленны, распределены по контролируемой территории.

Источник: составлено автором.

Таким образом, исследования по первому сценарию показали, что метод реконфигурирования позволяет сформировать конфигурацию СДСС НПМ БР в соответствии с заданными требованиями к составу и количеству элементов системы.

Вычислительный эксперимент по Сценарию 2.

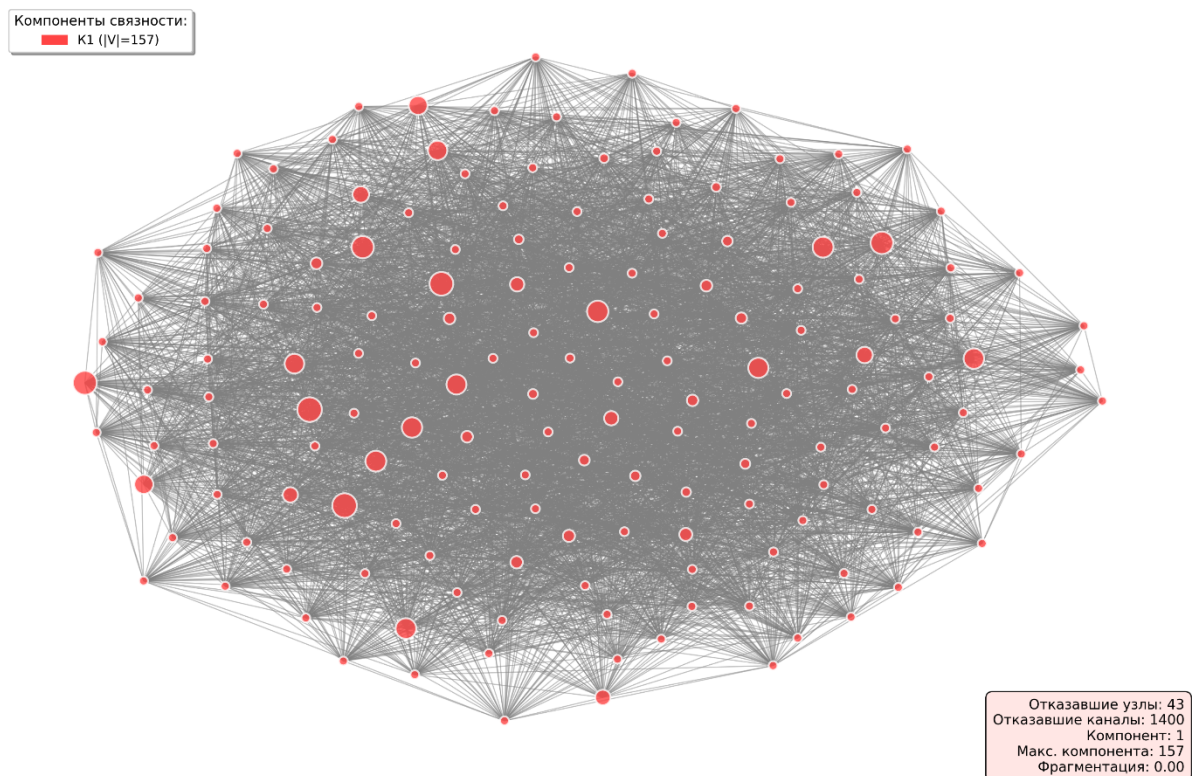
Отказы узлов и рёбер

Моделирование отказов с интенсивностями 10%, 25%, 50%:

- 1) Случайные отказы узлов с вероятностью p_{node_fail} .
- 2) Случайные отказы рёбер с вероятностью p_{edge_fail} .
- 3) Измерение деградации метрик ΔF_i и ΔATI .

На рисунке 6.9 представлены результаты отказа элементов СДСС в пределах 25%. Мощность наибольшей связной компоненты составляет 157 узлов.

Полученные результаты сведены в таблице 6.4: мощность наибольшей компоненты связности: 157 узлов из 200 (78,5% от исходной системы); количество отказавших узлов: 30 узлов (15% от начального числа); количество изолированных узлов: примерно 7 – 10 узлов (те, которые не вышли из строя, но отрезаны от основной системы); сохранение связности: система сохраняет связность благодаря избыточности соединений и иерархической структуре.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.9 – Моделирование отказов 25% элементов системы

Так как система сохранила управляющие и агрегирующие узлы, то функционирование системы не нарушено, несмотря на снижение значений некоторых параметров. Реконфигурирование не является обязательным в

соответствии с заданными пороговыми значениями. Метод реконфигурирования показал свою эффективность в части оценки состояния системы и принятия решения о реконфигурировании. В данном случае реконфигурирование не требуется.

Таблица 6.4 – Статистика компонент связности при 25% отказов

Компонента	Мощность	Доля узлов в процентах	Замечание
Наибольшая компонента	157	78,5	Содержит все управляющие и большинство агрегирующих узлов
Компонента 2	8	4,0	Изолированная группа обрабатывающих узлов
Компонента 3	5	2,5	Периферийная группа сенсорных узлов
Отказавшие узлы	30	15,0	Исключены из анализа

Источник: составлено автором.

Вычислительный эксперимент по Сценарию 3.

Деградация каналов связи

Настоящий сценарий позволяет определить эффективность метода реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий. В отличие от структурных отказов, канал остаётся физически соединённым, но теряет в параметрах – пропускной способности, надёжности, увеличивает задержку. Это качественно иной класс проблем, требующий иных механизмов компенсации (не разрыв соединения, а оптимизация маршрутизации и перераспределение нагрузки).

Деградация каналов – часто встречающийся сценарий в реальных системах, представлена следующими причинами:

- пропускная способность беспроводных каналов ухудшается из-за помех естественного и искусственного происхождения, осадков, атмосферных явлений [418; 419];

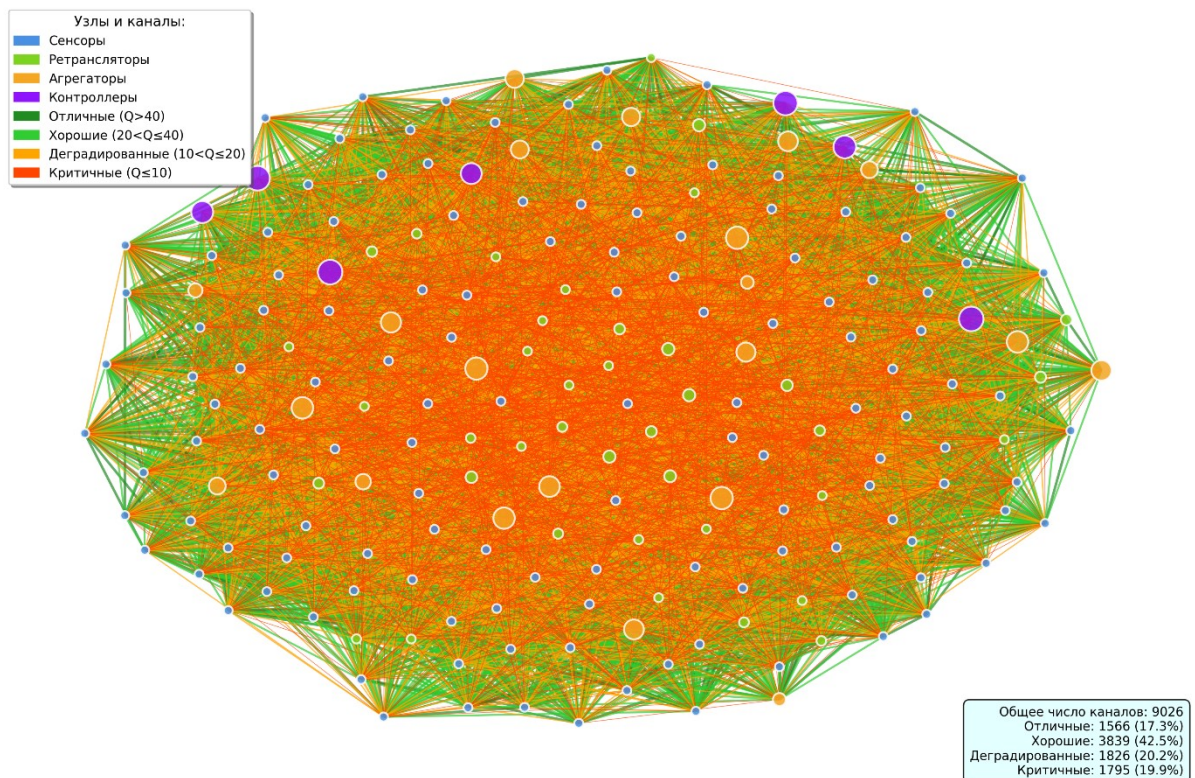
- оптические каналы снижают качество трансляции при загрязнении, затухании сигнала;

- кабельные каналы подвержены утечкам, коррозии и снижению начальных характеристик.

В связи с чем необходимо реконфигурировать структурно-динамическую сетевую систему непрерывного пространственного мониторинга большой размерности в условиях возникновения деструктивных воздействий [420]. Что подтверждает эффективность метода реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий.

Процесс деградации развивается постепенно, что позволяет посредством метода реконфигурирования динамически адаптировать структурно-динамическую сетевую систему непрерывного пространственного мониторинга большой размерности. Система может быть частично восстановлена без кардинальной реструктуризации.

На рисунке 6.10 представлены результаты снижения пропускной способности каналов СДСС НПМ БР в пределах 50%. Мощность наибольшей связной компоненты составляет 157 узлов.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.10 – Снижение пропускной способности до 50% каналов связи

Несмотря на значительное снижение пропускной способности каналов связи текущей конфигурации СДСС НПМ БР методика оптимизации в составе метода реконфигурирования позволяет адаптировать структуру связи для

максимального использования каналов связи.

Анализ результатов на соответствие критериям эффективности

Пороговые значения

В таблице 6.5 представлена классификация результатов оценки эффективности критериев и показателей.

Таблица 6.5 – Классификация результатов оценки эффективности

Метрика	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно
F_1 (Устойчивость)	$> 0,9$	$0,7 - 0,9$	$0,5 - 0,7$
F_2 (Целостность)	$> 0,95$	$0,85 - 0,95$	$0,7 - 0,85$
F_3 (Живучесть)	$> 0,8$	$0,6 - 0,8$	$0,4 - 0,6$
АТІ	$> 0,8$	$0,6 - 0,8$	$0,4 - 0,6$
КРЕ	$> 0,85$	$0,7 - 0,85$	$0,55 - 0,7$

Источник: составлено автором.

Критерии принятия решений

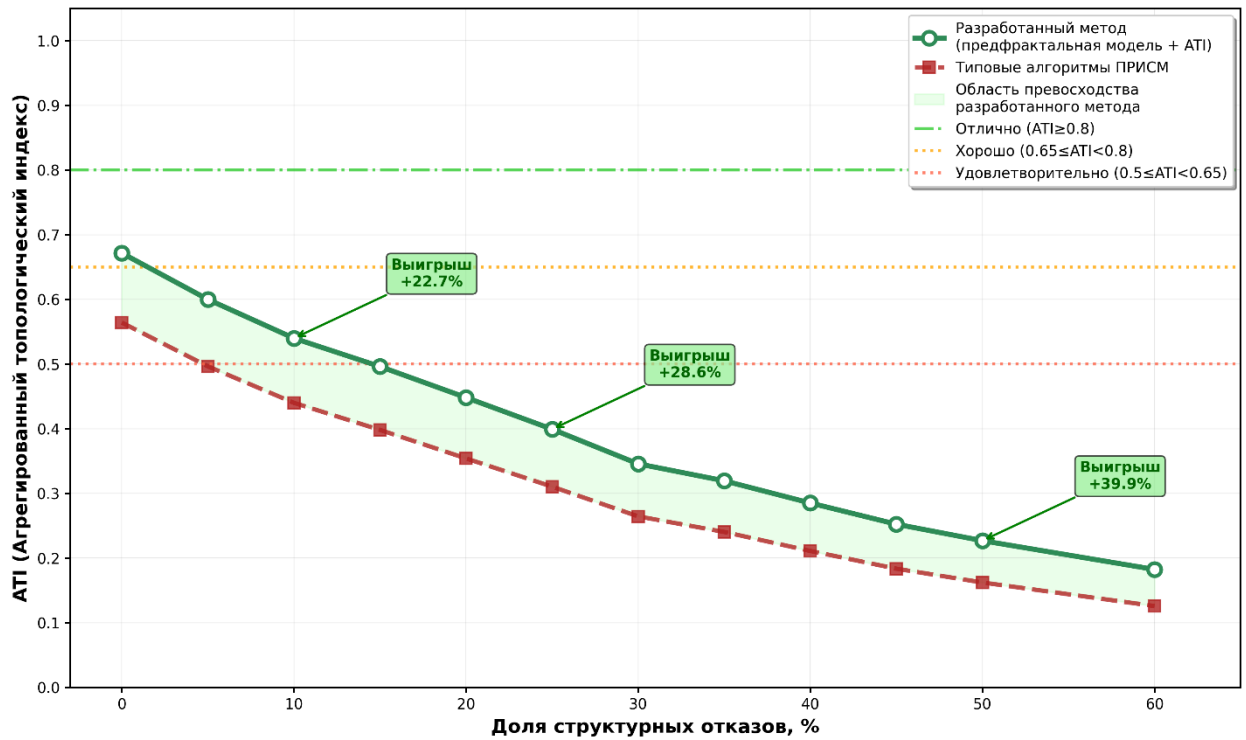
При $АТІ < 0,1$ — необходима немедленная реконфигурация системы.

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

При деградации $\Delta АТІ > 0,3$ — критическое снижение эффективности.

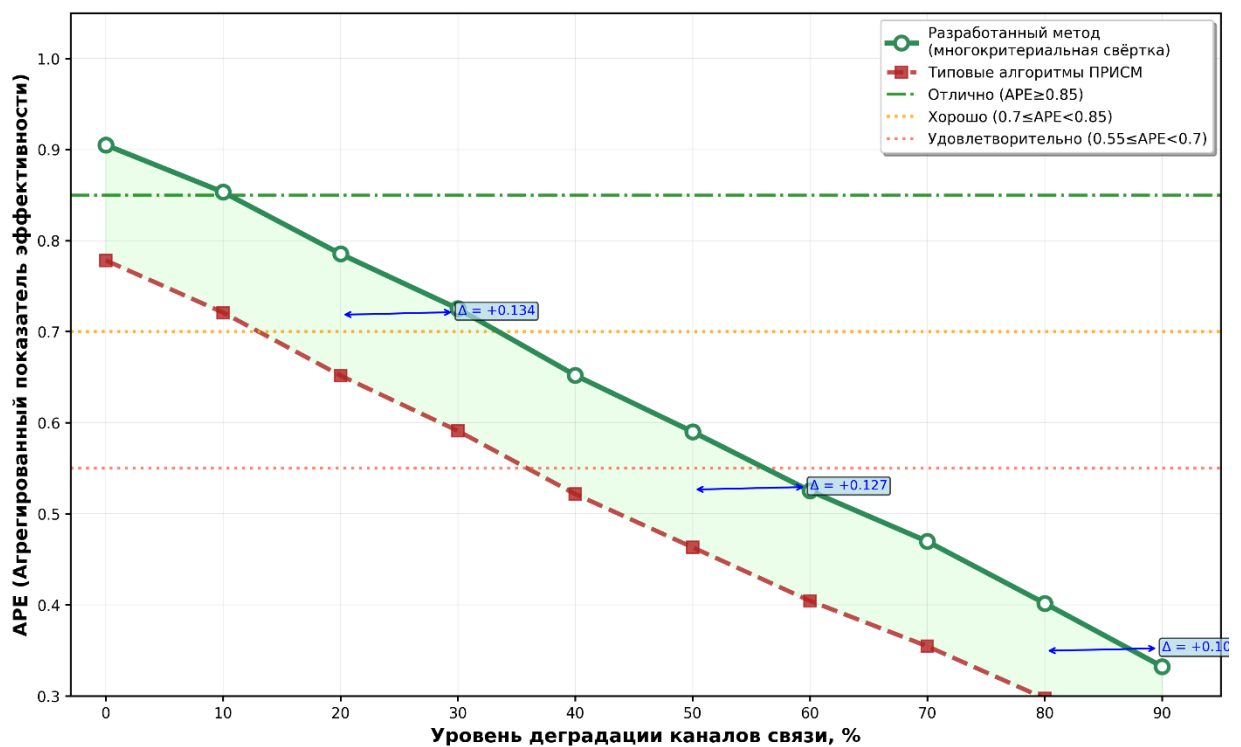
На рисунке 6.11 представлен сравнительный анализ динамики АТІ при структурных отказах системы и применении известных алгоритмов в составе метода реконфигурирования СДСС НПМ БР. На рисунке 6.12 представлена динамика КРЕ при функциональной деградации каналов связи. Примечательно, что даже при 90% ухудшении каналов связи, СДСС НПМ БР работает неудовлетворительно ($КРЕ < 0,55$), но продолжает функционировать ($КРЕ > 0,3$).

На рисунке 6.13 представлены результаты сравнения времени реконфигурирования системы известным методом и новым методом реконфигурирования в условиях деструктивных воздействий [421; 422]. В зависимости от доли отказов элементов системы, метод реконфигурирования, разработанный в диссертации, показывает улучшенные характеристики (ускорение) от 14,8% до 35,4%.



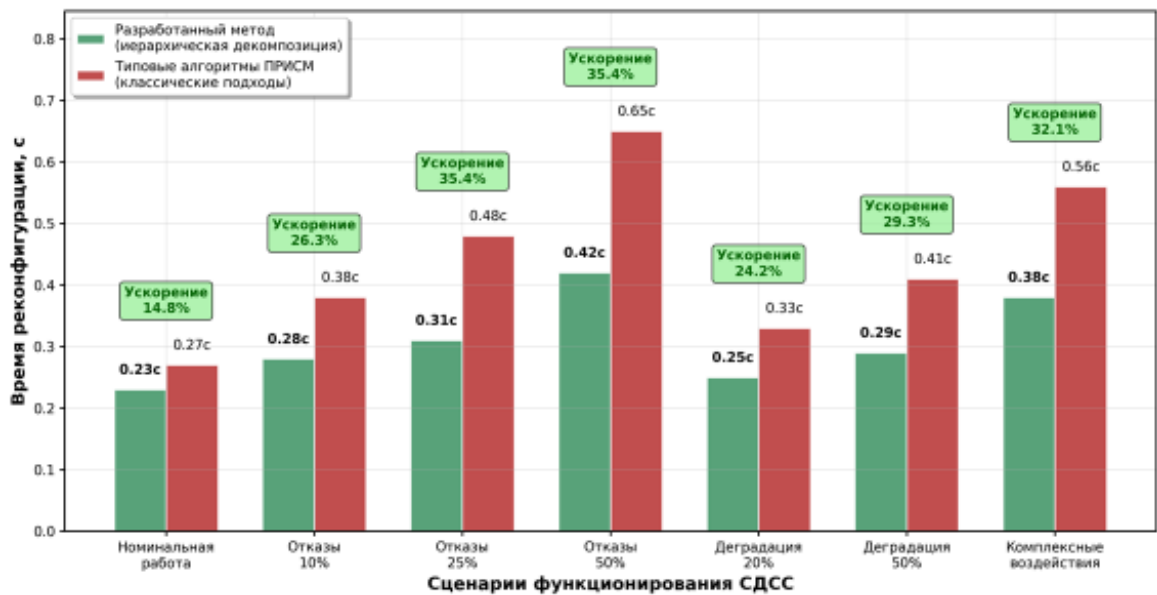
Источник: составлено автором.

Рисунок 6.11 – Динамика ATI при структурных отказах системы



Источник: составлено автором.

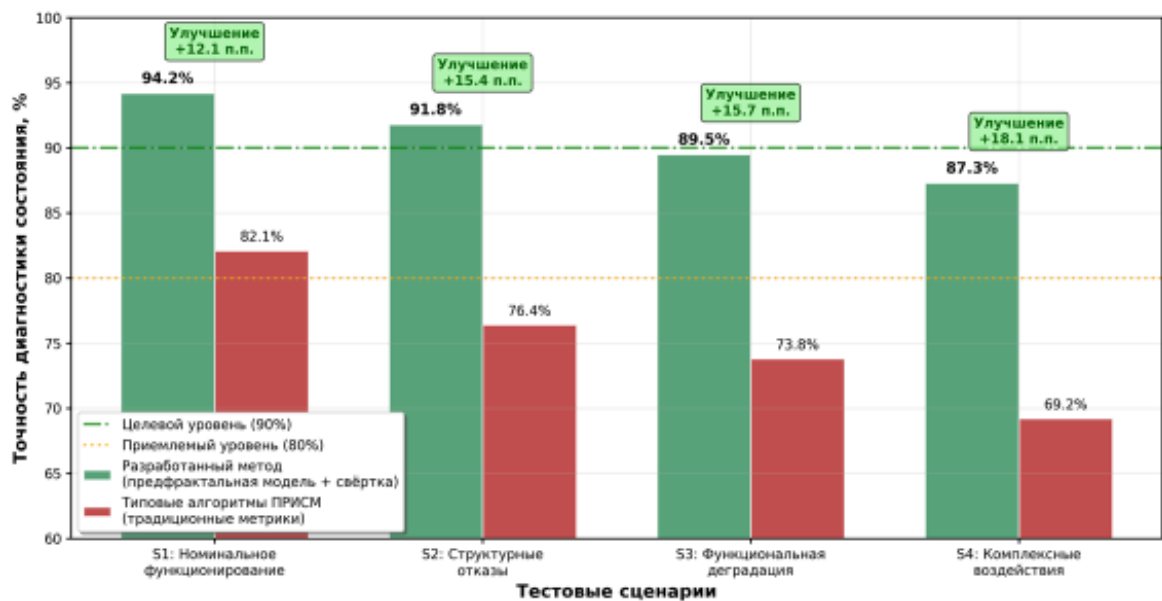
Рисунок 6.12 – Динамика APE при функциональной деградации каналов связи



Источник: составлено автором.

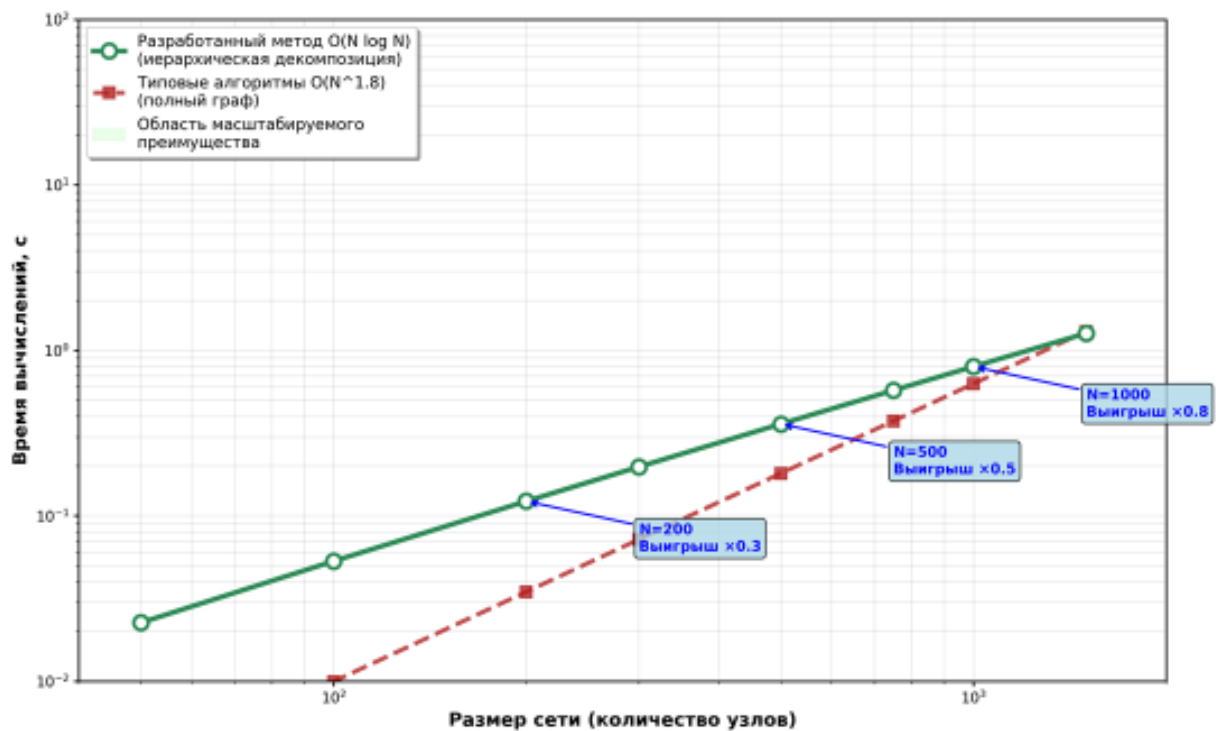
Рисунок 6.13 – Сравнительный анализ реконфигурации системы в условиях деструктивных воздействий

На рисунке 6.14 представлены результаты сравнения оценки состояния системы известным методом [423; 424] и новым методом реконфигурирования, разработанным в диссертации, при различных режимах функционирования системы. В зависимости от режима функционирования системы, новый метод реконфигурирования показывает улучшенные характеристики оценки (точность диагностики) от 12,1 до 18,1 процентных пунктов.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.14 – Сравнительный анализ оценки состояния системы при различных режимах функционирования системы



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.15 – Сравнительный оценки состояния системы при различных режимах функционирования системы

Как видно на рисунке 6.15, время вычислений нового метода реконфигурирования растет с меньшей скоростью по сравнению с типовым методом (известными алгоритмами). На пороге 1000 узлов прямая зависимости нового метода реконфигурирования (зеленого цвета) пересекает прямую типовых алгоритмов.

Оценка оперативности принятия решений о реконфигурировании структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности при сохранении структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий включает три компоненты (6.13) [425; 426]:

$$T_{\text{общее}} = T_{\text{обнаружение}} + T_{\text{анализ}} + T_{\text{реконфиг}}, \quad (6.13)$$

где $T_{\text{обнаружение}}$ – время обнаружения деструктивного воздействия;

$T_{\text{анализ}}$ – время аналитической обработки и оценки состояния;

$T_{\text{реконфиг}}$ – время реконфигурирования.

Ниже представлены результаты экспериментов по каждой компоненте.

Время обнаружения $T_{\text{обнаружение}}$.

Повышение показателя на 12,2% достигнуто благодаря:

- адаптивному расчёту метрик вместо полного пересчёта;
- применению адаптивных пороговых значений, которые срабатывают ближе к границе допустимой деградации [427; 428];
- распараллеливание процесса сбора данных с различных источников мониторинга.

Время аналитической обработки и оценки состояния $T_{\text{анализ}}$.

Повышение показателя на 20,4% объясняется:

- использованием предфрактальной структуры графа, позволяющей локализовать область анализа;
- кэшированием промежуточных вычислений топологических метрик;
- применением быстрых эвристик классификации типа воздействия.

Время реконфигурирования $T_{\text{реконфиг}}$.

Повышение показателя на 32,3% достигнуто за счёт:

- использования многокритериального анализа вместо последовательного перебора вариантов;
- применения метода Парето-оптимальности для быстрого исключения неперспективных вариантов реконфигурации [429; 430];
- сокращения пространства поиска благодаря иерархической структуре системы управления.

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

6.3 Прикладные задачи реконфигурирования структурно-динамических сетевых систем непрерывного пространственного мониторинга большой размерности

Анализ современных практик показывает, что системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности применяются в

широком спектре критически важных областей, каждая из которых предъявляет специфические требования к архитектуре и параметрам сетевой инфраструктуры.

Экологический мониторинг характеризуется необходимостью развертывания сенсорных сетей на обширных территориях с переменной плотностью датчиков в зависимости от уровня экологических рисков. Типичные системы включают от 500 до 5000 узлов различных типов, размещенных на территориях от нескольких квадратных километров до региональных или федеральных масштабов. Критическими параметрами являются энергоэффективность, устойчивость к внешним воздействиям и способность к самоорганизации и динамической реконфигурации топологии при частичных отказах оборудования.

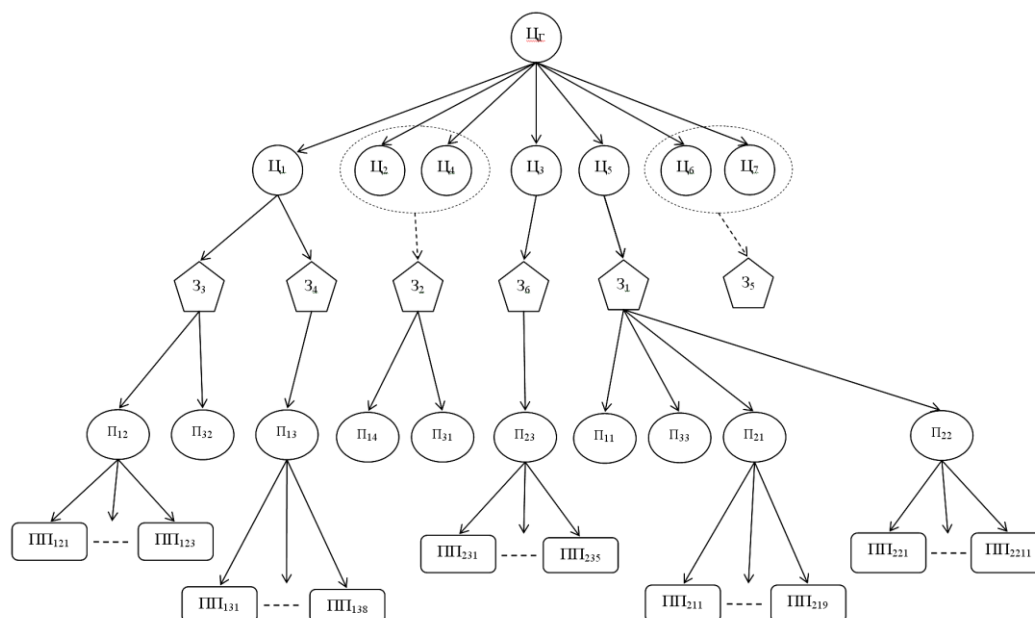
Транспортные системы характеризуются высокой динамичностью топологии и необходимостью обработки больших объемов данных в режиме реального времени. Интеллектуальные транспортные системы включают от 700 до 6000 и более узлов различного функционального назначения, требующих адаптивного управления пропускной способностью и динамической маршрутизации информационных потоков.

Промышленная безопасность требует высокой надежности и минимальных задержек в передаче критически важной информации. Системы мониторинга промышленных объектов обычно включают 150-450 узлов с требованиями к временным характеристикам и отказоустойчивости. Особое значение имеет способность системы к быстрой реконфигурации при аварийных ситуациях и обеспечение гарантированной доставки пакетов данных (сигналов тревоги и др.).

Структурно-динамическая сетевая система мониторинга за целевыми программами социально-экономического развития

Прогнозы развития страны разрабатываются в нескольких вариантах с учетом воздействия внутренних и внешних факторов [431]. Целевая программа является неотъемлемой частью планово-прогнозной системы, а

формализованное представление представляет собой дерево целей, задач и мероприятий. На рисунке 6.16 представлено дерево городской целевой программы «Электронная Москва» (2009-2011 гг.).



Источник: составлено автором.

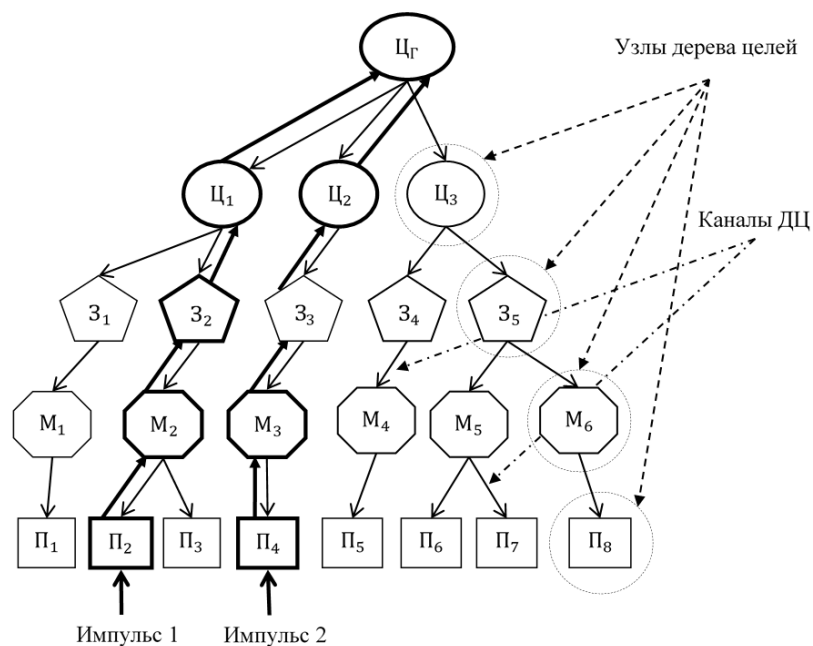
Рисунок 6.16 – Дерево целей городской целевой программы «Электронная Москва»

Формализованное представление целевой программы дает возможность эффективно контролировать и отслеживать ее реализацию в режиме реального времени [432; 433]. Дерево представляется в виде графа конфигурации с информационными потоками. Каждая вершина является узлом, через который проходит импульс, а ребра представляют собой каналы, указывающие направление потоков от одного узла до другого.

На рисунке 6.17 можно видеть, как импульс, поданный на элемент Π_2 , проходит по цепочке узлов M_2 , Z_2 , Π_1 до верхнего узла Π_G системы.

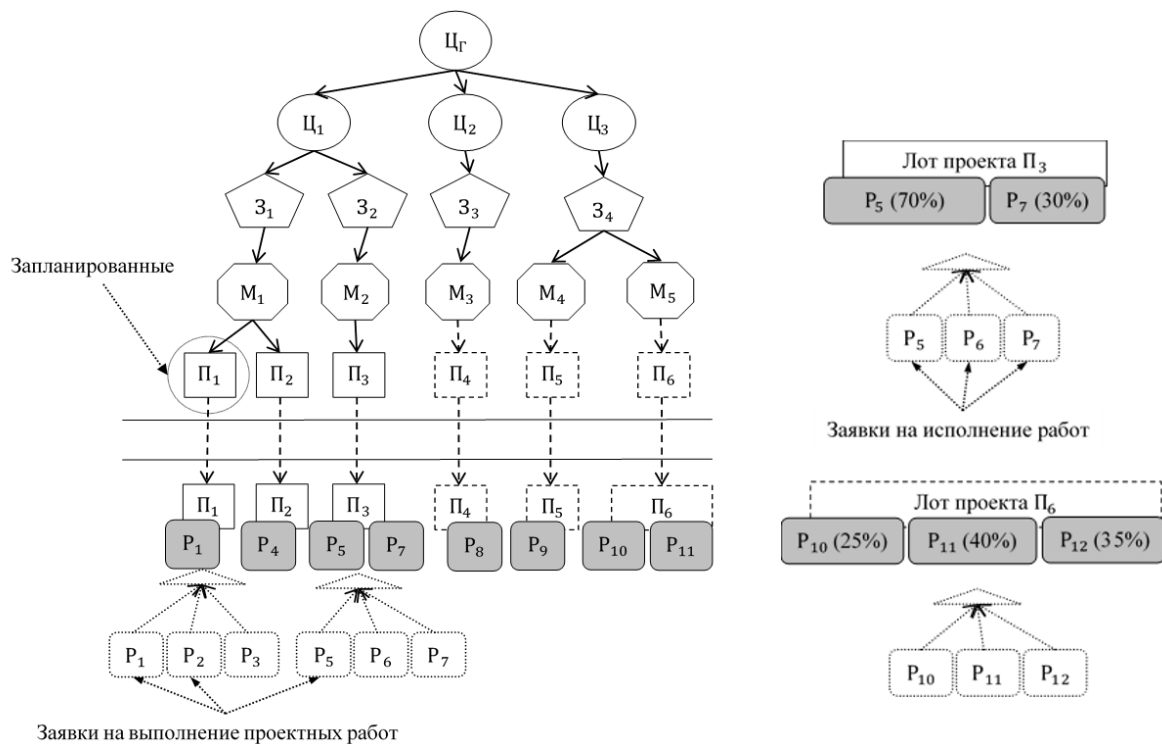
На нижнем уровне находятся проекты, на выполнение которых подаются заявки. Для некоторых мероприятий проекты и потенциальные исполнители известны еще на этапе разработки программы. Так на рисунке 6.18 для мероприятий M_1 и M_2 уже сформулированы задания на проектирование и, более того, уже поступили заявки на выполнение конкретных проектных работ. В тоже время по проектным заданиям мероприятий M_3 , M_4 и M_5 исполнителей еще нет. В данном случае необходима

реконфигурация системы, а точнее конфигурирование в части завершения графа конфигурации системы.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.17 – Информационные потоки дерева целей

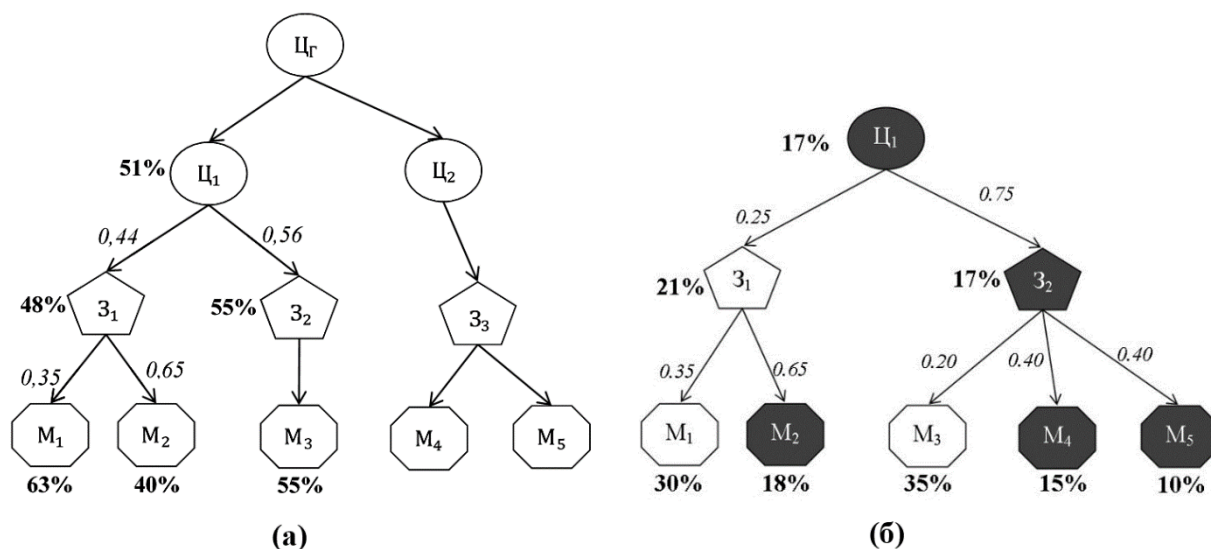


Источник: составлено автором.

Рисунок 6.18 – Покрытие мероприятий программы проектами

Реальные проекты отбираются на конкурсной основе среди исполнителей. На исполнение проекта Π_1 подаются заявки от возможных исполнителей на три проектные работы (реальные работы) P_1 , P_2 и P_3 . По каждому потенциальному проекту формируется «лот», в котором указаны условия для проводимых работ. Поступающие заявки от потенциальных исполнителей сравниваются с условиями лота, и определяется степень «покрытия», содержащимися в заявке предложениями, условий лота. Лот проекта Π_3 покрывается двумя заявками P_5 и P_7 , при этом степень покрытия лота заявкой P_5 – 70%, а P_7 – 30%. Это говорит о том, что в результате завершения исполнения работы P_5 , проект Π_3 будет исполнен только на 70% или по-другому на 0,7 части от общего объема.

Оценка корневой вершины, то есть достижение главной цели, представляет собой агрегированный показатель результативности всей программы [434; 435]. На рисунке 6.19 (а) представлено дерево целей, около каждой стрелки приводятся весовые коэффициенты, определяющие степень важности нижних элементов для достижения верхних. Мероприятие M_1 выполнено на 63%, а мероприятие M_2 на 40%. По направлению M_1 задача решена на 22% ($63 \cdot 0,35$), а по направлению M_2 на 26% ($40 \cdot 0,65$), тогда задача Z_1 решена на 48%, а цель первого уровня Π_1 достигнута на 51%.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.19 – Определение степени достижения целей соответствует оценке состояния отдельных узлов системы и корневой узла как всей системы

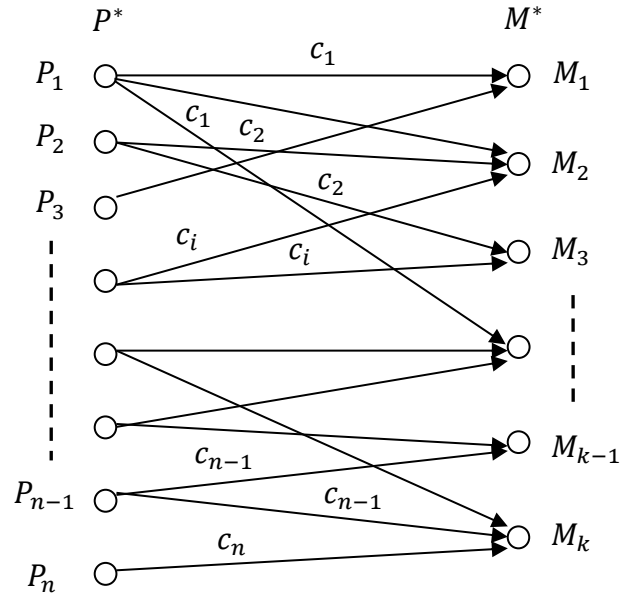
Элемент дерева целей называется *дефектным*, если элемент оценивается как «не выполнен» (менее 20%) [436; 437]. Порог 20% может быть изменен в результате экспертных оценок. На рисунке 6.19 (б) дефектность двух мероприятий M_4 и M_5 приводит к дефектности задачи Z_2 , в результате цель C_1 также становится дефектной, то есть не выполняется.

Одной из важных проблем в процессе реализации программы является проблема подключения проектов. Требуется реконфигурировать систему в части оптимизации подключения новых узлов к графу конфигурации. Сформулируем математическую постановку задачи отбора проектов. Все множество мероприятий M разбивается на группы, мероприятия определяется параметрами: q – стоимость проекта, s – трудовые ресурсы, t – время исполнения мероприятия. В группу $M^l(q, s, t)$ входят мероприятия $M_i^l(q_i, s_i, t_i)$. Таким образом, имеется разбиение множества M на подмножества M^l , $l = 1, 2, \dots, L$. Множество проектов P разбивается на подмножества P^l так, чтобы каждое подмножество проектов можно было бы поставить в соответствие одному из подмножеств мероприятий. Рассмотрим одну группу мероприятий и соответствующую ей группу проектов – M^* и P^* . Каждый проект из P^* соединяется с теми мероприятиями из M^* , к которым он потенциально подходит. Например, проект постройки дорог может быть присоединен к мероприятиям по строительству автомагистралей, мостов, ремонт городских дорог и т.д.

Каждому ребру графа G^* назначается соответствующий вес (стоимость проекта) c_i . Отметим, что стоимость проекта c_i не означает денежную, либо какую-нибудь другую стоимость, а является совокупной стоимостью, состоящей из стоимостей различного вида. Веса ребер, исходящих из одного и того же проекта равны.

Выбирая для каждой вершины P_i наилучшее ребро, получим максимальное паросочетание двудольного ориентированного графа G^* . На рисунке 6.20 представлен ориентированный двудольный граф G^* . Задача оптимального назначения проектов сводится к выделению максимального

паросочетания двудольного ориентированного графа. В случае, когда $n = k$ и для каждого мероприятия существует хотя бы один альтернативный проект, то есть в каждую вершину M_j входит не менее одного ребра, решением будет совершенное паросочетание.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.20 – Взвешенный двудольный граф G^*

Таким образом, для каждой пары – группа мероприятий M^l и группа проектов P^l задается двудольный граф G^l , $l = 1, 2, \dots, L$ на конкретный момент времени. Далее на каждый момент времени t задается своя последовательность двудольных графов G_t^l . И в каждый момент t решается задача выделения максимальных паросочетаний для всех двудольных графов G_t^l для $l = 1, 2, \dots, L$.

Предлагается многокритериальная постановка задачи о назначениях на предфрактальном графе $G_L = (V_L, E_L)$ порожденном двудольной затравкой $H = (W', W'', Q)$. Покрытием графа G_L является остовный лес $x = (V_L, E_x) = \{D_k\}$, $E_x \subseteq E_L$, где каждая компонента D_k является деревом. Всевозможные покрытия x образуют множество допустимых решений $X = X(G_L) = \{x\}$, на котором задается векторно-целевой функция (6.14-6.18):

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x), F_4(x)), \quad (6.14)$$

$$F_1(x) = \sum_{e \in E_x} w(e) \rightarrow \min, \quad (6.15)$$

$$F_2(x) = |x| \rightarrow \min, \quad (6.16)$$

$$F_3(x) = \deg D_k \rightarrow \min, \quad (6.17)$$

$$F_4(x) = |D_k| \rightarrow \min, \quad (6.18)$$

где $\sum_{e \in E_x} w(e)$ – суммарный вес покрытия x ;

$|x|$ – число компонент в покрытии x ;

$\deg D_k = \max_{v \in D_k} \deg v$ – степень компоненты D_k в покрытии x ;

$|D_k|$ – число вершин компоненты D_k в покрытии x .

В процессе реализации целевой программы и изменения ее текущего состояния динамически оптимизируются структура системы, что свидетельствует об эффективности метода реконфигурирования в части методики оптимизации структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности.

Структурно-динамическая сетевая система мониторинга за распространением эпидемических процессов

Эпидемический процесс заключается в непрерывной передаче заболевания или вируса от агента к агенту популяции [438-441]. Процессы пространственного распространения эпидемий называют *инфекционной динамикой* [442].

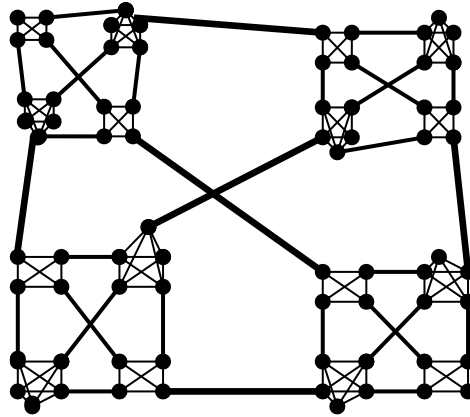
Сеть представляет собой систему, объектами является множество *агентов* и заданное на нем множество *связей* [443; 444]. Сеть представляет собой предфрактальный граф $G_L = (V_L, E_L)$, порожденный множеством полных затравок $H = \{H\}$. На рисунке 6.21 представлена сеть взаимодействия агентов на примере четырех-подъездного многоквартирного дома.

Для описания уровня иммунитета (иммунологического статуса) каждого агента, вершинам $v_i \in V_L$ присваивается число $w_1(v_i)$ по следующему правилу:

$w_1(v_i) = 0$ – агент не подвержен заболеванию;

$w_1(v_i) = 1$ – агент обязательно будет инфицирован при непосредственном контакте с зараженным;

$w_1(v_i) = p$ – агент подвержен заболеванию с вероятностью p , $0 < p < 1$ при непосредственном контакте с зараженным.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.21 – Граф G_3 порожден двумя полными затравками: H_1 и H_2

Все агенты сети в каждый момент времени находятся в одном из двух состояний: инфицирован и передает заболевание; не инфицирован. То есть, каждой вершине присваивается второй вес $w_2(v_i)$ со значением булевой переменной: 1 – инфицирован; 0 – не инфицирован.

При моделировании процесса инфицирования ключевым значением является «эпидемический порог» ε_{per} – вероятность заражения смежного агента. Далее считаем, что если агент подвержен заболеванию с вероятностью большей или равной ε_{per} , то при контакте с зараженным он переходит в состояние «инфицирован». Если меньшей ε_{per} , тогда в состояние «не инфицирован».

Условиями для применения карантина считается ситуация при которой процент инфицированных агентов на затравке превышает пороговое значение ε_{per} . В качестве карантинной меры применяется процедура блокирования всех ребер, инцидентных вершинам зараженной подграф-затравки.

Рассматриваются две противоположных меры: сохранение живучести

среды распространения инфекции или по-другому недопущение превышения порогового значения заболеваемости в популяции агентов; разрушение процесса распространения инфекции – разрушение соответствующего предфрактального графа, отражающего процесс распространения.

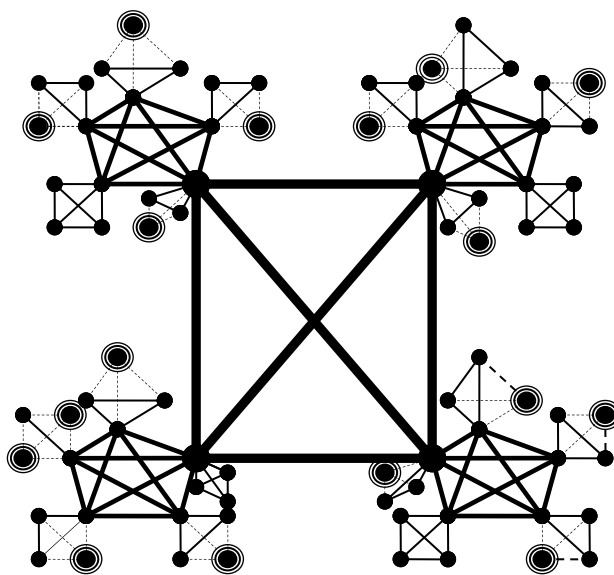
Выделяют следующие критерии оценки «живучести» и разрушения систем [443]:

1) *Критерий связности* $F_1(k)$: система выходит из строя при нарушении связности графа после удаления k вершин.

2) *Компонентный критерий* $F_2(k, m)$: система выходит из строя, если после удаления k вершин количество компонент связности графа достигает значения не меньше m .

3) *Диаметральный критерий* $F_3(k, d)$: система выходит из строя, если после удаления k вершин диаметр хотя бы одной компоненты графа становится меньше значения d .

На рисунке 6.22 изображена сеть взаимодействия агентов в виде предфрактального графа G_3 , порожденного двумя полными затравками при сохранении смежности старых ребер. Очаги заражения размещены в вершинах 3-го ранга. Пунктирными линиями выделены ребра звезд с корнями в очагах заражения.



Источник: составлено автором.

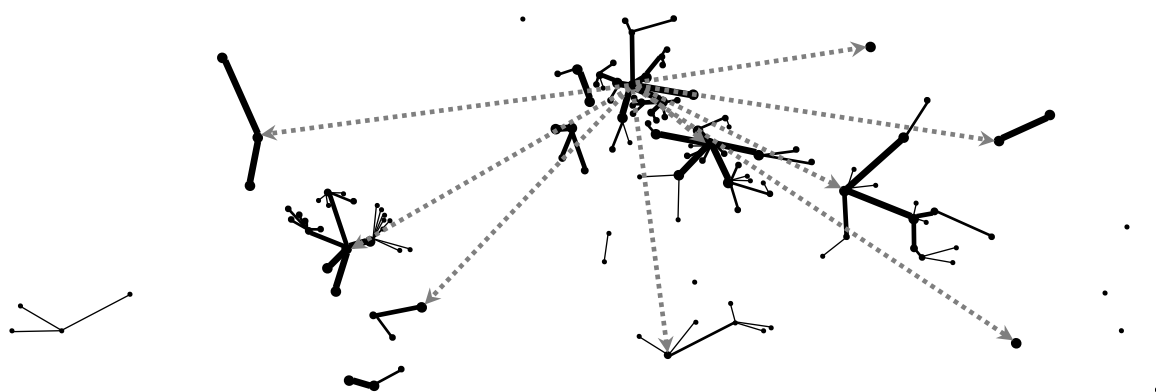
Рисунок 6.22 – Сеть взаимодействия агентов G_3

На рисунке 6.23 изображен эпидемический процесс пандемии гриппа H1N1 в 2009 году в виде покрытия предфрактального графа G_4 звездами.

Можно предположить следующие гипотезы.

1) Поскольку вершины, размещенные в странах Европейского союза, инцидентны ребрам разного ранга, то первичным очагом заражения может быть именно эта территория. Пунктирными стрелками отмечен источник распространения.

2) Плотность размещения вершин и количество вершин со многими инцидентными ребрами может означать низкую защищенность населения от инфекционных заболеваний.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.23 – Покрытие предфрактального графа G_4 звездами

Предложенный в рамках данной диссертации научно-методический аппарат системы мониторинга распространения эпидемий в реальном времени позволяет оперативно принимать меры противодействия.

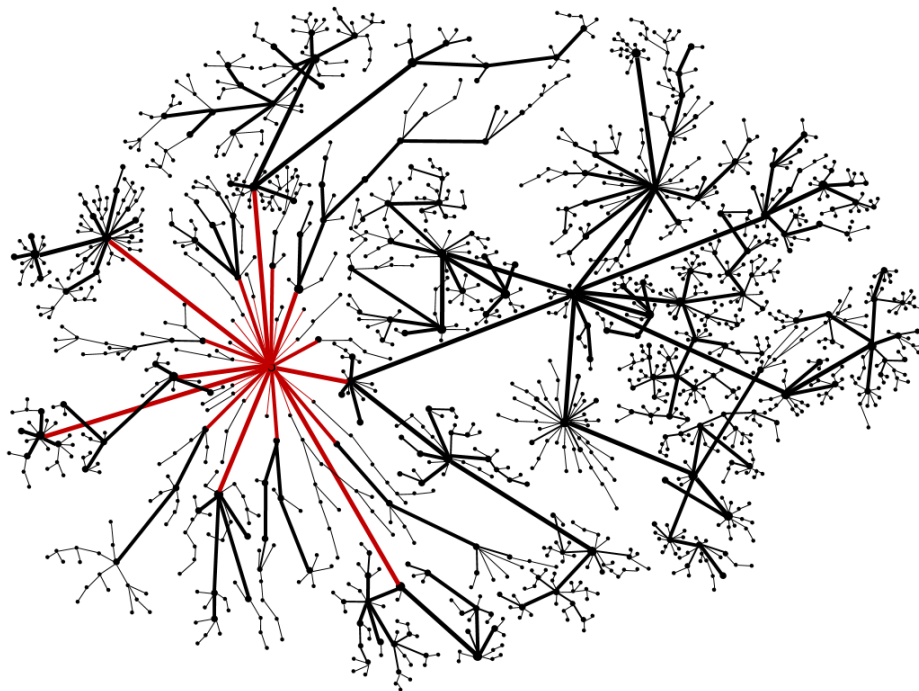
Топологическая структурно-динамическая сетевая система мониторинга за крупномасштабной телекоммуникационной сетью

В мире насчитывается порядка 30 крупнейших телекоммуникационных компаний, обеспечивающих всю сетевую инфраструктуру для функционирования сети Интернет – AT&T, China Telecom, Bell Canada, Singapore Communications, Deutsche Telekom и др. Инфраструктура глобальных операторов связана между собой быстрыми оптоволоконными каналами связи, порядка 1-20 Тбит/с. Помимо пропускной способности,

каждый канал связи обладает другими важными характеристиками: помехозащищенностью и объемом [445].

Операторы связи представлены коммутационными узлами, которые определим в качестве вершин, а каналы связи – в качестве ребер. Предфрактальные графы $G_1, G_2, \dots, G_5$ порождаются путем замещения вершин деревьями, в частном случае звездами. При этом смежность старых ребер преимущественно сохраняется [446; 447]. Но замещению подвергаются не все вершины, а по принципу технической целесообразности.

На рисунке 6.24 изображен предфрактальный граф G_4 , покрывающий инфраструктурную карту сети Интернет. Граф G_1 состоит из 30 коммутационных узлов и связей между ними. Красным цветом выделен важный узел коммутации и каналы связи с ним.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6.24 – Граф G_4 , порожденный множеством затравок-лесов

Топологическая структурно-динамическая сетевая система мониторинга сети Интернет представляется предфрактальным графом, порожденным множеством затравок. При этом важно учесть следующие параметры. Скорость передачи данных (каналы связи) между узлами в сетях

высокого уровня больше, чем в сетях низкого уровня. Ребрам предфрактального графа $G_l = (V_l, E_l)$, $l = 1, 2, \dots, L$ присвоены веса, уменьшающиеся на коэффициент пропорциональности от верхнего ранга к нижнему.

Каждый компьютер в сети (либо сервер в коммутационном узле) может находиться в нескольких состояниях, быть: зараженным; уязвимым для заражения; неподверженным вирусу [448; 449]. Степень уязвимости зависит от уровня защищенности, как аппаратной, так и программной. В качестве программной защиты выступает антивирусное программное обеспечение. В таблице 6.6 представлен рейтинг антивирусных программ за 2014 год. Нормируя значения столбца «Оценка» в шкалу отрезка $[0; 1]$, получим веса вершин $w(v)$, где $0 \leq w(v) \leq 1$.

Текущее состояние узла связи (агента) описывается двумя величинами (весаами):

- 1) $w_1(v) = \begin{cases} 1, \text{узел связи заражен;} \\ 0, \text{узел связи не заражен;} \end{cases}$
- 2) $w_2(v) = \begin{cases} 1, \text{узел связи гарантировано подвержен заражению;} \\ 0, \text{узел связи гарантировано не подвержен заражению;} \\ p, \text{узел связи подвержен заражению с вероятностью } p. \end{cases}$

Вероятность заражения задается в пределах $0 < p < 1$.

Таблица 6.6 – Данные рейтинга антивирусов COMSS.TV за 2014 год

Антивирусные программы	Обнаружение	Динамика	Веб-защита	Самозащита	Оценка
Qihoo 360 Internet Security 2014	98.1%	100%	100%	50%	9.2
Kaspersky Internet Security 2014	98.1%	98.1%	98.1%	98.1%	9.1
G Data InternetSecurity 2014	97.0%	97.0%	97.0%	97.0%	9.0
Emsisoft Internet Security Pack 8	92.4%	92.4%	92.4%	92.4%	8.9
Bitdefender Antivirus Free Edition	97.0%	97.0%	97.0%	97.0%	8.7
McAfee Internet Security 2014	92.4%	92.4%	92.4%	92.4%	8.5
Norton Internet Security 2014	98.1%	98.1%	98.1%	98.1%	8.2
avast! Internet Security 2014	92.4%	92.4%	92.4%	92.4%	7.9
TrustPort Internet Security 2014	98.1%	98.1%	98.1%	98.1%	7.8
Ad-Aware PRO Security 11	97.0%	97.0%	97.0%	97.0%	7.6
Avira Internet Security Suite 2014	92.4%	92.4%	92.4%	92.4%	7.5
Comodo Internet Security Premium 6.3	98.1%	98.1%	98.1%	98.1%	7.3
ESET NOD32 Smart Security 7	97.0%	97.0%	97.0%	97.0%	7.2

Источник: <http://www.comss.ru/page.php?id=2000>.

Взаимодействие двух узлов связи (агентов) представляется следующим образом [450; 451]. Узел связи может быть заражен вирусом, либо нет: $w_1(v)$, уровень защиты описывается вторым весом $w_2(v)$. Ниже представлена арифметика взаимодействия двух агентов и состояния, соответствующие исходам:

Заражен	Не заражен
$1 \cdot 0 = 0;$	$0 \cdot 0 = 0;$
$1 \cdot 1 = 1;$	$0 \cdot 1 = 0;$
$1 \cdot p = p;$	$0 \cdot p = 0.$

Для повышения точности модели можно увеличить количество состояний, добавив в качестве подверженности заражению вирусом весовой параметр «Самозащита», можно ввести новое состояние – «переносчик» вируса.

На рисунке 6.24 красным цветом выделены ребра, по которым может быть передан вирус от инфицированной вершины. В качестве инфицированной вершины выбран первичный узел оператора связи Verizon. В соответствие с моделью скорость заражения агентов сети пропорциональна длине гамильтонова пути на моделирующем участке графа.

Метод реконфигурирования в данном случае используется в качестве выделения наиболее уязвимых узлов системы и оптимизации как отдельных сегментов, так и всей сети с целью повышения структурно-функциональной устойчивости и предупреждения различных сценариев деструктивных воздействий, как естественного, так и преднамеренного характера [452; 453].

Структурно-динамическая сетевая система мониторинга процесса разрушения транспортно-логистической системы

Рассматривается полный граф $G = (V, E)$, $\{v \in V\}$, $\{e \in E\}$. Ребро, соединяющее v_i и v_j , обозначается как e_{ij} . Выделяется два типа вершин $\{v^1 \in V^1\}$ и $\{v^2 \in V^2\}$, где $V^1 \cap V^2 = \emptyset$, $V^1 \cup V^2 = V$. Под вершинами *первого типа* $\{v^1\}$ понимаются вершины, соответствующие важным узлам. Остальные вершины $\{v^2\}$ называются вершинами *второго типа* [454]. Стоит отметить, что две вершины v_i^1 и v_j^2 в общем случае могут быть соединены несколькими

кратными ребрами $\{e_{12}^1, e_{12}^2, \dots\}$. Важнейшими характеристиками транспортно-логистических систем являются вес и пропускная способность.

Изначально требуется нахождение оптимального решения комбинированной задачи (оптимизируются и потоки, и маршруты). В таком случае необходимо задание начальных условий (x, y) . В данном случае x – совокупность признаков, отвечающих критерию оптимизации для каждого ребра. Для каждого конкретного ребра e_{ij} распределение x_{ij} представляет из себя двумерную матрицу, где каждому элементу задачи (множество которых всегда счетно) ставится в соответствие вектор признаков оптимизации. Поскольку множество ребер $\{e_{ij}\}$ также удобно записывать в виде двумерной матрицы, x представляет из себя четырехмерную матрицу, каждый элемент которой x_{ijmp} представляет из себя p -й признак m -го элемента задачи для ребра e_{ij} .

Отдельно рассматривается совокупность пропускных способностей ребер y . Здесь каждому ребру e_{ij} для каждого элемента задачи ставится в соответствие единственная пропускная способность. Таким образом, y представляет собой трехмерную матрицу. Следует отметить важную особенность решения транспортно-логистических задач, где учитываются также пропускные способности вершин. Любой путь, содержащий вершину v_i , должен включать в себя петлю, инцидентную этой вершине. Таким образом, множество ребер полного графа с N вершинами имеет порядок не $N(N-1)/2$, а уже $N^2/2$.

Начальные условия (x, y) удобно представлять в виде одной матрицы I [455]. Матрица I представляет собой четырехмерную матрицу, состоящую из элементов I_{ijmp} , где $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, $p = \overline{1, (P+1)}$. Индексы i и j служат для задания ребер (в том числе и петель), m – элемента задачи, для которого на данном ребре определяется один из признаков, определяемых индексом p . Таким образом, вместо совокупности начальных условий для задач первой и второй групп (x, y) происходит переход к рассмотрению матрицы начальных условий I .

Рассматривается транспортно-логистическая задача, условие которой представляется в виде полного графа G . Начальные условия задаются матрицей I , поток элементов задачи представляется в виде $\vec{f}$. При задании условий каждой задачи, рассматривается множество из M элементов задачи, соответствующих объектам, на доставку которых ориентирована транспортно-логистическая задача. Для элементов задачи определяется набор из P признаков – весовых коэффициентов ребер графа, важных для решения задачи оптимизации пути. Для каждой задачи рассматривается поток элементов задачи f , задающий численные значения, соответствующие каждому элементу задачи. Для одного элемента задачи было удобно рассматривать две оптимизационные функции $f(x)$ и $g(y)$ – отдельно и/или в совокупности. После осуществления перехода к представлению начальных условий в виде матрицы I , критерий оптимизации может быть записан как $Z(I, f)$, а задача будет представляться в виде $Z(I, f) \rightarrow opt$. В частных задачах оптимизация проводится на $\min$ или $\max$ в зависимости от постановки – минимизации или максимизации потока.

Сравнение решений между собой подразумевает не $Z(I, f)$, а $Z(s)$. Тогда оптимальное решение s_{opt} соответствует максимальному значению критерия оптимизации $Z_{opt} = Z(s_{opt})$. Кроме того, s_{opt} будет соответствовать решению задачи $Z(I, f) \rightarrow opt$. В таком случае эффективность каждого решения может быть сравнена с эталонным при помощи вычисления коэффициента эффективности $k_{эфф} = \frac{Z(s)}{Z_{opt}}$. Аналогичным образом можно сравнить любые 2 решения.

Следующим шагом является исследование решений на ней транспортно-логистических задач для определенных элементов системы.

Показателем уровня просачиваемости (коэффициентом просачиваемости) $k_{пр}$ называется отношение количества потоковых путей V_P количеству потоковых цепей V_S : $k_{пр} = \frac{|V_P|}{|V_S|}$. При отличном от нуля коэффициенте просачиваемости на графе можно выделить хотя бы один

поточковый путь. При коэффициенте равном единице, потоки продвигаются до всех стоков, то есть до всех конечных пунктов назначения.

Одним из достоинств разработанного метода реконфигурирования является его эффективность при решении задачи сохранения устойчивости к структурным разрушениям в условиях деструктивных воздействий. Понятие структурного разрушения графовой структуры определяется как совокупность элементарных действий удаления вершин и ребер графа. Любые структурные изменения влекут за собой изменение матрицы I . Реберная структура графа G не изменится, он по-прежнему останется полным, изменятся только веса ребер, а значит, значения матрицы I . Соответствие элементарных структурных изменений модификациям матрицы I представлено в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Соответствие структурных изменений изменениям матрицы смежности

№	Структурное изменение	Соответствующее изменение I
1	Удаление вершины v_i	Изменение всех значений I_{ijmp} на 0 или ∞ в зависимости от смысла соответствующего значения p
2	Добавление вершины v_i	Изменение всех значений I_{ijmp} (с 0 или ∞ в зависимости от смысла соответствующего значения p) на актуальные.
3	Удаление ребра e_{ij}	Изменение значений I_{ijmp} на 0 или ∞ в зависимости от смысла соответствующего значения p
4	Добавление ребра e_{ij}	Изменение значений I_{ijmp} с 0 или ∞ (в зависимости от смысла соответствующего значения p) на актуальные значения
5	Изменение пропускной способности ребра e_{ij}	Изменение значений I_{ijmp} (на соответствующее)
6	Изменение векторного веса ребра e_{ij}	Изменение значений I_{ijmp} (на соответствующее)

Источник: составлено автором.

В результате изменения структуры происходит изменение как в принципе всего множества решений $\{s\}$, так и оптимального решения s_{opt} с точки зрения того же критерия $Z(s)$. Интерес представляет именно оптимальное решение и его изменение. Соответственно, можно обозначить текущее оптимальное решение как s_1 . В таком случае если после структурного изменения оптимальное решение изменилось на s_2 , можно говорить о влиянии такого структурного изменения. Влияние оценивается коэффициентом

влияния, аналогичным коэффициенту эффективности решения: $k_{\text{вл}} = \frac{Z(s_2)}{Z(s_1)}$. В общем случае $k_{\text{вл}}$ принимает значения в интервале $[0, +\infty)$. Однако при рассмотрении процессов структурного разрушения, величина $Z(s_2)$ не может превысить $Z(s_1)$, а значит значения $k_{\text{вл}} \in [0, 1]$. Деструктивные воздействия могут приводить к изменению только веса ребер, но называть их процессами строго структурного разрушения некорректно. В таком случае можно судить о значимости того или иного процесса структурного разрушения по значению коэффициента $k_{\text{вл}}$. Если значение лежит в пределах допустимых норм, можно говорить о структурной устойчивости системы по отношению к соответствующему процессу разрушения.

Таким образом, метод реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности, теоретико-графовая модель и агрегированный топологический индекс оценки состояния системы, а также программно-алгоритмический комплекс в совокупности позволяют управлять моделируемой системой, в том числе оценивать ее текущее состояние посредством комплексного показателя, осуществлять реконфигурирование в случае снижения заданных пределов ее параметров.

Выводы к главе 6

В настоящей главе исследована эффективность метода реконфигурирования СДСС НПМ БР, отличающегося от известных: построением начального графа конфигурации в соответствии с заданными требованиями; формированием агрегированного топологического индекса текущего графа конфигурации; реконфигурированием графа конфигурации в условиях деструктивных воздействий.

В частности, получены следующие результаты.

1) Проведены вычислительные эксперименты, результаты которых наглядно показывают повышение оперативности принятия решений о реконфигурации СДСС НПМ БР с сохранением их структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий.

Разработанный метод обеспечивает комплексное сокращение времени реагирования системы на деструктивные воздействия за счет оптимизации всех трех временных компонент: обнаружения воздействия (улучшение на 12,2%), аналитической обработки и оценки состояния (улучшение на 20,4%), собственно реконфигурации системы (улучшение на 32,3%).

2) Разработана система критериев оценки эффективности, включающая три взаимодополняющих группы показателей: структурно-функциональные критерии (устойчивость F_1 , целостность данных F_2 , живучесть системы F_3), вычислительные критерии (временная сложность F_4 , пространственная сложность F_5 , масштабируемость F_6) и качественные критерии (точность расчета агрегированного топологического индекса F_7). Введение комплексного показателя эффективности (КПЭ) с весовыми коэффициентами, обеспечивает количественную оценку и объективное сравнение альтернативных методов реконфигурации.

3) Определены и исследованы три ортогональных класса воздействий, образующих полный базис для оценки разработанного метода реконфигурации: номинальное функционирование (установление базовой линии и верификация корректности алгоритмов), структурные отказы узлов и рёбер (дискретные воздействия с интенсивностями от 10% до 50%), деградация каналов связи (функциональные воздействия с уровнями ухудшения характеристик от 20% до 80%). Экспериментально подтверждена работоспособность метода во всех исследованных сценариях: при структурных отказах 25% элементов система сохраняет связность наибольшей компоненты на уровне 78,5%, а при деградации каналов связи на 90% система продолжает функционировать, хотя и неудовлетворительно ($KPE > 0,3$).

4) Сравнительный анализ с известными методами оптимизации продемонстрировал существенное преимущество разработанного метода по ключевым показателям эффективности. Время реконфигурации системы в условиях деструктивных воздействий сокращено на 14,8–35,4% в зависимости от доли отказавших элементов. Точность диагностики состояния

системы улучшена на 12,1–18,1% при различных режимах функционирования. Динамика агрегированного топологического индекса (АТИ) при структурных отказах показывает более плавную деградацию и ускоренное восстановление параметров по сравнению с известными алгоритмами.

5) Проведен анализ вычислительной сложности на системах размерностью от 50 до 1000 узлов подтвердил приемлемую масштабируемость предложенного метода. Использование предфрактальной структуры графа обеспечивает логарифмическую зависимость сложности анализа, что критически важно для систем большой размерности. На пороге 1000 узлов вычислительная сложность нового метода конфигурирования растет медленнее по сравнению с типовыми методами, что открывает возможность применения в крупномасштабных системах мониторинга.

6) Сформулированы практические рекомендации по применению результатов исследования в различных предметных областях: экологический мониторинг (системы от 500 до 5000 узлов на обширных территориях с акцентом на энергоэффективность и самоорганизацию), транспортные системы (от 700 до 6000 узлов с высокой динамичностью топологии и обработкой больших объемов данных в реальном времени), промышленная безопасность (от 150 до 450 узлов с требованиями к минимальным задержкам и гарантированной доставке критически важной информации). Для каждой области определены специфические требования к архитектуре и параметрам сетевой инфраструктуры

Таким образом, проведенная оценка эффективности метода реконфигурирования структурно-динамической сетевой системы непрерывного пространственного мониторинга большой размерности подтвердила существенные преимущества предложенного метода над известными по совокупности ключевых показателей и позволяет сделать вывод о том, что поставленная цель диссертационного исследования достигнута.

Заключение

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

1) Проведен анализ и основные направления развития научно-методического аппарата моделирования и реконfigurирования СДСС НПМ БР в режиме реального времени, обоснована необходимость разработки новых модели и метода ее реконfigurирования 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 реконfigurирования 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 реконfigurирования 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 её структурно-функциональных параметров в условиях деструктивных воздействий – достигнута, научная проблема решена.

Список сокращений и условных обозначений

В настоящей диссертации применяют следующие сокращения и обозначения:

ПРИСМ – Пространственно-распределенная информационная система мониторинга;

ПРИСНМ – Пространственно-распределенная информационная система непрерывного мониторинга;

СДСС НПМ БР – Структурно-динамическая сетевая система непрерывного пространственного мониторинга большой размерности;

ГСПД – Гетерогенная сеть передачи данных;

АТИ – Агрегированный топологический индекс (АТИ);

ТЛС – Транспортно-логистическая система;

ПАК – программно-алгоритмический комплекс;

МДР – множество допустимых решений;

ВЦФ – векторно-целевая функция;

ЗВЗ – замена вершины затравкой;

КПЭ – Комплексный показатель эффективности;

ОДМВ – остовное дерево минимального веса;

ОЛМВ – остовный лес минимального веса;

УВ – управляющее воздействие.

Список литературы

1. Гражданская защита : Энциклопедия в 4-х томах. Том II (К–О) / под общей редакцией В.А. Пучкова. – Москва : ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России», 2015. – С. 293-294. – ISBN 978-5-93926-108-3.
2. Корнеева, Т.В. Толковый словарь по метрологии, измерительной технике и управлению качеством. Основные термины : около 7000 терминов / Т.В. Корнеева. – Москва : Русский язык, 1990. – 185 с. – ISBN 5-200-01106-4.
3. Концепция создания и развития инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации [одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 августа 2006 г. № 1157-р] // СПС «Гарант». – Текст : электронный. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/12049036/> (дата обращения: 18.09.2024).
4. Радионов, Г.П. Инфраструктура пространственных данных Российской Федерации : опыт, технологии, особенности / Г.П. Радионов, В.И. Загоровский // ArcReview. – 2012. – № 4 (63). – С. 4-6. – ISSN 2219-7500. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2012/10/15/spatial-data-infrastructure/> (дата обращения: 18.09.2024).
5. Зраенко, Ю.Д. Разработка технологии организации пространственных данных в региональном узле российской инфраструктуры пространственных данных : специальность 25.00.35. Геоинформатика : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зраенко Юлия Дмитриевна ; Московский государственный университет геодезии и картографии. – Москва, 2010. – 22 с. – Библиогр.: с. 22. – Место защиты: Московский государственный университет геодезии и картографии.
6. Патент № 2698246 Российская Федерация, МПК G05B15/00. Многоуровневая система навигационно-информационного обеспечения органов исполнительной власти и способ её формирования и (или) применения : № 2018140908 : заявл. 07.09.2018 : опубл. 28.08.2019. – Бюл. № 25.

7. Вицентий, А.В. Визуализация пространственных данных как подход к построению когнитивных интерфейсов мультипредметных информационных систем поддержки регионального управления / А.В. Вицентий // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – № 5. Том 9. – ISSN 2223-5167. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/82TVN517.pdf> (дата обращения: 18.09.2024).

8. Ямашкин, С.А. Поддержка принятия управленческих решений в организационных территориально распределённых системах на основе пространственных данных : специальность 2.3.4. Управление в организационных системах : автореферат диссертации доктора технических наук / Ямашкин Станислав Анатольевич ; Пензенский государственный университет. – Пенза, 2024. – 43 с. – Библиогр.: с. 42. – Место защиты: Пензенский государственный университет.

9. Шарапов, В.М. Датчики : справочное пособие / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой [и др.]. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с. – ISBN 978-5-94836-320-3.

10. Виглеб, Г. Датчики. Устройство и применение / Г. Виглеб. – Москва : Мир, 1989. – 196 с. – ISBN 5-03-001141-4.

11. Бриндли, К. Измерительные преобразователи : справочное пособие / К. Бриндли. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 280 с. – ISBN 5-283-01077-2.

12. Энциклопедия современной техники. Автоматизация производства и промышленная электроника. Том 1 (А–И) / под редакцией А.И. Берга, В.А. Тимошенко. – Москва : Советская энциклопедия, 1962. – 524 с. – ISBN отсутствует.

13. Зюзин, А.В. Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно распределённой системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки / А.В. Зюзин, М.В. Кныш, С.Н. Разиньков [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – № 3. Том 22. – С. 600-609. – ISSN 2226-1494.

14. Ненашев, В.А. Пространственно-распределённые системы радиолокационного и оптического мониторинга : монография / В.А. Ненашев, А.А. Сенцов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – 191 с. – 250 экз. – ISBN 978-5-8088-1779-2.
15. Полубехин, А.И. Модели сигналов и помех при обнаружении целей в пространственно распределённой информационной системе радиолокационных модулей / А.И. Полубехин, П.Ю. Чесноков // Вестник СибГУТИ. – 2020. – № 4. – С. 78-91. – ISSN 2658-7117.
16. Кирсанов, Э.А. Обработка информации в пространственно распределённых системах радиомониторинга : статистический и нейросетевой подходы : монография / Э.А. Кирсанов, А.А. Сирота. – Москва : Физматлит, 2012. – 343 с. – 300 экз. – ISBN 978-5-9221-1420-2.
17. Timoshenko, A.V. The predictive adaptive copy forwarding routing algorithm in the data transmission network of a spatially distributed infocommunication monitoring system / A.V. Timoshenko, D.A. Kletskov, D.S. Biryukov [et al.] // Russian Aeronautics. – 2023. – № 3. Volume 66. – P. 605-614. – ISSN 1068-7998.
18. Чепига, А.А. Модель и алгоритм формирования множества пространственно распределённых групп воздушных объектов / А.А. Чепига, С.В. Петренко // Перспективы науки. – 2023. – № 9 (168). – С. 60-63. – ISSN 2077-6810.
19. Goncharenko, V. Modeling the detection of moving objects by means of a spatially distributed continuous monitoring system with a dynamic structure / V. Goncharenko, A. Kochkarov, D. Yatskin [et al.] // Advances in Systems Science and Applications. – 2022. – № 1. Volume 22. – P. 1-10. – ISSN 1078-6236.
20. Архимандритов, И.Б. Задача разработки модели цифровой платформы сбора, обработки и распространения пространственных данных, построенной с использованием сетцентрической авиационной системы мониторинга / И.Б. Архимандритов, С.Г. Белов, В.С. Верба [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 5. – ISSN 1684-1719. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may18/5/text.pdf> (дата обращения: 18.09.2024).

21. Приходько, М.А. Теория и методы исследования информационной среды распределённых систем обработки данных : специальность 05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность) : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Приходько Михаил Анатольевич ; Московский государственный горный университет. – 2011. – 45 с. – Библиогр. с. 43-45. – Место защиты: Московский государственный горный университет.

22. ГОСТ Р 56875–2016/Типовые требования к архитектуре и технологиям интеллектуальных систем мониторинга для обеспечения безопасности предприятий и территорий / Дата введения 2016-02-26. – Москва : Стандартиформ, 2019.

23. Патент № 2818866 Российская Федерация, МПК G06F17/40. Геопортальная платформа для управления пространственно распределёнными ресурсами : № 2023125406 : заявл. 26.06.2023 : опубл. 28.05.2024. – Бюл. № 16.

24. Марков, Н.Г. Геоинформационные системы предприятий нефтегазовой отрасли : функциональность, архитектура и перспективы развития / Н.Г. Марков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – № 9. Том 328. – С. 16-32. – ISSN 2413-1830.

25. Патент № 2791842 Российская Федерация, МПК G06F17/40, H04L9/00. Интерактивный пространственно-экономический геоинформационный комплекс : № 2021148306 : заявл. 01.12.2021 ; опубл. 08.03.2023. – Бюл. № 7.

26. Тряпкин, Д.С. Разработка экспериментальных образцов базовых элементов многоуровневой распределённой геоинформационной системы для решения задач мониторинга на основе данных дистанционного зондирования Земли / Д.С. Тряпкин, М.С. Саус // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». – 2016. – № 3. Том 3. – ISSN 2500-0659. – Текст : электронный. – DOI 10.15862/07RRO316. – URL: <http://resources.today/PDF/07RRO316.pdf> (дата обращения: 18.09.2024).

27. Замуруев, С.Н. Пространственно распределённые информационные системы радиотехнического мониторинга окружающего пространства : специальность 05.02.22. Организация производства : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Замуруев Сергей Николаевич ; Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики. – Москва, 2012. – 292 с. – Библиогр. 257-292.

28. Чернецова, Е.А. Развитие теории интеграции данных в многосенсорных системах дистанционного мониторинга : монография / Е.А. Чернецова. – Москва : Русайнс, 2018. – 262 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-4365-2511-2.

29. Шитиков, В.К. Методы синтетического картографирования территории (на примере эколого-информационной системы «VOLGABAS») / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг, Н.В. Костина // Количественные методы экологии и гидробиологии : сборник научных трудов, посвященный памяти А.И. Баканова ; под редакцией Г.С. Розенберга. – Тольятти : Российская академия наук, Самарский научный центр, 2005. – С. 167-227. – ISBN 5-93424-190-7.

30. Кудашев, Е.Б. Интегрированная распределённая информационная система спутниковых данных в программах исследования земли из космоса / Е.Б. Кудашев, А.Н. Филонов // Электронные библиотеки : перспективные методы и технологии, электронные коллекции : материалы научно-практической конференции. – Ярославль : Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2006. – С. 131-139. – ISBN 5-8397-0482-1.

31. Шокина, Ю.И. Распределённая информационная система сбора, хранения и обработки спутниковых данных для мониторинга территорий Сибири и Дальнего Востока / Ю.И. Шокина, И.А. Пестунова, В.В. Смирнова // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2008. – № 4. Том 1. – С. 291-314. – ISSN 1997-1389.

32. Золотов, О.И. Пространственно-распределённая система мониторинга технического состояния месторождений минерально-сырьевого комплекса / О.И. Золотов, А.Н. Ильюшина, И.М. Новожилов // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям : сборник трудов : в 2 томах. Том 1. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2021. – С. 125-128. – ISBN 978-5-7629-2864-9.

33. Mohammed, S. The spatial distribution of remote sensing stations to monitor water quality (Tigris River) within the administrative limits of the capital Baghdad, by using Geomatics technologies / S. Mohammed, A.-R. Ziboon // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Volume 162. – Article 03020. – ISSN 2261-236X.

34. Al-Ramahi, F.K.M. Monitoring the water quality of the Tigris River and producing maps to determine the locations of turbidity in the water for the year 2022 in Baghdad Governorate / F.K.M. Al-Ramahi [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Volume 1223. – Article 012020. – ISSN 1755-1315.

35. Vasilchenko, M. Increasing the stability of a spatially distributed information system using a robust algorithm for filtering anomalous measurements / M. Vasilchenko, A. Zavyalov, K. Zhuchkov // Information Technology in Industry. – 2020. – № 3. Volume 8. – P. 1-9. – ISSN 2643-850X.

36. Машталер, И.Я. Организация сетевого взаимодействия пространственно распределённых элементов информационно-аналитических систем мониторинга динамических объектов : специальность 05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Машталер Игорь Ярославович ; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. – Санкт-Петербург, 2013. – 161 с. – Библиогр. 147-161.

37. Nenzi, L. A logic for monitoring dynamic networks of spatially distributed cyber-physical systems / L. Nenzi, E. Bartocci, L. Bortolussi [et al.] // Logical Methods in Computer Science. – 2022. – № 1. Volume 18. – Article 4. – ISSN 1860-5974.

38. Система мониторинга сетевых компонентов в распределённой информационной системе персональных данных : информационно-технологический проект. – Текст : электронный. – URL: <https://begemot.ai/projects/784880-sistema-monitoringa-setevyx-komponentov-v-raspredelelnoi-informacionnoi-sisteme-personalnyx-dannyx> (дата обращения: 18.09.2024).

39. Будко, Н.П. Концептуальная модель подсистемы интеллектуального мониторинга состояния информационно-телекоммуникационной сети общего пользования / Н.П. Будко // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 5. – С. 65-119. – ISSN 2410-9916.

40. Lu, H. Distributed, concurrent range monitoring of spatial-network constrained mobile objects / H. Lu, Z. Huang, C. S. Jensen [et al.] // Advances in Spatial and Temporal Databases : 10th International Symposium, SSTD 2007. – 2007. – P. 391-408. – Volume 4605. – ISSN 0302-9743.

41. Павлова, З.Х. Об основных аспектах проектирования беспроводных сетей параметрического мониторинга удалённых объектов / З.Х. Павлова, Р.Р. Балтин, А.Н. Краснов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 12 (54). – С. 52-58. – ISSN 2303-9868.

42. Gordon, D.F. Distributed spatial control, global monitoring and steering of mobile agents / D.F. Gordon, W.M. Spears, O. Sokolsky [et al.] // Proceedings 1999 International Conference on Information Intelligence and Systems. – 1999. – P. 681-688. – ISBN 0-7695-0046-9.

43. Ucinski, D. Sensor network scheduling for identification of spatially distributed processes / D. Ucinski // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. – 2010. – № 3. Volume 20. – P. 493-504. – ISSN 1641-876X.

44. Антсиперов, В.Е. Распределённые информационные системы беспроводного мониторинга для медицинских и иных приложений / В.Е. Антсиперов, Г.К. Мансуров, О.В. Евсеев [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 2. – ISSN 1684-1719. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb12/11/text.pdf> (дата обращения: 18.09.2024).

45. Струков, Д.Р. Информационная система пространственного мониторинга состояния здоровья населения региона : специальность 05.11.17. Приборы, системы и изделия медицинского назначения : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Струков Даниил Русланович ; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). – Санкт-Петербург, 2016. – 217 с. – Библиогр. 149-165.

46. Bouzid, S. Gossip-based monitoring for the Internet of Things: A survey / S. Bouzid, Y. Busnel, E. Serrano // Computer Communications. – 2023. – Volume 199. – P. 1-23. – ISSN 0140-3664.

47. Fernández-López, H. HM4All: A vital signs monitoring system based in spatially distributed ZigBee networks / H. Fernández-López, J.A. Afonso, J.H. Correia [et al.] // 2010 4th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare. – Munich, Germany : IEEE, 2010. – P. 1-4. – ISBN 978-1-4244-5327-7.

48. Malings, C. Value of information for spatially distributed systems: Application to sensor placement / C. Malings, M. Pozzi // Reliability Engineering & System Safety. – 2016. – Volume 154. – P. 219-233. – ISSN 0951-8320.

49. Neculescu, D.S. Advanced mechatronics: monitoring and control of spatially distributed systems / D. S. Neculescu. – Berlin : Springer, 2008. – 220 p. – ISBN 978-3-540-77458-6.

50. Косяков, С.В. Модели, методы и средства пространственного анализа и проектирования территориально распределённых технических систем : (на примере сетей энергоснабжения городов) : специальности 05.13.12. Системы автоматизации проектирования (промышленность), 05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации : автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук / Косяков Сергей Витальевич ; Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2005. – 36 с. – Библиогр. 32-36. – Место защиты: Ивановский государственный энергетический университет.

51. Ma, M. A novel spatial-temporal specification-based monitoring system for smart cities / M. Ma, E. Bartocci, E. Lifland [et al.] // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – № 15. Volume 8. – P. 11793-11806. – ISSN 2327-4662.
52. Simons, G. On spatially distributed hydrological ecosystem services: bridging the quantitative information gap using remote sensing and hydrological models / G. Simons, A. Poortinga, W. Bastiaanssen [et al.] // Wageningen, the Netherlands : FutureWater. – 2017. – 45 p. – ISBN 978-90-816960-3-5.
53. Gerritsen, H. Integrating vessel monitoring systems (VMS) data with daily catch data from logbooks to explore the spatial distribution of catch and effort at high resolution / H. Gerritsen, C. Lordan // ICES Journal of Marine Science. – 2011. – № 1. Volume 68. – P. 245-252. – ISSN 1054-3139.
54. Uciński, D. Sensor network scheduling for identification of spatially distributed processes / D. Uciński // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. – 2012. – № 1. Volume 22. – P. 25-40. – ISSN 1641-876X.
55. Кочкаров, А.А. Некоторые особенности применения динамических графов для конструирования алгоритмов взаимодействия подвижных абонентов / А.А. Кочкаров, Л.И. Сенникова, Р.А. Кочкаров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 146-156. – ISSN 1999-9429.
56. Кочкаров, Р.А. Исследование многокритериальных задач и алгоритмов их решения на многовзвешенных предфрактальных графах : специальность 01.01.09. Дискретная математика и математическая кибернетика : диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук / Кочкаров Расул Ахматович ; Казанский (Приволжский) федеральный университет. – Казань, 2018. – 320 с. – Библиогр. 302-320.
57. Шевцов, В.А. Показатель структурной эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределённой системы мониторинга / В.А. Шевцов, А.М. Казанцев, А.В. Тимошенко [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – № 2. Том 20. – С. 124-131. – ISSN 1729-6501.

58. Кочкаров, Р.А. Алгоритм оценки структурно-функциональной устойчивости и целостности гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределённой системы мониторинга / Р.А. Кочкаров, М.Т. Балдычев, А.М. Казанцев [и др.] // Труды МАИ. – 2024. – № 137. – С. 1-15. – ISSN 2541-8499.

59. Шевцов, В.А. Показатель структурной эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределённой системы мониторинга / В.А. Шевцов, А.М. Казанцев, А.В. Тимошенко [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – № 2. Том 20. – С. 124-131. – ISSN 1729-6501.

60. Майер-Шенбергер, В. Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живём, работаем и мыслим / В. Майер-Шенбергер, К. Кукьер. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2013. – 240 с. – ISBN 978-5-91657-681-9.

61. Kollås, M. Knowledge representation for e-learning in the semantic web / M. Kollås // Journal of Universal Computer Science. – 2004. – № 1. Volume 10. – P. 2-23. – ISSN 0948-695X.

62. Acar, U.A. Adaptive functional programming / U.A. Acar, G.E. Blelloch, R. Harper // ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS). – 2016. – № 4. Volume 38. – P. 1-45. – ISSN 0164-0925.

63. Casteigts, A. Time-varying graphs and dynamic networks / A. Casteigts, P. Flocchini, W. Quattrociocchi [et al.] // International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems. – 2012. – № 5. Volume 27. – P. 387-408. – ISSN 1744-5760.

64. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – Москва : Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с. – ISBN 5-93972-108-7.

65. Faloutsos, M. On power-law relationships of the Internet topology / M. Faloutsos, P. Faloutsos, C. Faloutsos // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 1999. – № 4. Volume 29. – P. 251-262. – ISSN 0146-4833.

66. Strogatz, S.H. Exploring complex networks / S.H. Strogatz // Nature. – 2001. – № 6825. Volume 410. – P. 268-276. – ISSN 0028-0836.
67. Watts, D.J. Collective dynamics of «small-world» networks / D.J. Watts, S.H. Strogatz // Nature. – 1998. – № 6684. Volume 393. – P. 440-442. – ISSN 0028-0836.
68. Buckley, F. A note on graphs with number of end vertices and the graceful tree conjecture / F. Buckley, M. Lewintе // Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing. – 1987. – Volume 1. – P. 247-255. – ISSN 0835-3026.
69. Кормен, Т. Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – Москва : Вильямс, 2009. – 1296 с. – ISBN 978-5-8459-0857-5.
70. Donovan, P. Using coarse GPS data to quantify city-scale transport system resilience to the collective application of individual routing recommendations / P. Donovan, D.B. Work // Royal Society Open Science. – 2017. – № 5. Volume 4. – ISSN 2054-5703.
71. Барабаси, А.Л. Наука о сетях. Введение / А.Л. Барабаси. – Москва : Альпина Паблишер, 2016. – 304 с. – ISBN 978-5-9614-5388-0.
72. Ньюман, М. Сети. Новый взгляд на науку, общество и экономику / М. Ньюман. – Москва : Альпина Паблишер, 2010. – 528 с. – ISBN 978-5-9614-1315-0.
73. Хольме, П. Временные сети / П. Хольме, Г. Гошал // Успехи физических наук. – 2012. – № 12. Том 182. – С. 1231-1254. – ISSN 0042-1294.
74. Гарей, М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гарей, Д. Джонсон. – Москва : Мир, 1982. – 416 с. – ISBN 5-03-001041-8.
75. Leskovec, J. Sampling from large graphs / J. Leskovec, C. Faloutsos // Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'06). – Philadelphia, Pennsylvania, USA : ACM, 2006. – P. 631-636. – ISBN 1-59593-339-5.
76. Bender, M.A. The level ancestor problem simplified / M.A. Bender, M. Farach-Colton // SIAM Journal on Computing. – 2003. – № 3. Volume 32. – P. 863-879. – ISSN 0097-5397.

77. Holme, P. Modern temporal network theory / P. Holme // The European Physical Journal B. – 2015. – № 9. Volume 88. – P. 1-30. – ISSN 1434-6028.
78. Dean, J. MapReduce: simplified data processing on large clusters / J. Dean, S. Ghemawat // Communications of the ACM. – 2008. – № 1. Volume 51. – P. 107-113. – ISSN 0001-0782.
79. Болобаш, Б. Современная теория графов / Б. Болобаш. – Москва : Мир, 1998. – 256 с. – ISBN 5-03-003067-2.
80. Дизель, Р. Теория графов / Р. Дизель. – Москва : Мир, 2010. – 432 с. – ISBN 978-5-03-003601-8.
81. Пападимитриу, К. Вычислительная сложность / К. Пападимитриу. – Москва : Мир, 1998. – 480 с. – ISBN 5-03-002935-6.
82. Schlager, K. High-quality external sorting with shared memory / K. Schlager // Journal of Experimental Algorithmics. – 2020. – Volume 25. – Article 1.5. – ISSN 1084-6654.
83. Gottesbüren, L. High-quality multilevel hypergraph partitioning / L. Gottesbüren, K. Schlager, T. Heuer // Proceedings of the 2023 SIAM International Conference on Data Mining. – Minneapolis, Minnesota, USA : SIAM, 2023. – P. 234-246. – ISBN 978-1-61197-765-3.
84. Abiodun, O.I. Comprehensive review of artificial intelligence and machine learning applications in smart grid / O.I. Abiodun, M.U. Kiru, J. Jantan [et al.] // IEEE Access. – 2023. – Volume 11. – P. 93657-93684. – ISSN 2169-3536.
85. Sanders, P. Think locally, act globally: highly balanced graph partitioning / P. Sanders, C. Schulz // Journal of Experimental Algorithmics (JEA). – 2012. – Volume 17. – Article 2.3. – ISSN 1084-6654.
86. Gering, A. A scalable machine learning architecture for named entity recognition / A. Gering, M. Flajolet, P. Woźniak // 2016 IEEE 16th International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). – Barcelona, Spain : IEEE, 2016. – P. 1164-1171. – ISSN 2375-9232.
87. Кепнер, Дж. Алгоритмы графов на языке линейной алгебры / Дж. Кепнер, Дж. Гилберт. – Филадельфия : SIAM, 2017. – 340 с. – ISBN 978-1-61197-473-7.

88. Lumsdaine, A. Challenges in parallel graph processing / A. Lumsdaine, D. Gregor, B. Hendrickson [et al.] // *Parallel Processing Letters*. – 2007. – № 3. Volume 17. – P. 399-418. – ISSN 0129-6264.
89. Leskovec, J. Sampling from large graphs / J. Leskovec, C. Faloutsos // *Proceedings of the 12th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD '06)*. – New York, NY, USA : ACM, 2006. – P. 631-636. – ISBN 1-59593-339-5.
90. Шлаг, К. Масштабируемая внешняя сортировка с общей памятью / К. Шлаг, Б. Готтесбурен, Т. Хойер, П. Сандерс // *Труды 50-го ежегодного симпозиума ACM SIGACT по основам вычислительной техники (FOCS)*. – 2018. – P. 659-672. – ISBN 978-1-4503-5582-1.
91. Clauset, A. Power-law distributions in empirical data / A. Clauset, C.R. Shalizi, M.E.J. Newman // *SIAM Review*. – 2009. – № 4. Volume 51. – P. 661-703. – ISSN 0036-1445.
92. Ng, A.Y. On spectral clustering: Analysis and an algorithm / A.Y. Ng, M.I. Jordan, Y. Weis // *Advances in Neural Information Processing Systems 14 (NIPS 2001)*. – 2002. – P. 849-856. – ISBN 0-262-19450-3.
93. Blondel, V.D. Fast unfolding of communities in large networks / V.D. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte [et al.] // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. – 2008. – № 10. Volume 2008. – Article 10008. – ISSN 1742-5468.
94. Freeman, L.C. Centrality in networks of personal interaction / L.C. Freeman // *Social Networks*. – 1978. – № 3. Volume 1. – P. 215-239. – ISSN 0378-8733.
95. Brandes, U. Network analysis: methodological foundations / U. Brandes, T. Erlebach. – Berlin : Springer, 2005. – 472 p. – ISBN 978-3-540-24979-5.
96. Everett, M.G. Networks containing negative ties / M.G. Everett, S.P. Borgatti // *Social Networks*. – 2012. – № 1. Volume 36. – P. 1-6. – ISSN 0378-8733.

97. Borgatti, S.P. Centrality and network flow / S.P. Borgatti // *Social Networks*. – 2005. – № 1. Volume 27. – P. 55-71. – ISSN 0378-8733.
98. Gromov, M. Metric structures for Riemannian and non-Riemannian spaces / M. Gromov. – Boston : Birkhäuser, 2007. – 585 p. – ISBN 978-0-8176-4582-3.
99. Koutra, D. DELTACON: a principled massive-graph similarity function / D. Koutra, J.T. Vogelstein, C. Faloutsos // *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*. – 2016. – Volume 10. Issue 3. – P. 1-43. – ISSN 1556-4681.
100. Wu, Z. A comprehensive survey on graph neural networks / Z. Wu, S. Pan, F. Chen [et al.] // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – 2021. – № 1. Volume 32. – P. 4-24. – ISSN 2162-237X.
101. Albert, R. Statistical mechanics of complex networks / R. Albert, A.L. Barabási // *Reviews of Modern Physics*. – 2002. – № 1. Volume 74. – P. 47-97. – ISSN 0034-6861.
102. Newman, M.E.J. The structure and function of complex networks / M.E.J. Newman // *SIAM Review*. – 2003. – № 2. Volume 45. – P. 167-256. – ISSN 0036-1445.
103. Gilmer, J. Neural message passing for quantum chemistry / J. Gilmer, S.S. Schoenholz, P.F. Riley [et al.] // *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML 2017)*. – Sydney, Australia : PMLR, 2017. – Volume 70. – P. 1263-1272. – ISSN 2640-3498.
104. Hamilton, W.L. Inductive representation learning on large graphs / W.L. Hamilton, R. Ying, J. Leskovec // *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*. – 2017. – Volume 30. – P. 1024-1034. – ISBN 978-1-5108-6096-4.
105. Wang, X. Neural graph collaborative filtering / X. Wang, X. He, M. Wang [et al.] // *SIGIR '19 : Proceedings of the 42nd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. – New York : ACM, 2019. – P. 165-174. – ISBN 978-1-4503-6172-9.

106. Spielman, D.A. Nearly linear time algorithms for preconditioning and solving symmetric, diagonally dominant linear systems / D.A. Spielman, S.H. Teng // *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*. – 2010. – № 3. Volume 32. – P. 890-918. – ISSN 0895-4798.
107. Milo, R. Uniform generation of random graphs with arbitrary degree sequences / R. Milo, S. Shen-Orr, S. Itzkovitz [et al.] // *Bioinformatics*. – 2002. – № 3. Volume 18. – P. 294-303. – ISSN 1367-4803.
108. Ribeiro, B. Estimating and sampling graphs with multidimensional random walk / B. Ribeiro, D. Towsley // *ACM Transactions on Information and System Security*. – 2014. – № 1. Volume 17. – P. 1-40. – ISSN 1094-9224.
109. Caldarelli, G. Scale-free networks: complex webs in nature and technology / G. Caldarelli. – Oxford : Oxford University Press, 2012. – 328 p. – ISBN 978-0-19-921151-7.
110. Jackson, M.O. Social and economic networks / M.O. Jackson. – Princeton : Princeton University Press, 2010. – 504 p. – ISBN 978-0-691-13440-6.
111. de Vega, F.F. Computing in networks and clouds / F.F. de Vega, F. Cantú-Ortiz. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2018. – 480 p. – ISBN 978-1-119-49541-0.
112. Mitzenmacher, M. A brief history of generative models for power law and lognormal distributions / M. Mitzenmacher // *Internet Mathematics*. – 2004. – № 2. Volume 1. – P. 226-251. – ISSN 1542-7951.
113. Barabási, A.-L. Network biology: understanding the cell's functional organization / A.-L. Barabási, Z.N. Oltvai // *Nature Reviews Genetics*. – 2004. – № 2. Volume 5. – P. 101-113. – ISSN 1471-0056.
114. Ideker, T. Discovering regulatory and signalling circuits in molecular interaction networks / T. Ideker, O. Ozier, B. Schwikowski, A. F. Siegel // *Bioinformatics*. – 2002. – Volume 18. – P. S233-S240. – ISSN 1367-4803.
115. Pržulj, N. Biological network comparison using graphlet degree distribution / N. Pržulj // *Bioinformatics*. – 2007. – № 2. Volume 23. – P. e177-e183. – ISSN 1367-4803.

116. Orlin, J.B. Shortest paths with multipliers: complexity and algorithms / J.B. Orlin // SIAM Journal on Optimization. – 1997. – № 3. Volume 7. – P. 595-617. – ISSN 1052-6234.
117. Even, S. Graph algorithms / S. Even. – Rockville : Computer Science Press, 1976. – 249 p. – ISBN 978-0-914894-21-8.
118. Kempe, D. Gossip-based computation of aggregate information / D. Kempe, A. Dobra, J. Gehrke // Proceedings of the 44th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS). – 2003. – P. 482-491. – ISBN 0-7695-2040-5.
119. Kruskal, J.B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem / J.B. Kruskal // Proceedings of the American Mathematical Society. – 1956. – № 1. Volume 7. – P. 48-50. – ISSN 0002-9939.
120. Prim, R.C. Shortest connection networks and some generalizations / R.C. Prim // Bell System Technical Journal. – 1957. – № 6. Volume 36. – P. 1389-1401. – ISSN 0005-8580.
121. Kamčev, I. Transversals in locally dense graphs / I. Kamčev, P.-S. Loh // Journal of Combinatorial Theory. – 2016. – Volume 116. – P. 1-17. – ISSN 0095-8956.
122. Dilworth, R.P. A decomposition theorem for partially ordered sets / R.P. Dilworth // Annals of Mathematics. – 1950. – № 1. Volume 51. – P. 161-166. – ISSN 0003-486X.
123. Turing, A.M. The chemical basis of morphogenesis / A.M. Turing // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences. – 1952. – № 641. Volume 237. – P. 37-72. – ISSN 0080-4622.
124. Falconer, K. Fractal geometry: mathematical foundations and applications / K. Falconer. – Chichester : John Wiley & Sons, 1990. – 288 p. – ISBN 978-0-471-92287-1.
125. Rikhtegar, D. Arrhythmogenic structures from electromagnetic mapping / D. Rikhtegar, P.S. Cuculich, M. Zviman [et al.] // Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology. – 2018. – № 7. Volume 11. – Article e006261. – ISSN 1941-3149.

126. Bonchev, D. Complexity in chemistry, biology, and ecology / D. Bonchev, D.H. Rouvray. – Berlin : Springer Science+Business Media, 2005. – 366 p. – ISBN 978-0-306-48689-2.
127. Carbone, A. Predicting 3D chromatin organization with Chromformer / A. Carbone, V. Seitan, N. Naumova [et al.] // Nature Methods. – 2021. – № 1. Volume 18. – P. 64-71. – ISSN 1548-7091.
128. Ullmann, J.R. An algorithm for subgraph isomorphism / J.R. Ullmann // Journal of the ACM (JACM). – 1976. – № 1. Volume 23. – P. 31-42. – ISSN 0004-5411.
129. Svirin, S. Master stability functions for delay-coupled systems / S. Svirin, I. Belykh // Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. – 2016. – № 1. Volume 24. – P. 5-21. – ISSN 0869-6632.
130. Nepusz, T. Fuzzy communities and the concept of bridgeness in complex networks / T. Nepusz, A. Petróczy, L. Négyessy, F. Bazsó // Physical Review E. – 2008. – № 1. Volume 77. – Article 016107. – ISSN 1539-3755.
131. Michail, O. An introduction to temporal graphs: an algorithmic perspective / O. Michail // Internet Mathematics. – 2016. – № 4. Volume 12. – P. 239-280. – ISSN 1542-7951.
132. Conte, D. Thirty years of graph matching in pattern recognition / D. Conte, P. Foggia, C. Sansone, M. Vento // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. – 2004. – № 3. Volume 18. – P. 265-298. – ISSN 0218-0014.
133. Sporns, O. The human connectome: a structural description of the human brain / O. Sporns, G. Tononi, R. Kötter // PLoS Computational Biology. – 2005. – № 4. Volume 1. – P. e42. – ISSN 1553-734X.
134. Miettinen, K. Nonlinear multiobjective optimization / K. Miettinen. – Berlin : Springer Science+Business Media, 2012. – 320 p. – ISBN 978-1-4419-3164-1.
135. Ahuja, R.K. Network flows: theory, algorithms, and applications / R.K. Ahuja, T.L. Magnanti, J.B. Orlin. – Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1993. – 846 p. – ISBN 978-0-13-617549-0.

136. Bondy, J.A. Graph theory with applications / J.A. Bondy, U.S.R. Murty. – Amsterdam : North-Holland, 1976. – 264 p. – ISBN 978-0-444-19451-0.
137. Gross, J.L. Handbook of graph theory / J.L. Gross, J. Yellen. – Boca Raton : CRC Press, 2003. – 1160 p. – ISBN 978-1-58488-090-5.
138. Song, C. Self-similarity of complex networks and hidden metric spaces / C. Song, S. Havlin, H.A. Makse // Physical Review Letters. – 2005. – № 17. Volume 94. – Article 178701. – ISSN 0031-9007.
139. Meyn, S.P. The optimal control of hybrid systems / S.P. Meyn, P.E. Caines // Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control. – 1997. – Volume 1. – P. 13-18. – ISBN 0-7803-3876-6.
140. Boccaletti, S. Complex networks: structure and dynamics / S. Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno [et al.] // Physics Reports. – 2006. – № 4-5. Volume 424. – P. 175-308. – ISSN 0370-1573.
141. Latora, V. Efficient behavior of small-world networks / V. Latora, M. Marchiori // Physical Review Letters. – 2001. – № 19. Volume 87. – Article 198701. – ISSN 0031-9007.
142. Sporns, O. Discovering the human connectome / O. Sporns. – Cambridge : MIT Press, 2012. – 253 p. – ISBN 978-0-262-01770-3.
143. Яцкин, Д.В., Теория графов и классические задачи прикладной математики в экономике : учебное пособие / Д.В. Яцкин, А.А. Кочкаров. – Москва : КноРус, 2020. – 248 с. – ISBN 978-5-406-01309-0.
144. Mac Lane, S. Categories for the working mathematician / S. Mac Lane. – Berlin : Springer Science+Business Media, 1971. – 262 p. – ISBN 978-0-387-90036-0.
145. Kipf, T.N. Semi-supervised classification with graph convolutional networks / T.N. Kipf, M. Welling // Proceedings of the 5th International Conference on Learning Representations (ICLR 2017). – Toulon, France, 2017. – P. 1-14. – ISBN 978-1-9993074-0-3.

146. Gilmer, J. Neural message passing for quantum chemistry / J. Gilmer, S.S. Schoenholz, P.F. Riley [et al.] // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML 2017). – Sydney, Australia : PMLR, 2017. – Volume 70. – P. 1263-1272. – ISBN 978-1-5108-5125-9.

147. Hamilton, W.L. Inductive representation learning on large graphs / W.L. Hamilton, R. Ying, J. Leskovec // Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NeurIPS 2017) : conference proceedings. – Long Beach, CA, USA, 2017. – P. 1024-1034. – ISBN 978-1-5108-5125-9.

148. Wang, X. Neural graph collaborative filtering / X. Wang, X. He, M. Wang [et al.] // ACM Transactions on Information Systems (TOIS). – 2020. – №4. Volume 39. – P. 1-24. – ISSN 1046-8188.

149. Jackson, M.O. Social and economic networks / M.O. Jackson. – Princeton : Princeton University Press, 2010. – 504 p. – ISBN 978-0-691-13440-6.

150. de Vega, F.F. Computing in networks and clouds / F.F. de Vega, F. Cantú-Ortiz. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2018. – 480 p. – ISBN 978-1-119-49541-0.

151. Mitzenmacher, M. A brief history of generative models for power law and lognormal distributions / M. Mitzenmacher // Internet Mathematics. – 2004. – № 2. Volume 1. – P. 226-251. – ISSN 1542-7951.

152. Павлов, А.Н. Модели и методы планирования и реконфигурации сложных объектов с перестраиваемой структурой : специальность 05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Павлов Александр Николаевич ; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. – Санкт-Петербург, 2014. – 310 с. – Библиогр. 285-310.

153. Jabr, R.A. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming / R.A. Jabr, R. Singh, B.C. Pal // IEEE Transactions on Power Systems. – 2012. – № 2. Volume 27. – P. 1106-1115. – ISSN 0885-8950.

154. Azizivahed, A. Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration in automated distribution systems / A. Azizivahed, H. Narimani, M. Fathi [et al.] // *Energy*. – 2018. – Volume 147. – P. 896-914. – ISSN 0360-5442.
155. Yuanqi, G. Batch-constrained reinforcement learning for dynamic distribution network reconfiguration / G. Yuanqi, W. Wei, S. Jie, Y. Nanpeng // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2020. – № 6. Volume 11. – P. 5357-5369. – ISSN 1949-3053.
156. Баранов, А.В. Способы и средства динамической реконфигурации сетей суперкомпьютера при представлении пользовательских заданий в виде контейнеров / А.В. Баранов, А.С. Шитик // *Программные продукты, системы и алгоритмы*. – 2018. – № 3. – С. 62-70. – ISSN 2311-6749.
157. Liu, K.-Y. A network reconfiguration method considering data uncertainties in smart distribution networks / K.-Y. Liu, W. Sheng, Y. Liu [et al.] // *Energies*. – 2017. – № 5. Volume 10. – P. 1-21. – ISSN 1996-1073.
158. Zhenzhi, L. A restorative self-healing algorithm for transmission systems based on complex network theory / L. Zhenzhi, W. Fushuan, X. Yusheng // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2016. – № 5. Volume 7. – P. 2151-2163. – ISSN 1949-3053.
159. Zhang, C. Two-stage power network reconfiguration strategy considering node importance and restored generation capacity / C. Zhang, L. Zhenzhi, W. Fushuan [et al.] // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2014. – Volume 8. Issue 1. – P. 91-103. – ISSN 1751-8687.
160. Lin, Z. CRITIC-based node importance evaluation in skeleton-network reconfiguration of power grids / Z. Lin, F. Wen, H. Wang [et al.] // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. – 2017. – № 2. Volume 65. – P. 206-210. – ISSN 1549-7747.
161. Gao, Y. Batch-constrained reinforcement learning for dynamic distribution network reconfiguration / Y. Gao, W. Wang, J. Shi, N. P. Yu // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2020. – № 6. Volume 11. – P. 5357-5369. – ISSN 1949-3053.

162. Zheng, W. A deep learning-based general robust method for network reconfiguration in three-phase unbalanced active distribution networks / W. Zheng, W. Huang, D. J. Hill // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – Volume 120. – P. 105982. – ISSN 0142-0615.

163. Qiao, W. A dynamic service reconfiguration method for satellite-terrestrial integrated networks / W. Qiao, H. Lu, Y. Lu [et al.] // Future Internet. – 2021. – № 10. Volume 13. – P. 1-20. – ISSN 1999-5903.

164. Doorman, C. Dynamic network reconfiguration for entropy maximization using deep reinforcement learning / C. Doorman, V.-A. Darvari, S. Hailes [et al.] // Proceedings of the First Learning on Graphs Conference. – 2022. – Volume 198. – P. 1-25. – ISSN отсутствует.

165. Wang, X. A distribution network reconfiguration method based on comprehensive analysis of operation scenarios in the long-term time period / X. Wang, X. Liu, S. Jian [et al.] // Energy Reports. – 2021. – Volume 7. – P. 369-379. – ISSN 2352-4847.

166. Рожкова, Т.С. Специальное математическое и программное обеспечение децентрализованного управления динамической реконфигурацией вычислительной системы на базе мобильных устройств : 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Рожкова Татьяна Сергеевна ; Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. – Москва, 2018. – 145 с. – Библиогр. 110-121.

167. Третьяков, Е.А. Реконфигурация распределительных электрических сетей / Е.А. Третьяков, Н.Н. Малышева // Вестник ЮУрГУ. Серия : Энергетика. – 2021. – № 1. Том 14. – С. 45-55. – ISSN 1999-9810.

168. Захаров, В.А. О некоторых задачах реконфигурирования программно-конфигурируемых сетей / В.А. Захаров, Е.В. Чемерицкий // Моделирование и анализ информационных систем. – 2014. – № 6. Том 21. – С. 57-70. – ISSN 1818-1015.

169. Козов, А.В. Динамическая реконфигурация системы управления мобильными роботами при выполнении группового действия / А.В. Козов // Экстремальная робототехника. – 2020. – № 1 (31). – С. 78-83. – ISSN 2618-8466.

170. Таранов, А.Ю. Коммуникация в реконфигурируемых информационно-управляющих системах критического назначения и перспективный способ ее обеспечения / А.Ю. Таранов, Э.В. Мельник, В.В. Косьянчук [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2024. – № 4 (149). – С. 72-89. – ISSN 0236-3933.

171. Закалкин, П.В. Метод реконфигурации сети связи с учетом оценки информированности источника информационно-технических воздействий / П.В. Закалкин // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2021. – Выпуск 161-162. – С. 116-122. – ISSN 2414-0917.

172. Горбачев, А.А. Определение оптимальных параметров конфигурирования информационных систем в условиях сетевой разведки / А.А. Горбачев, С.П. Соколовский, М.А. Каплин // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 4 (50). – С. 56-67. – ISSN 2413-3441.

173. Erdős, P. On the evolution of random graphs / P. Erdős, A. Rényi // Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences. – 1960. – Volume 5. – P. 17-61. – ISSN 0025-5161.

174. Макаренко, С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки : монография / С.И. Макаренко. – Санкт-Петербург : Научно-технологические, 2020. – 337 с. – ISBN 978-5-6044429-5-1.

175. Шевцов, В.А. Показатель структурной эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга / В.А. Шевцов, Р.А. Кочкаров, А.М. Казанцев [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – № 2. Том 20. – С. 124-131. – ISSN 1729-6501.

176. 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.

177. 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.

178. 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.

179. Масленников, О.В. Адаптивные динамические сети / О.В. Масленников, В.И. Некоркин // Успехи физических наук. – 2017. – Том 187. – Выпуск 7. – С. 745-756. – ISSN 0042-1294.

180. Тишуков, Б.Н. Многометодный подход к управлению сложными объектами на основе комплексирования процедур численной оптимизации методами компьютерного моделирования / Б.Н. Тишуков, Я.Е. Львович, Д.В. Иванов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – № 1. Том 16. – С. 33-38. – ISSN 1729-6501.

181. Кочкаров, А.А. Оценка непрерывности информационного взаимодействия и доведения информации в системах мониторинга с динамической структурой / А.А. Кочкаров, А.В. Тимошенко, А.В. Литвинов [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2019. – № 8. – С. 66-71. – ISSN 1729-6560.

182. Тимошенко, А.В. Критерии многокритериального выбора конфигурации телекоммуникационной сети системы непрерывного мониторинга с подвижными средствами наблюдения / А.В. Тимошенко, П.Г. Милованов, А.А. Кочкаров [и др.] // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – № 8. Том 15. – С. 30-35. – ISSN 2072-8735.

183. Ананьев, А.В. Минимизация рисков несанкционированного доступа к информации в наземных и аэромобильных радиосетях критически важных объектов методами многокритериальной многопутевой маршрутизации / А.В. Ананьев, А.С. Багдасарян, С.А. Багдасарян [и др.] // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2017. – № 2. – С. 2-6. – ISSN 0134-5583.

184. Бородин, В.В. Анализ алгоритмов маршрутизации в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов / В.В. Бородин, А.М. Петраков, В.А. Шевцов // Труды МАИ. – 2016. – № 87. – ISSN 1727-6942. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69735> (дата обращения 03.04.2024).

185. Захаров, В.В. Устойчивая кооперация в динамических задачах маршрутизации транспорта / В.В. Захаров, А.Н. Щегряев // Математическая теория игр и её приложения. – 2012. – № 2. Том 4. – С. 39-56. – ISSN 2079-170X.

186. Архипова, Н.И. Управление в чрезвычайных ситуациях : монография / Н.И. Архипова, В.В. Кульба. – Москва : Российский государственный гуманитарный университет, 2008. – 474 с. – 1000 экз. – ISBN 978-5-7381-0935-8.

187. 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. – № 17. – С. 103-120. – ISSN 1819-2440. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <http://www.mtas.ru/Library/uploads/1174730437.pdf> (дата обращения: 17.06.2024).

188. Кочкаров, Р.А. Исследование эффективности решений транспортно-логистических задач и вопросов структурной устойчивости / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров, Д.В. Яцкин // Хроноэкономика. – 2019. – № 5 (18). – С. 5-14. – ISSN 2658-4232.

189. Яцкин, Д.В. Моделирование транспортно-логистических систем и исследование их структурной устойчивости / Д.В. Яцкин, А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Управленческие науки. – 2020. – № 1. Том 10. – С. 102-111. – ISSN 2404-022X. – Текст : электронный. – DOI 10.26794/2404-022X-2020-10-1-102-111. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-transportno-logisticheskikh-sistem-i-issledovanie-ih-strukturnoy-ustoychivosti> (дата обращения: 17.06.2024).

190. Владимиров, В.А. Управление риском: риск, устойчивое развитие, синергетика : монография / В.А. Владимиров, В.В. Кульба, Г.Г. Малинецкий [и др.]. – Москва : Наука, 2000. – 431 с. – 1000 экз. – ISBN 5-02-002630-0.

191. Gebreegziabher, F. The major challenges of big graph and their solutions: A review / F. Gebreegziabher, R. Patgiri // Advances in Computers. – 2023. – Volume 128. – P. 399-421. – ISSN 0065-2458. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/bs.adcom.2021.10.010. – URL: https://www.researchgate.net/publication/357310080_The_major_challenges_of_big_graph_and_their_solutions_A_review (дата обращения: 17.06.2024).

192. Азерман, М.А. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики) / М.А. Азерман, Л.А. Гусев, С.В. Петров [и др.] // Исследования по теории структур. – Москва : Наука, 1988. – С. 5-76. – ISBN отсутствует.

193. Месарович, М.Д. Теория иерархических многоуровневых систем / М.Д. Месарович, Д. Мако, И. Такахар. – Москва : Мир, 1973. – 344 с. – ISBN отсутствует.

194. Охтилев, М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов : монография / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – Москва : Наука, 2006. – 410 с. – 550 экз. – ISBN 5-02-034127-0.

195. Акиншин, Р.Н. Обобщенная модель пространственно-распределенной системы обработки информации / Р.Н. Акиншин, Д.В. Шевченко, А.И. Чернышков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-1. – С. 32-38. – ISSN 2071-6168.

196. Зюзин, А.В. Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно-распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки / А.В. Зюзин, М.В. Кныш, С.Н. Разиньков [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – № 3. Том 22. – С. 600-609. – ISSN 2500-0373. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-putey-postroeniya-i-otsenka-effektivnosti-primeneniya-prostranstvenno-raspredelennoy-sistemy-informatsionnyh-sensorov> (дата обращения: 17.06.2024).

197. Ненашев, В.А. Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга : монография / В.А. Ненашев, А.А. Сенцов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – 191 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8088-1685-5.

198. Соколов, Б.В. Полимодельное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Труды СПИИРАН. – 2010. – № 4. – С. 7-52. – ISSN 2078-9181.

199. Кругликов, С.В. Модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы / С.В. Кругликов, И.В. Филипченко, А.Ю. Зализко [и др.] // Информатика. – 2019. – № 1. Том 16. – С. 58-74. – ISSN 1816-0301.

200. Рыжиков, Ю.И. Численные методы теории очередей : учебное пособие / Ю.И. Рыжиков. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 512 с. – ISBN 978-5-8114-4639-5.

201. Емеличев, В.А. Лекции по теории графов : учебное пособие / В.А. Емеличев, О.И. Мельников, В.И. Сарванов [и др.]. – Москва : Издательство URSS, 2009. – 392 с. – ISBN 978-5-397-00022-5.

202. Уилсон, Р. Введение в теорию графов / Р. Уилсон. – Москва : Мир, 1977. – 208 с. – ISBN отсутствует.

203. Харари, Ф. Теория графов / Ф. Харари. – Москва : Мир, 1973. – 304 с. – ISBN отсутствует.

204. Borodin, V.V. Multi-Agent Dynamic Model of the Multi-Criteria Information Interaction of Structural Elements of a Self-Organizing Data Transmission Network of a Ground-Air Monitoring System / V.V. Borodin, D.A. Kletskov, A.V. Timoshenko [et al.] // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2022. – Volume 61. – P. 990-1002. – ISSN 1064-2307. – Текст : электронный. – DOI 10.1134/S1064230722060053. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064230722060053> (дата обращения: 17.06.2024).

205. Chen, L. DHGEEP: A Dynamic Heterogeneous Graph-Embedding Method for Evolutionary Prediction / L. Chen, L. Wang, C. Zeng [et al.] // Mathematics. – 2022. – Volume 10. – ISSN 2227-7390. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/math10224193. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/22/4193> (дата обращения: 17.06.2024).

206. Aziz, T. Review on optimization methodologies in transmission network reconfiguration of power systems for grid resilience / T. Aziz, Z. Lin, M. Waseem [et al.] // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2021. – Volume 31. – ISSN 2050-7038. – Текст : электронный. – DOI 10.1002/2050-7038.12704. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2050-7038.12704> (дата обращения: 17.06.2024).

207. Krön, B. Growth of self-similar graphs / B. Krön // Journal of Graph Theory. – 2004. – Volume 45. – P. 224-239. – ISSN 0364-9024.

208. Gignoux, J. Emergence and complex systems: The contribution of dynamic graph theory / J. Gignoux, G. Le Provost, C. Parrott // Ecological Complexity. – 2017. – Volume 31. – P. 34-49. – ISSN 1476-945X.

209. Немировский, А.С. Основные концепции и результаты робастной оптимизации в применении к линейному программированию с неточными данными / А.С. Немировский // Cloud of science. – 2014. – № 2. Том 1. – С. 180-190. – ISSN 2409-3066.

210. Пролубников, А.В. Подходы к решению задач дискретной оптимизации с интервальной целевой функцией / А.В. Пролубников // Вычислительные технологии. – 2021. – № 6. Том 26. – С. 82-109. – ISSN 1560-7534.

211. Кофман, А. Введение в теорию нечётких множеств / А. Кофман. – Москва : Радио и связь, 1982. – 432 с. – ISBN отсутствует.
212. Прокофьев, В.С. Нечеткие алгоритмы планирования распределения ресурсов системы управления военного назначения / В.С. Прокофьев, В.А. Малышев // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2008. – № 3. – С. 50-53. – ISSN 1609-0736.
213. Нечеткие множества и теория возможностей / под редакцией Р.Р. Ягера. – Москва : Радио и связь, 1986. – 408 с. – ISBN отсутствует.
214. Дорожко, И.В. Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации / И.В. Дорожко, Н.А. Осипов // Труды СПИИРАН. – 2012. – № 1 (20). – С. 165-185. – ISSN 2078-9181.
215. Ногин, В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход : монография / В.Д. Ногин. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 144 с. – 400 экз. – ISBN 5-9221-0245-5.
216. Сирота, А.А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем : монография / А.А. Сирота. – Москва : Техносфера, 2006. – 280 с. – 2000 экз. – ISBN 5-94836-112-3.
217. Кучерявый, А.Е. Самоорганизующиеся сети : монография / А.Е. Кучерявый, А.В. Прокопьев, Е.А. Кучерявый. – Санкт-Петербург: Любавич, 2011. – 311 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-86983-478-8.
218. Шерешева, М.Ю. Формы сетевого взаимодействия компаний. Курс лекций : учебное пособие / М.Ю. Шерешева. – Москва : Издательский дом ГУ ВШЭ, 2010. – 339 с. – ISBN 978-5-7598-0768-3.
219. Тарасевич, Ю.Ю. Просачиваемость: теория, приложения, алгоритмы : монография / Ю.Ю. Тарасевич. – Москва : Издательство URSS, 2002. – 112 с. – 960 экз. – ISBN 5-354-00027-3.
220. Иванюк, В.А. Сетецентрические методы управления / В.А. Иванюк, Н.М. Абдикеев, Ф.Ф. Пащенко [и др.] // Управленческие науки. – 2017. – № 1. Том 7. – С. 26-34. – ISSN 2404-022X.

221. Кочкаров, А.А. Проектирование транспортно-логистических систем, устойчивых к структурным разрушениям / А.А. Кочкаров, Д.В. Яцкин, Р.А. Кочкаров // Теоретическая и прикладная экономика. – 2020. – № 1. – С. 1-9. – ISSN 2409-8647.

222. Amen, B. Big data directed acyclic graph model for real-time COVID-19 twitter stream detection / B. Amen, S. Faiz, T.-T. Do // Pattern Recognition. – 2022. – Volume 123. – Article 108404. – ISSN 0031-3203.

223. Костарева, Л.В. Сетевые структуры в экономическом пространстве региона / Л.В. Костарева // Общество, экономика, управление. – 2017. – № 2. – С. 33-36. – ISSN 2500-2740.

224. Абасов, Ф.Р. Правовые основы формирования сетевых экономических структур в современных условиях / Ф.Р. Абасов // Вектор науки ТГУ. Серия: Юридические науки. – 2012. – № 2 (9). – С. 10-12. – ISSN 2309-1705.

225. Гусеница, Я.Н. Концепция поддержки принятия решений задач сопровождения жизненного цикла сложных технических систем / Я.Н. Гусеница, А.А. Донченко, А.С. Ляскин // Научные исследования в космических исследованиях Земли. – 2024. – № 1. Том 16. – С. 31-38. – ISSN 2409-5419. – Текст : электронный. – DOI 10.36724/2409-5419-2024-16-1-31-38. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67654321> (дата обращения: 15.03.2025).

226. Соколова, И.С. Использование энтропийно-вероятностного моделирования в задачах мониторинга и управления сложными системами / И.С. Соколова, А.Н. Тырсин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 4. – С. 35-39. – ISSN 1818-7026.

227. Дорожко, И.В. Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации / И.В. Дорожко, Н.А. Осипов // Труды СПИИРАН. – 2012. – № 1 (20). – С. 165-185. – ISSN 2078-9181.

228. Кутузов, О.И. Общее в подходе к имитационному моделированию инфокоммуникационных и транспортных сетей / О.И. Кутузов, Т.М. Татарникова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – № 5. Том 19. – С. 912-917. – ISSN 2226-1494. – Текст : электронный. – DOI 10.17586/2226-1494-2019-19-5-912-917. – URL: <https://ntv.ifmo.ru/file/article/17103.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).

229. Huang, X. Eigenedge: A measure of edge centrality for big graph exploration / X. Huang, W. Huang // Journal of Computer Languages. – 2019. – Volume 55. – Article 100925. – ISSN 2590-1184.

230. Yildirim, M. Big data analytics for default prediction using graph theory / M. Yildirim, F.Y. Okay, S. Özdemir // Expert Systems with Applications. – 2021. – Volume 176. – Article 114840. – ISSN 0957-4174.

231. Aridhi, S. Big Graph Mining: Frameworks and Techniques / S. Aridhi, E.M. Nguifo // Big Data Research. – 2016. – Volume 6. – P. 1-10. – ISSN 2214-5796.

232. Chonbodeechalermroong, A. Towards Visualizing Big Data with Large-Scale Edge Constraint Graph Drawing / A. Chonbodeechalermroong, R. Hewett // Big Data Research. – 2017. – Volume 10. – P. 21-32. – ISSN 2214-5796.

233. Охтилев, М.Ю. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы / М.Ю. Охтилев, Н.Г. Мустафин, В.Е. Миллер [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2014. – № 11. Том 57. – С. 7-15. – ISSN 0021-3454.

234. Шайдулин, З.Ф. Проактивное управление составом и структурой системы пространственного мониторинга в условиях воздействия дестабилизирующих факторов / З.Ф. Шайдулин, М.Т. Балдычев, А.В. Тимошенко [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2021. – № 6. Том 21. – С. 848-857. – ISSN 2226-1494. – Текст : электронный. – DOI 10.17586/2226-1494-2021-21-6-848-857. – URL: <https://ntv.ifmo.ru/file/article/19340.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).

235. Новиков, Д.А. Рациональная интеллектуализация МАС / Д.А. Новиков // Теория активных систем-2011: Труды международной научно-практической конференции. Том 3. – Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2011. – С. 233-238. – ISBN отсутствует.

236. Liu, X. A feasible graph partition framework for parallel computing of big graph / X. Liu, Y. Zhou, X. Guan [et al.] // Knowledge-Based Systems. – 2017. – Volume 134. – P. 228-239. – ISSN 0950-7051.

237. Макаренко, С.И. Обеспечение устойчивости телекоммуникационной сети за счет ее иерархической кластеризации на области маршрутизации / С.И. Макаренко // Труды учебных заведений связи. – 2018. – № 4. Том 4. – С. 54-67. – ISSN 1813-324X.

238. Hu, K. Placing big graph into cloud for parallel processing with a two-phase community-aware approach / K. Hu, G. Zeng // Future Generation Computer Systems. – 2019. – Volume 101. – P. 1187-1200. – ISSN 0167-739X. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.future.2019.07.014. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X19303103> (дата обращения: 17.03.2025).

239. Назаров, А.Н. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения / А.Н. Назаров, К.И. Сычев. – Красноярск : Издательство Поликом, 2010. – 389 с. – ISBN отсутствует.

240. Пасечников, И.И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей / И.И. Пасечников. – Москва : Машиностроение-1, 2004. – 216 с. – ISBN отсутствует.

241. Gomez, J. New large graphs with given degree and diameter six / J. Gomez, I. Peayo, C. Balbuena // Networks. – 1999. – № 34 (2). – P. 154-161. – ISSN 0028-3045.

242. Егунов, М.М. Анализ структурной надёжности транспортной сети / М.М. Егунов, В.П. Шувалов // Вестник СибГУТИ. – 2012. – № 1 (17). – С. 54-60. – ISSN 1815-2630.

243. Newman, M.E.J. Networks: An Introduction / M.E.J. Newman. – Oxford, UK : Oxford University Press, 2010. – 772 p. – ISBN 978-0-19-920665-0.
244. Piraveenan, M. Percolation Centrality: Quantifying Graph-Theoretic Impact of Nodes during Percolation in Networks / M. Piraveenan // PLOS ONE. – 2013. – № 1. Volume 8. – Article e53095. – ISSN 1932-6203. – Текст : электронный. – DOI 10.1371/journal.pone.0053095. – URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0053095> (дата обращения: 17.03.2025).
245. Лавлинская, О.Ю. Применение теории графов в структурно-топологическом анализе информационных систем / О.Ю. Лавлинская, Т.В. Курченкова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия : Экономика. Информатика. – 2017. – № 23 (272). – С. 105-112. – ISSN 2075-4566.
246. Кочкаров, А.А. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты / А.А. Кочкаров, Г.Г. Малинецкий // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2005. – № 53. – С. 1-34. – ISSN 2071-2898.
247. Кочкаров, А.А. Метрические характеристики динамических графов и их применение / А.А. Кочкаров, Л.И. Сенникова // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2015. – № 18. – С. 236-241. – ISSN 1999-9429.
248. Кочкаров, А.А. О планарности и других топологических свойствах фрактальных графов / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2003. – № 83. – 18 с. – ISSN 2071-2898. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2003-83> (дата обращения: 17.03.2025).
249. Ахо, А.В. Структуры данных и алгоритмы / А.В. Ахо, Д.Э. Хопкрофт, Д.Д. Ульман. – Москва : Вильямс, 2007. – 400 с. – ISBN 978-5-8459-0987-9.
250. Кормен, Т.Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т.Х. Кормен, Ч.И. Лейзерсон, Р.Л. Ривест [и др.]. – Москва : Вильямс, 2006. – 1296 с. – ISBN 978-5-8459-0857-5.

251. Носков, С.И. Построение нелинейной свертки частных критериев эффективности в задаче векторной оптимизации / С.И. Носков // Вестник ВГУ. Серия : Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 4. – С. 30-36. – ISSN 1995-5499.

252. Reisch, J. Conflict resolving – A local search algorithm for solving large scale conflict graphs in freight railway timetabling / J. Reisch, P. Großmann, D. Pöhle [et al.] // European Journal of Operational Research. – 2021. – № 3. Volume 293. – P. 1143-1154. – ISSN 0377-2217.

253. Chou, C.-H. Querying large graphs in biomedicine with colored graphs and decomposition / C.-H. Chou, P. Sheu, M. Hayakawa [et al.] // Journal of Biomedical Informatics. – 2020. – Volume 108. – Article 103503. – ISSN 1532-0464.

254. Dokeroglu, T. Memetic Teaching–Learning–Based Optimization algorithms for large graph coloring problems / T. Dokeroglu, E. Sevinc // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2021. – Volume 102. – Article 104282. – ISSN 0952-1976.

255. Lu, Z. A hybrid evolutionary algorithm for finding low conductance of large graphs / Z. Lu, J.-K. Hao, Q. Wu // Future Generation Computer Systems. – 2020. – Volume 106. – P. 105-120. – ISSN 0167-739X.

256. Zheng, Y. Fast matching via ergodic Markov chain for super-large graphs / Y. Zheng, L. Pan, J. Qian [et al.] // Pattern Recognition. – 2020. – Volume 106. – Article 107418. – ISSN 0031-3203.

257. Garey, M.R. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness / M.R. Garey, D.S. Johnson. – San Francisco : W.H. Freeman and Company, 1979. – 340 p. – ISBN 0-7167-1045-5.

258. Le, N.-T. Mining weighted subgraphs in a single large graph / N.-T. Le, B. Vo, L.B.Q. Nguyen [et al.] // Information Sciences. – 2020. – Volume 514. – P. 149-165. – ISSN 0020-0255.

259. Kochkarov, R. Research of NP-Complete Problems in the Class of Prefractal Graphs / R. Kochkarov // Mathematics. – 2021. – № 21. Volume 9. – Article 2764. – ISSN 2227-7390.

260. Hinz, A.M. A survey and classification of Sierpiński-type graphs / A.M. Hinz, S. Klavžar, S.S. Zemljč // Discrete Applied Mathematics. – 2017. – Volume 217. – P. 565-600. – ISSN 0166-218X.
261. Moreno-Pulido, S. Temporal evolution of multifractality in the Madrid Metro subway network / S. Moreno-Pulido, P. Pavón-Domínguez, P. Burgos-Pintos // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – Volume 142. – Article 110370. – ISSN 0960-0779.
262. Тимошенко, А.В. Методика построения нижней границы критерия восстановления целевой функции сложного объекта мониторинга на основе перколяционного анализа его информационного пространства / А.В. Тимошенко, Д.А. Тавалинский, М.Т. Балдычев // Вооружение и экономика. – 2022. – № 4 (62). – С. 58-69. – ISSN 1999-3420.
263. Jacyna, I. Selected aspects of the optimization the structure of logistic system / I. Jacyna, J. Zak // 21st International Conference on Systems Engineering. – 2011. – P. 438-441. – ISBN 978-1-4577-0872-2.
264. Xue, B. Shortest paths in Sierpiński graphs / B. Xue, L. Zuo, G. Wang [et al.] // Discrete Applied Mathematics. – 2014. – Volume 162. – P. 314-321. – ISSN 0166-218X.
265. Lendermann, P. Grand challenges for discrete event logistics systems / P. Lendermann, L.F. McGinnis, L. Mönch [et al.] // Informatik Spektrum. – 2010. – № 6. Volume 33. – P. 663-668. – ISSN 0170-6012.
266. Li, Z. Large-scale online multi-view graph neural network and applications / Z. Li, Y. Xing, J. Huang [et al.] // Future Generation Computer Systems. – 2021. – Volume 116. – P. 145-155. – ISSN 0167-739X.
267. Lacroix, M. On the NP-completeness of the perfect matching free subgraph problem / M. Lacroix, A.R. Mahjoub, S. Martin [et al.] // Theoretical Computer Science. – 2012. – Volume 423. – P. 25-29. – ISSN 0304-3975.
268. Перепелица, В.А. Многокритериальные модели и методы для задач оптимизации на графах / В.А. Перепелица. – Саарбрюккен : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 336 с. – ISBN 978-3-659-49814-5.

269. Kochkarov, A.A. A parallel algorithm for searching for the shortest path on prefractal graphs / A.A. Kochkarov, R.A. Kochkarov // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2004. – Volume 44. – P. 1088-1092. – ISSN 0965-5425.
270. Макконнелл, Дж. Анализ алгоритмов. Вводный курс / Дж. Макконнелл. – Москва : Техносфера, 2002. – 304 с. – ISBN 5-94836-005-9.
271. Gavish, B. The travelling salesman problem and related problems / B. Gavish, S.C. Graves // Working paper GR-078-78. Operations Research Center. Massachusetts Institute of Technology. – 1978. – 30 p. – ISBN отсутствует.
272. Emelichev, V.A. Complexity of vector optimization problems on graphs / V.A. Emelichev, V.A. Perepeliza // Optimization. – 1991. – Volume 22. – P. 906-918. – ISSN 1029-4945.
273. Кульба, В.В. Применение структурно-интегрированных индикаторов в мониторинге сложных технических систем / В.В. Кульба, Д.С. Сомов, А.А. Кочкаров // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – № 3 (116). – С. 52-64. – ISSN 1999-9429.
274. Микрин, Е.А. Мониторинг функционирования сложных технических систем в условиях внешних угроз. Метод структурно-интегрированных индикаторов и иерархия моделей : монография / Е.А. Микрин, А.А. Кочкаров, Д.С. Сомов. – Москва : ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2010. – 54 с. – 100 экз. – ISBN отсутствует.
275. Тебуева, Ф.Б. Математические модели и методы для задач многокритериального выбора на графах в условиях недетерминированности исходных данных : специальность 05.13.18. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук / Тебуева Фериде Биляловна ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону, 2014. – 312 с. – Библиогр. 288-312.
276. Kochkarov, A.A. Prefractal graphs in designing compound structures / A.A. Kochkarov, R.A. Kochkarov // Keldysh Institute Preprints. – 2003. – № 10. – P. 1-21. – ISSN 2071-2894. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2003-10> (дата обращения: 20.05.2025).

277. Кочкаров, А.А. Предфрактальные графы в проектировании и анализе сложных структур / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. – 2003. – № 10. – 24 с. – ISSN 2071-2894.

278. Komjáthy, J. Generating hierarchical scale-free graphs from fractals / J. Komjáthy, K. Simon // Chaos, Solitons & Fractals. – 2011. – Volume 44. – P. 651-666. – ISSN 0960-0779.

279. Kochkarov, R. Introduction to the Class of Prefractal Graphs / R. Kochkarov, A. Kochkarov // Mathematics. – 2022. – № 9. Volume 10. – P. 1-15. – ISSN 2227-7390.

280. Кочкаров, Р.А. Блоки и затравки канонического предфрактального графа / Р.А. Кочкаров // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Труды XXII Международной конференции ; под редакцией Н.И. Архиповой, В.В. Кульбы. – Москва : РГГУ, 2014. – С. 326-328. – ISBN 978-5-7281-1589-7.

281. Kochkarov, A.A. Parallel algorithm for finding the shortest path on a prefractal graph / A.A. Kochkarov, R.A. Kochkarov // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2004. – № 7. Volume 44. – P. 1157-1162. – ISSN 0965-5425.

282. Коркмазова, З.О. Алгоритм порождения ориентированного эйлерова предфрактального графа / З.О. Коркмазова, А.А. Кочкаров // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2006. – № 3 (7). – С. 55-60. – ISSN 1999-8421.

283. Коркмазова, З.О. Алгоритмы с оценками построения покрытия эйлеровыми циклами на предфрактальном графе / З.О. Коркмазова, Р.А. Кочкаров // Препринт CAO РАН. – 2005. – № 209. – 28 с. – ISSN отсутствует.

284. Байрамукова, З.Х. Алгоритм вычисления определителей предфрактальных графов с полными затравками, сохраняющих смежность старых ребер / З.Х. Байрамукова, А.М. Кочкаров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 87. – С. 1-11. – ISSN 1990-4665.

285. Байрамукова, З.Х. Спектры предфрактальных графов с затравками – циклами, сохраняющих смежность старых ребер / З.Х. Байрамукова, А.М. Кочкаров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 81. – С. 93-102. – ISSN 1990-4665.

286. Кочкаров, Р.А. Неканонический предфрактальный граф с затравкой – треугольник / Р.А. Кочкаров // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Труды XXII Международной конференции ; под редакцией Н.И. Архиповой, В.В. Кульбы. – Москва : Российский государственный гуманитарный университет, 2014. – С. 296-298. – ISBN 978-5-7281-1589-7.

287. Малинецкий, Г.Г. Модель иерархической организации / Г.Г. Малинецкий, М.С. Шакаева // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 1995. – № 39. – ISSN отсутствует.

288. Касьянов, В.Н. Модель атрибутированных иерархических графов с портами для визуализации сложно структурированной информации / В.Н. Касьянов, Е.В. Касьянова // Преподавание информационных технологий в российской Федерации: Сборник научных трудов Двадцать первой открытой Всероссийской конференции, Нижний Новгород, 18-19 мая 2023 года. – Нижний Новгород : Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2023. – 10 с. – ISBN 978-5-91326-809-9.

289. Abu-Elanien, A.E.B. Modern network reconfiguration techniques for service restoration in distribution systems: A step to a smarter grid / A.E.B. Abu-Elanien, M.M.A. Salama, K.B. Shaban // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – Volume 57. – P. 3959-3967. – ISSN 1110-0168.

290. Губанов, Д.А. Сети: модели информационного влияния, управления и противоборства : монография / Д.А. Губанов, Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили. – Москва : Физматлит, 2010. – 228 с. – 300 экз. – ISBN 978-5-9221-1226-6.

291. Кочкаров, А.А. Моделирование структурного разрушения систем / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2007): Труды VII Международной конференции ; под редакцией З.К. Авдеевой, С.В. Ковриги. – Москва : Институт проблем управления РАН, 2007. – С. 146-149. – ISBN 978-5-91450-009-9.

292. Кочкаров, А.А. Потокное моделирование структурного разрушения сложных систем / А.А. Кочкаров, М.Б. Салпагаров, Р.А. Кочкаров // Труды XIV Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Том II. – Москва : Российский государственный гуманитарный университет, 2006. – С. 454-456. – ISBN 5-7281-0872-3

293. Big Graph Analytics: Techniques, Tools, Challenges, and Applications / Data Analytics: Concepts, Techniques, and Applications ; под редакцией М.В. Joseph, С. К. Wong. – 2018. – С. 195-227. – ISBN 978-1-138-56514-8.

294. Fan, W. Big Graph Analyses: From Queries to Dependencies and Association Rules / W. Fan, C. Hu // Data Science and Engineering. – 2017. – Volume 2. – P. 36-55. – ISSN 2364-1185.

295. Кочкаров, Р.А. Параллельный алгоритм выделения совершенного паросочетания на предфрактальном графе / Р.А. Кочкаров // Материалы Девятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Четвертой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог : Южный федеральный университет, 2014. – С. 345-356. – ISBN 978-5-9275-1391-9.

296. Кочкаров, Р.А. Параллельные алгоритмы и задачи многокритериальной дискретной оптимизации на масштабно-инвариантных (предфрактальных) графах / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров // Труды Пятой Международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО'2010. Москва, 26-28 октября 2010 г. – Москва : ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2010. – С. 265–280. – ISBN 978-5-91450-096-0.

297. Hansen, P. Bicriterion Path Problems // Multiple Criteria Decision Making Theory and Application ; edited by G. Fandel, T. Gal. – Berlin, Heidelberg : Springer, 1980. – P. 109-127. – ISBN 978-3-540-10071-5.
298. Hamacher, H.W. On spanning tree problems with multiple objectives / H.W. Hamacher, G. Ruhe // Annals of Operations Research. – 1994. – Volume 52. – P. 209-230. – ISSN 0254-5330.
299. Gomory, R.E. Multiterminal network flows / R.E. Gomory, T.C. Hu // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1961. – Volume 9. – P. 551-570. – ISSN 0368-4245.
300. Форд, Л. Потоки в сетях / Л. Форд, Д. Фалкерсон. – Москва : Мир, 1966. – 277 с. – ISBN отсутствует.
301. Михайлов, Р.Л. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов / Р.Л. Михайлов, С.И. Макаренко // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 4 (12). – С. 69-79. – ISSN 2221-2574.
302. Молев, А.А. Имитационная модель функционирования системы сверхширокополосной радиосвязи в условиях воздействия помех / А.А. Молев, К.Д. Титов // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 1. – ISSN 1684-1719. – Текст : электронный. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.1.1. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan21/1/abstract.html> (дата обращения: 20.05.2025).
303. Малинецкий, Г.Г. Управление риском : монография / Г.Г. Малинецкий, Н.А. Митин, А.В. Подлазов [и др.]. – Москва : Наука, 2000. – 431 с. – 200 экз. – ISBN 5-02-002559-2.
304. Harary, F. Graph Theory / F. Harary. – Reading, MA : Addison-Wesley, 1969. – 274 p. – ISBN 0-201-41033-8.
305. Christofides, N. Graph Theory: An Algorithmic Approach / N. Christofides. – London ; New York : Academic Press, 1975. – 400 p. – ISBN 0-12-174350-0.
306. Garey, M.R. Some simplified NP-complete problems / M.R. Garey, D.S. Johnson, L. Stockmeyer // Proceedings of the sixth annual ACM symposium on Theory of computing (STOC '74). – New York, USA, 1974. – P. 47-63. – ISBN отсутствует.

307. Karci, A. Finding Innovative and Efficient Solutions to NP-Hard and NP-Complete Problems in Graph Theory / A. Karci // Computer Science. – 2020. – Volume 5. – P. 137-143. – ISSN 2458-9090.

308. Martínez-Pérez, I.M. Parallel bioinspired algorithms for NP-complete graph problems / I.M. Martínez-Pérez, K.-H. Zimmermann // Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2009. – Volume 69. – P. 221-229. – ISSN 0743-7315.

309. Liberatore, F. A Comparison of Local Search Methods for the Multicriteria Police Districting Problem on Graph / F. Liberatore, M. Camacho-Collados // Mathematical Problems in Engineering. – 2016. – Volume 2016. – P. 1-13. – ISSN 1024-123X.

310. Armenatzoglou, N. Real-Time Multi-Criteria Social Graph Partitioning: A Game Theoretic Approach / N. Armenatzoglou, H. Pham, V. Ntranos [et al.] // Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '15). – New York, USA, 2015. – P. 1617-1628. – ISBN 978-1-4503-2758-9.

311. Есиков, Д.О. Задачи обеспечения устойчивости функционирования распределенных информационных систем / Д.О. Есиков // Программные продукты и системы. – 2015. – № 4 (112). – С. 133-141. – ISSN 0235-6638.

312. Орлова, Д.Е. Устойчивость решений при обеспечении функционирования организационно-технических систем / Д.Е. Орлова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – № 1 (20). Том 6. – С. 325-336. – ISSN 2310-6018.

313. Galand, L. Bidirectional Preference-based Search for Multiobjective State Space Graph Problems / L. Galand, A. Ismaili, P. Perny [et al.] // Proceedings of the 6th Annual Symposium on Combinatorial Search (SoCS 2013). – Palo Alto, CA : AAAI Press, 2013. – P. 80-88. – ISBN 978-1-57735-618-1.

314. Belhoul, L. An efficient procedure for finding best compromise solutions to the multi-objective assignment problem / L. Belhoul, L. Galand, D. Vanderpooten // Computers & Operations Research. – 2014. – Volume 49. – P. 97-106. – ISSN 0305-0548.

315. Hocine, I. Reachability in big graphs: A distributed indexing and querying approach / I. Hocine, S. Yahiaoui, A. Bendjoudi [et al.] // Information Sciences. – 2021. – Volume 573. – P. 541-561. – ISSN 0020-0255.

316. Kushwaha, R.C. Big graph based online learning through social networks // Advances in Computers. – 2022. – Volume 127. – P. 123-164. – ISSN 0065-2458.

317. Ногин, В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач : монография / В.Д. Ногин, В.В. Подиновский. – Москва : Физматлит, 2007. – 256 с. – 1000 экз. – ISBN 978-5-9221-0836-8.

318. Vizing, V.G. Multicriteria graph problems with the MAXMIN criterion // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2012. – Volume 6. – P. 256-260. – ISSN 1990-4789.

319. Кочкаров, А.А. Оценка структурной устойчивости транспортно-логистических систем при решении оптимизационных задач / А.А. Кочкаров, Д.В. Яцкин, Р.А. Кочкаров // Нелинейный мир. – 2019. – № 5. Том 17. – С. 14-23. – ISSN 1819-2665.

320. Huh, J.-H. Hierarchical System Decomposition Using Genetic Algorithm for Future Sustainable Computing / J.-H. Huh, J. Hwa, Y.-S. Seo // Sustainability. – 2020. – Volume 12. – ISSN 2071-1050. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/su12062177. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/6/2177> (дата обращения: 20.05.2025).

321. Кочкаров, Р.А. Полиномиальные быстрые алгоритмы нахождения остовного дерева минимального веса / Р.А. Кочкаров, С.И. Салпагаров ; Всероссийский институт научной и технической информации РАН. – Москва, 2003. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 12.03.2003, № 437-B2003.

322. Салпагаров, С.И. Параллельный алгоритм поиска остовного дерева минимального веса на предфрактальном графе / С.И. Салпагаров, Р.А. Кочкаров // Тезисы V Всероссийского симпозиума «Математическое моделирование и компьютерные технологии». – Кисловодск : Кисловодский институт экономики и права, 2002. – С. 50-52. – ISSN отсутствует.

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

324. Gavril, F. Some NP-complete problems on graphs / F. Gavril // The 1977 Conference on Information Sciences and Systems, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland. – Technion: Computer Science Department, 2011. – P. 91-95. – Текст : электронный. – DOI отсутствует. – URL: <http://www.cs.technion.ac.il/users/wwwb/cgi-bin/tr-get.cgi/2011/CS/CS-2011-05.pdf> (дата обращения: 20.05.2025).

325. Xue, B. The hamiltonicity and path t-coloring of Sierpiński-like graphs / B. Xue, L. Zuo, G. Li // Discrete Applied Mathematics. – 2012. – Volume 160. – P. 1822-1836. – ISSN 0166-218X.

326. Cicalese, F. On the star decomposition of a graph: Hardness results and approximation for the max–min optimization problem / F. Cicalese, E.S. Laber // Discrete Applied Mathematics. – 2021. – Volume 289. – P. 503-515. – ISSN 0166-218X.

327. Батчаев, И.З. Об одной многокритериальной задаче покрытия минимального веса предфрактального графа звёздами ранговых типов / И.З. Батчаев, А.М. Кочкаров // Математическое моделирование и компьютерные технологии материалы IV Всероссийского симпозиума. – Кисловодск : Кисловодский институт экономики и права, 2000. – С. 7-9. – ISSN отсутствует.

328. Zadeh, L.A. Fuzzy sets / L.A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Volume 8. – P. 338-353. – ISSN 0019-9958.

329. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений / Л. Заде. – Москва : Мир, 1976. – 46 с. – ISBN отсутствует.

330. Babai, L. Graph isomorphism in quasipolynomial time / L. Babai // Proceedings of the forty-eighth annual ACM symposium on Theory of Computing (STOC '16). – New York, NY, USA : ACM, 2016. – P. 684-697. – ISBN 978-1-4503-4132-5.

331. Павлов, Д.А. Мера сходства предфрактальных графов / Д.А. Павлов // Параллельная компьютерная алгебра и её приложения в новых инфокоммуникационных системах. Материалы I международной научной конференции. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2014. – С. 81-86. – ISBN 978-5-9296-0733-5.
332. Klavžar, S. Hamming dimension of a graph–The case of Sierpiński graphs / S. Klavžar, I. Peterin, S.S. Zemljč // European Journal of Combinatorics. – 2013. – Volume 34. – P. 460-473. – ISSN 0195-6698.
333. Wang, Z. VSIM: Distributed local structural vertex similarity calculation on big graphs / Z. Wang, S. Wang, J. Li [et al.] // Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2021. – Volume 158. – P. 29-46. – ISSN 0743-7315.
334. Minieka, E. Optimization Algorithms for Networks and Graphs : monograph / E. Minieka. – New York : Marcel Dekker, Inc., 1978. – 356 p. – ISBN отсутствует.
335. Murty, K.G. Some NP-complete problems in quadratic and nonlinear programming / K.G. Murty, S.N. Kabadi // Mathematical Programming. – 1987. – Volume 39. Issue 2. – P. 117-129. – ISSN 0025-5610.
336. Ben Othman, H. A Distributed Honeybee optimization algorithm for the graph-K-partitioning problem / H. Ben Othman, S. Bouamama // Procedia Computer Science. – 2021. – Volume 192. – P. 4008-4016. – ISSN 1877-0509.
337. Asdre, K. NP-completeness results for some problems on sub-classes of bipartite and chordal graphs / K. Asdre, S.D. Nikolopoulos // Theoretical Computer Science. – 2007. – Volume 381. Issue 1-3. – P. 248-259. – ISSN 0304-3975.
338. Bondarenko, V.A. Lexicographic optimization in multicriterial discrete problems / V.A. Bondarenko, P.E. Kloeden, M.V. Krasnov // Automation and Remote Control. – 2000. – Volume 61. Issue 2. – P. 200-205. – ISSN 0005-1179.
339. Асанов, М.О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы : учебное пособие / М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин. – Ижевск : Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 288 с. – ISBN 5-89806-050-7.

340. Ерусалимский, Я.М. Дискретная математика: теория, задачи, приложения : учебное пособие / Я.М. Ерусалимский. – Москва : Вузовская книга, 2001. – 279 с. – ISBN 5-9502-0007-4.
341. Kasarkin, A.V. New iteration parallel-based method for solving graph NP-complete problems with reconfigurable computer systems / A.V. Kasarkin, I.I. Levin, D.A. Sorokin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Volume 919. – P. 1-8. – ISSN 1757-8981.
342. Dantas, S. A General Method for Forbidden Induced Subgraph Sandwich Problem / S. Dantas, C.M.H. de Figueiredo, P. Petit [et al.] // Journal of Discrete Algorithms. – 2008. – Volume 6. Issue 1. – P. 173-182. – ISSN 1570-8667.
343. Perepelitsa, V.A. Recognition of fractal graphs / V.A. Perepelitsa, I.V. Sergienko, A.M. Kochkarov // Cybernetics and Systems Analysis. – 1999. – Volume 35. Issue 4. – P. 572-585. – ISSN 1060-0396.
344. Estrada-Moreno, A. On the General Randić index of polymeric networks modelled by generalized Sierpiński graphs / A. Estrada-Moreno, J.A. Rodríguez-Velázquez // Discrete Applied Mathematics. – 2019. – Volume 263. – P. 140-151. – ISSN 0166-218X.
345. Komjáthy, J. Generating hierarchial scale-free graphs from fractals / J. Komjáthy, K. Simon // Chaos, Solitons & Fractals. – 2011. – Volume 44. Issue 8. – P. 651-666. – ISSN 0960-0779.
346. Hinz, A.M. An efficient algorithm to determine all shortest paths in Sier-piński graphs / A.M. Hinz, C. Holz auf der Heide // Discrete Applied Mathematics. – 2014. – Volume 177. – P. 111-120. – ISSN 0166-218X.
347. Criado-Alonso, Á. Enriched line graph: A new structure for searching language collocations / Á. Criado-Alonso, E. Battaner-Moro, D. Aleja [et al.] // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – Volume 142. – 13 p. – ISSN 0960-0779.
348. Кочкаров, А.М. Распознавание фрактальных графов. Алгоритмический подход / А.М. Кочкаров. – Нижний Архыз : РАН CAO, 1998. – ISBN отсутствует.

349. Кочкаров, А.А. Параллельные алгоритмы на предфрактальных графах / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. – 2003. – № 84. – 20 с. – ISSN 2071-2894.
350. Han, Y. Efficient parallel algorithms for computing all pair shortest paths in directed graphs / Y. Han, V.Y. Pan, J.H. Reif // *Algorithmica*. – 1997. – Volume 17. Issue 4. – P. 399-415. – ISSN 0178-4617.
351. Воеводин, В.В. Параллельные вычисления / В.В. Воеводин. – Санкт-Петербург : Издательство БХВ-Петербург, 2002. – 608 с. – ISBN 5-94157-160-7.
352. Emelichev, V.A. On some algorithmic problems of multicriterion optimization on graphs / V.A. Emelichev, V.A. Perepelitsa // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 1989. – Volume 29, Issue 1. – P. 117-125. – ISSN 0041-5553.
353. Емеличев, В.А. Сложность дискретных многокритериальных задач / В.А. Емеличев, В.А. Перепелица // *Дискретная математика*. – 1994. – Том 6. Выпуск 1. – С. 3-33. – ISSN 0234-0860.
354. Fandel, G. Multiple Criteria Decision Making Theory and Application. Proceedings of the Third Conference Hagen / G. Fandel, T. Gal. – Berlin, Heidelberg : Springer, 1980. – 570 p. – ISBN 978-3-540-10071-5.
355. Galand, L. Interactive Search for Compromise Solutions in Multicriteria Graph Problems / L. Galand // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2006. – Volume 39. Issue 2. – P. 129-134. – ISSN 1474-6670.
356. Букка, Е.С. Алгоритм нахождения внешнего центра предфрактального графа с применением процедуры Флойда / Е.С. Букка, Р.А. Кочкаров // Материалы Шестой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Третьей молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог : Издательство ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 260-264. – ISBN отсутствует.

357. Букка, Е.С. Алгоритм размещения p -медианы $(L-1)$ -ранга на предфрактальном графе / Е.С. Букка, Р.А. Кочкаров // Материалы Шестой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Третьей молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог : Издательство ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 259-260. – ISBN отсутствует.

358. Coley, H.W. Shortest paths in networks with vector weights / H.W. Coley, J.D. Moon // Journal of Optimization Theory and Applications. – 1985. – Volume 46. Issue 1. – P. 79-86. – ISSN 0022-3239.

359. Sergienko, I.V. Finding the set of alternatives in discrete multicriterion problems / I.V. Sergienko, V.A. Perepelitsa // Cybernetics. – 1987. – Volume 23. Issue 5. – P. 673-683. – ISSN 0011-4235.

360. Кочкаров, Р.А. Параллельный алгоритм поиска кратчайшего пути на предфрактальном графе, смежность старых ребер которого не нарушается / Р.А. Кочкаров, У.М. Салпагаров // Материалы Международного Российско-узбекского симпозиума «Уравнения смешанного типа и родственные проблемы анализа и информатики, и Школы молодых ученых Нелокальные краевые задачи и проблемы современного анализа и информатики» (Нальчик-Эльбрус, 18-25 мая 2003 г.). – Нальчик : Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2003. – С. 126. – ISBN отсутствует.

361. Кочкаров, А.А. Многокритериальная задача размещения p -медианы на предфрактальном графе / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Вторая научная конференция по математической экономике и эконометрике, посвященная памяти В.А. Колемаева: Тезисы докладов. – Москва : Вега-Инфо, 2010. – С. 18-21. – ISBN отсутствует.

362. Camerini, P.M. On the complexity of finding multi-constrained spanning trees / P.M. Camerini, G. Galbiati, F. Maffioli // Discrete Applied Mathematics. – 1983. – Volume 5. Issue 1. – P. 39-50. – ISSN 0166-218X.

363. Perepelitsa, V.A. On finding sets of alternatives for the discrete multiobjective problems / V.A. Perepelitsa // System Modelling and Optimization. Lecture Notes in Control and Information Sciences. – Berlin, Heidelberg : Springer, 1990. – Volume 143. – P. 530-539. – ISBN 978-3-540-52944-0.

364. Teufl, E. Enumeration of matchings in families of self-similar graphs / E. Teufl, S. Wagner // Discrete Applied Mathematics. – 2010. – Volume 158. Issue 15. – P. 1524-1535. – ISSN 0166-218X.

365. Gong, H. A general method for computing Tutte polynomials of self-similar graphs / H. Gong, X. Jin // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2017. – Volume 483. – P. 117-129. – ISSN 0378-4371.

366. Johnson, D.B. Optimal algorithms for the single and multiple vertex updating problems of a minimum spanning tree / D.B. Johnson, P. Metaxas // Algorithmica. – 1996. – Volume 16. Issue 4-5. – P. 633-648. – ISSN 0178-4617.

367. Бочаров, Н.В. Технологии и техника параллельного программирования / Н.В. Бочаров // Программирование. – 2003. – № 1. – С. 5-23. – ISSN 0132-3474.

368. Воеводин, В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах / В.В. Воеводин. – Москва : Наука, 1986. – 296 с. – ISBN отсутствует.

369. Салпагарова, Л.У. Параллельный алгоритм выделения р-медианы предфрактального графа / Л.У. Салпагарова, Р.А. Кочкаров // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2008. – Том 15. Выпуск 5. – С. 921-922. – ISSN 0208-3219.

370. Узденов, А.А. Алгоритм поиска внешнего центра предфрактального графа / А.А. Узденов, Е.С. Букка, Р.А. Кочкаров // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2010. – № 5 (37). – С. 31-36. – ISSN 1991-2290.

371. Узденов, А.А. Алгоритм поиска внешне-внутреннего центра предфрактального графа с сохранением смежности старых ребер / А.А. Узденов, Р.А. Кочкаров // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 3 (101). – С. 145-149. – ISSN 1998-1043.

372. Букка, Е.С. Параллельный алгоритм поиска внутреннего центра предфрактального графа / Е.С. Букка, Р.А. Кочкаров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 6 (113). – С. 106-108. – ISSN 1998-1043.

373. Букка, Е.С. Параллельный алгоритм поиска внешнего центра предфрактального графа / Е.С. Букка, Р.А. Кочкаров, И.Н. Рубежная // Перспективы науки. Математические методы и модели. – 2010. – № 4 (06). – С. 25-29. – ISSN 2077-6810.

374. Узденов, А.А. Оценка сложности алгоритма выделения центра предфрактального графа, смежность старых ребер которого сохраняется / А.А. Узденов, Р.А. Кочкаров, Г.З. Урусова // Материалы Шестой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Третьей молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог : Издательство ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 283-286. – ISBN отсутствует.

375. Кочкаров, А.А. Параллельные алгоритмы поиска решений оптимизационных задач на масштабно-инвариантных графах большой размерности / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Материалы IX Международной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки» (23-27 октября 2006 г.). – Москва : Издательство механико-математического факультета МГУ, 2006. – Том 1, часть 1. – С. 147-150. – ISBN отсутствует.

376. Салпагаров, С.И. Параллельный алгоритм поиска совершенного паросочетания на предфрактальном графе / С.И. Салпагаров, Р.А. Кочкаров // Тезисы V Всероссийского симпозиума «Математическое моделирование и компьютерные технологии». – Кисловодск : КИЭП, 2002. – С. 115-117. – ISBN отсутствует.

377. Орловский, С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский. – Москва : Наука, 1981. – 208 с. – ISBN отсутствует.

378. Peng, H. Dynamic graph convolutional network for long-term traffic flow prediction with reinforcement learning / H. Peng, B. Du, M. Liu [et al.] // Information Sciences. – 2021. – Volume 578. – P. 401-416. – ISSN 0020-0255.

379. Impedovo, A. Condensed representations of changes in dynamic graphs through emerging subgraph mining / A. Impedovo, C. Loglisci, M. Ceci [et al.] // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2020. – Volume 94. – Article 103830. – ISSN 0952-1976.

380. Harary, F. Dynamic graph models / F. Harary, G. Gupta // Mathematical and Computer Modelling. – 1997. – Volume 25. Issue 7. – P. 79-87. – ISSN 0895-7177.

381. Dimitrova, N.S. Extended interval arithmetics: new results and applications / N.S. Dimitrova, S.M. Markov, E.D. Popova // Computer Arithmetic and Enclosure Methods. – Amsterdam : Elsevier, 1992. – P. 225-232. – ISBN 978-0-444-89449-0.

382. Neumaier, A. Interval methods for systems of equations / A. Neumaier. – Cambridge : Cambridge University Press, 1990. – 272 p. – ISBN 978-0-521-37320-2.

383. Хансен, Э. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа / Э. Хансен, Дж.У. Уолстер. – Ижевск : Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2012. – 292 с. – ISBN 978-5-4344-0024-3.

384. Kunjur, A. A robust multi-criteria optimization approach / A. Kunjur, S. Krishnamurthy // Mechanism and Machine Theory. – 1997. – Volume 32. Issue 7. – P. 797-810. – ISSN 0094-114X.

385. Majumder, S. Multi-criteria shortest path for rough graph / S. Majumder, S. Kar // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2018. – Volume 9. Issue 6. – P. 1835-1859. – ISSN 1868-5137.

386. Kumar, M.K. A new algorithm to compute pareto-optimal paths in a multi objective fuzzy weighted network / M.K. Kumar, V.N. Sastry // OPSEARCH. – 2013. – Volume 50. Issue 2. – P. 297-318. – ISSN 0030-3887.

387. Кочкаров, Р.А. Многокритериальная задача о назначениях на предфрактальном графе / Р.А. Кочкаров // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы семнадцатого научно-практического семинара. – Москва : ИПМ им. М.В. Келдыша, 2014. – С. 319-328. – ISBN отсутствует.

388. Узденов, А.А. Об одной многокритериальной задаче выделения p -центров на предфрактальном графе / А.А. Узденов, Р.А. Кочкаров // Материалы III Международной конференции «Нелокальные краевые задачи и родственные проблемы математической биологии, информатики и физики». – Нальчик : Кабардино-Балкарский научный центр РАН, 2006. – С. 286-288. – ISBN отсутствует.

389. Павлов, Д.А. Многокритериальная задача покрытия предфрактального графа простыми цепями : специальность 01.01.09. Дискретная математика и математическая кибернетика : диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук / Павлов Дмитрий Александрович ; Таганрогский государственный радиотехнический университет. – Таганрог, 2004. – 118 с. – Библиогр. 101-111.

390. Кочкаров, А.А. Распространение внешних воздействий по структуре сложной системы / А.А. Кочкаров, Г.Г. Малинецкий // Математическое моделирование. – 2006. – № 2. Том 18. – С. 51-60. – ISSN 0234-0879.

391. Кочкаров, Р.А. Многокритериальная задача сетевого планирования разработки сложной технической системы / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров, А.М. Казанцев // Хроноэкономика. – 2019. – № 1 (14). – С. 10-14. – ISSN 2500-3054.

392. Кочкаров, Р.А. Формализация целевых программ / Р.А. Кочкаров, А.А. Кочкаров // Модели экономических систем и информационные технологии : сборник научных трудов ; под общей редакцией О.В. Голосова. – Москва : Финансовая академия, 2004. – С. 61-72. – ISBN 5-7940-0220-4.

393. Кочкаров, Р.А. Планирование и программно-целевые методы в России / Р.А. Кочкаров, Л.М. Эльканова // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2008. – № 3. Том 6. – С. 104-108. – ISSN 2070-4829.

394. Кочкаров, А.А. Новые подходы в моделировании сетевых систем / А.А. Кочкаров, Л.И. Сенникова, А.А. Халикова ; Финансовый университет. – Москва : Финансовый университет, 2013. – 44 с. – ISBN отсутствует.

395. Kochkarov, A.M. Modeling destruction of network systems: graph-theoretic approach / A.A. Kochkarov, A.M. Kochkarov, L.U. Salpagarova // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2009. – № 5 (94). – С. 234-240. – ISSN 1999-9429.

396. Кочкаров, А.А. Использование предфрактальных графов в проектировании сложных информационных сетей / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Проблемы функционирования информационных сетей. – 2006. – С. 148-152. – ISSN отсутствует.

397. Malinetskii, G.G. Issues of dynamic graph theory / G.G. Malinetskii, A.A. Kochkarov, R.A. Kochkarov // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2015. – Volume 55. – P. 1590-1596. – ISSN 0965-5425.

398. Ohya, M. New quantum algorithm for studying NP-complete problems / M. Ohya, I.V. Volovich // Reports on Mathematical Physics. – 2003. – Volume 52. Issue 1. – P. 25-33. – ISSN 0034-4877.

399. Agbaria, A. Communication–processor tradeoffs in a limited resources PRAM / A. Agbaria, Y. Ben-Asher, I. Newman // Algorithmica. – 2002. – № 34. – P. 276-297. – ISSN 0178-4617.

400. Moore, R.E. Interval analysis / R.E. Moore. – Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1966. – 145 p. – ISBN 978-0134689538.

401. Барлоу, Р. Математическая теория надёжности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – Москва : Советское радио, 1969. – 488 с. – ISBN отсутствует.

402. Барлоу, Р. Статистическая теория надёжности и испытание на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – Москва : Наука, 1984. – 328 с. – ISBN отсутствует.

403. Казаковцева, Е.В. Нечеткие системы финансово-экономического анализа предприятий и регионов / Е.В. Казаковцева, А.В. Коваленко, М.Х. Уртенев. – Краснодар : Кубанский государственный университет, 2013. – 300 с. – ISBN отсутствует.

404. Коваленко, А.В. Математические основы финансово-экономического анализа. Часть 1. Многомерный статистический анализ / А.В. Коваленко, М.Х. Уртенев, У.А. Узденов. – Москва, Кубанский государственный университет, 2010. – 304 с. – ISBN 5-8333-0131-0.

405. Кочкаров, А.А. О количественных оценках топологических характеристик предфрактальных графов / А.А. Кочкаров, С.И. Салпагаров, Р.А. Кочкаров // Известия ТРТУ. – 2004. – № 8 (43). – С. 298-301. – ISSN 1999-7280.

406. Каппушева, Т.Л. Плоскостная укладка и алгоритмы визуализации фрактальных графов / Т.Л. Каппушева, Н.В. Кононова, Р.А. Кочкаров // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 305-312. – ISSN 1999-7280.

407. Кононова, Н.В. Алгоритмические вопросы раскраски предфрактальных и фрактальных графов / Н.В. Кононова, Р.А. Кочкаров // Исследовано в России. – 2006. – № 258. – С. 2490-2500. – ISSN 1608-8298.

408. Кононова, Н.В. Параллельный алгоритм раскраски предфрактального графа / Н.В. Кононова, Р.А. Кочкаров, И.Н. Рубежная // Перспектива-2010 : материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Нальчик : Издательство КБГУ, 2010. – С. 50-54. – ISBN 978-5-7558-0428-8.

409. Кочкаров, А.А. Оптимизационные задачи на масштабно-инвариантных графах большой размерности и параллельные алгоритмы поиска их решений / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного изделия (SICPRO'07) : труды VI Международной конференции. – Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2007. – С. 1009-1020. – ISBN 5-94191-020-2.

410. Кочкаров, А.А. Особенности конструирования параллельных алгоритмов для решения классических задач теории графов (на примере класса фрактальных графов) / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2005) : труды Первой Международной конференции : в 2 томах. Том 1. – Москва : КомКнига, 2005. – С. 170-174. – ISBN 5-94382-073-1.

411. Кочкаров, А.А. Параллельный алгоритм поиска бикомпонент предфрактального графа / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону : материалы VIII Региональной научно-технической конференции. – Ставрополь : Северо-Кавказский государственный технический университет, 2004. – С. 13. – ISBN 5-9296-0177-5.

412. Imre, M. Spectrum-preserving sparsification for visualization of big graphs / M. Imre, J. Tao, Y. Wang [et al.] // Computers & Graphics. – 2020. – Volume 87. – P. 89-102. – ISSN 0097-8493.

413. Cheong, S.-H. Online force-directed algorithms for visualization of dynamic graphs / S.-H. Cheong, Y.-W. Si, R.K. Wong // Information Sciences. – 2021. – Volume 556. – P. 223-255. – ISSN 0020-0255.

414. Zegzhda, P.D. The Use of Adjacency Series for Recognition of Prefractal Graphs in Assessing VANET Cybersecurity / P.D. Zegzhda, D.V. Ivanov, D.A. Moskvina [et al.] // Automatic Control and Computer Sciences. – 2018. – Volume 52. – P. 901-905. – ISSN 0146-4116.

415. Кочкаров, А.А. Топологические характеристики предфрактальных графов и предупреждение кризисов сложных систем / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Проблемы управления безопасностью сложных систем : труды X Международной конференции. – Москва : Российский государственный гуманитарный университет, 2002. – С. 116-119. – ISBN 5-7281-0635-6.

416. Кочкаров, А.А. Исследование связности предфрактальных графов / А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров // Математическое моделирование и компьютерные технологии : материалы IV Всероссийского симпозиума. – Кисловодск : Издательство КИЭП, 2000. – С. 74-75. – ISBN отсутствует.

417. Коркмазова, З.О. Алгоритм порождения предфрактальных графов с заданными характеристиками / З.О. Коркмазова, Р.А. Кочкаров // Перспективные системы и задачи управления : материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Таганрог : Издательство ТРТУ, 2007. – С. 229-234. – ISBN 5-8333-0255-4.

418. Gambling, W.A. The Rise and Rise of Optical Fibers / W.A. Gambling // IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics. – 2000. – № 6. Volume 6. – P. 1084-1093. – ISSN 1077-260X.

419. Зюко, А.Г. Теория электрической связи / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик [и др.]. – Москва : Радио и связь, 1999. – 432 с. – ISBN 5-256-01288-6.

420. Биккузина, А.И. Подход к решению задачи упорядочения альтернатив в диалоговой системе моделирования принятия решений при информационно-аналитическом обеспечении оценки и прогноза экологического состояния территорий эксплуатации крупных технических комплексов / А.И. Биккузина, А.О. Жуков, Ю.В. Никольский [и др.] // Новые исследования в разработке техники и технологий. – 2014. – № 1. – С. 33-39. – ISSN отсутствует.

421. Гладышев, А.И. Достоинства и недостатки имитационного моделирования с использованием нейронных сетей / А.И. Гладышев, А.О. Жуков // Вестник Российского нового университета. – 2013. – № 4. – С. 53-55. – ISSN 1998-4618.

422. Herman, I. Graph visualization and navigation in information visualization: A survey / I. Herman, G. Melançon, M.S. Marshall // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG). – 2000. – № 1. Volume 6. – P. 24-43. – ISSN 1077-2626.

423. Кочкаров, А.А. Сетевое моделирование. Оптимизационные задачи на масштабно-инвариантных графах и параллельные алгоритмы их решения / А.А. Кочкаров, М.Б. Салпагаров, Р.А. Кочкаров // Труды V Московской международной конференции по исследованию операций (ORM'2007), посвящённой 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Моисеева. – Москва : Макс Пресс, 2007. – С. 246-248. – ISBN 978-5-317-01961-7.

424. Bader, D.A. Using PRAM algorithms on a uniform-memory-access shared-memory architecture / D.A. Bader, A.K. Illendula, B.M.E. Moret [et al.] // WAE 2001. Lecture Notes in Computer Science. – 2001. – Volume 2141. – P. 129-144. – ISSN 0302-9743.

425. Kulmburg, A. On the co-NP-completeness of the zonotope containment problem / A. Kulmburg, M. Althoff // European Journal of Control. – 2021. – Volume 61. – P. 1-11. – ISSN 0947-3580.

426. King, V. An optimal EREW PRAM algorithm for minimum spanning tree verification / V. King, Ch.K. Poon, V. Ramachandran [et al.] // Information Processing Letters. – 1997. – № 62. – P. 153-159. – ISSN 0020-0190.

427. Bader, D.A. Designing scalable synthetic compact applications for benchmarking high productivity computing systems / D.A. Bader, V. Agarwal, K. Madduri // Cyberinfrastructure Technology Watch. – 2006. – № 4. Volume 2. – P. 1-10. – ISSN отсутствует.

428. Sajith, G. Optimal parallel algorithm for Brook's colouring bounded degree graphs in logarithmic time on EREW PRAM / G. Sajith, S. Saxena // Discrete Applied Mathematics. – 1996. – № 64. – P. 249-265. – ISSN 0166-218X.

429. Бандман, О.Л. Мелкозернистый параллелизм в вычислительной математике / О.Л. Бандман // Программирование. – 2001. – № 4. – С. 5-20. – ISSN 0132-3474.

430. Горбунова, Е.О. Формально-кинетическая модель бесструктурного мелкозернистого параллелизма / Е.О. Горбунова // Сибирский журнал вычислительной математики. – 1999. – № 3. Том 2. – С. 239-256. – ISSN 1560-7548.

431. Жолен, Л. Прикладной интервальный анализ : с примерами по оцениванию параметров и состояний, робастному управлению и робототехнике / Л. Жолен, М. Кифер, О. Дидри [и др.] ; под редакцией Б.Т. Поляка. – Ижевск : Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. – 468 с. – ISBN 978-5-93972-610-4.

432. Кочкаров, Р.А. Ключевые показатели эффективности и результативности целевых программ / Р.А. Кочкаров // Качество. Инновации. Образование. – 2012. – № 1. – С. 28-31. – ISSN 1999-513X.

433. Кочкаров, Р.А. Инструментальные средства формализованного представления целевых программ / Р.А. Кочкаров // Актуальные проблемы математического моделирования в финансово-экономической области : сборник научных статей ; под редакцией В.А. Бывшева. – Москва : Финансовая академия, 2008. – С. 64-73. – ISBN 978-5-7942-0545-9.

434. Казаковцева, Е.В. Математические основы финансово-экономического анализа. Часть 2. Нечеткие продукционные системы : учебное пособие / Е.В. Казаковцева, А.В. Коваленко, М.Х. Уртенев [и др.]. – Краснодар : Кубанский государственный университет, 2013. – 251 с. – ISBN 978-5-8209-0897-2.

435. Коваленко, А.В. Многомерный статистический анализ предприятия / А.В. Коваленко, М.Х. Уртенев, У.А. Узденов. – Москва : Academia, 2009. – 240 с. – ISBN 978-5-7695-5701-9.

436. Карандаев, И.С. Прикладная математика : учебное пособие / И.С. Карандаев, В.И. Малыхин, В.И. Соловьёв ; под редакцией В.А. Колемаева. – Москва : ИНФРА-М, 2002. – 256 с. – ISBN 5-16-000155-9.

437. Колемаев, В.А. Практикум по исследованию операций в экономике : учебное пособие для вузов / В.А. Колемаев, В.И. Соловьёв, И.С. Карандаев [и др.] ; под редакцией В.А. Колемаева, В.И. Соловьёва. – Москва : Вега-Инфо, 2010. – 196 с. – ISBN 978-5-9902164-1-9.

438. Бароян, О.В. Прогнозирование эпидемий гриппа в условиях СССР / О.В. Бароян, Л.А. Рвачёв // Вопросы вирусологии. – 1978. – № 2. – С. 131-137. – ISSN 0507-4088.

439. Бароян, О.В. Моделирование и прогнозирование эпидемий гриппа для территории СССР / О.В. Бароян, Л.А. Рвачёв, Ю.Г. Иванников. – Москва : Институт эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи, 1977. – 546 с. – ISBN отсутствует.
440. Бейли, Н. Математика в биологии и медицине / Н. Бейли. – Москва : Мир, 1970. – 326 с. – ISBN отсутствует.
441. Беляков, В.Д. Эпидемиология / В.Д. Беляков, Р.Х. Яфаев. – Москва : Медицина, 1989. – 416 с. – ISBN отсутствует.
442. Боев, Б.В. Современные этапы математического моделирования процессов развития и распространения инфекционных заболеваний / Б.В. Боев // Эпидемиологическая кибернетика: модели, информация, эксперименты. – 1991. – С. 6-13. – ISSN отсутствует.
443. Утакаева, И.Х. Математические модели инфекционной динамики на основе предфрактальных графов : специальность 05.13.18. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук / Утакаева Ирина Хайрлыевна ; Ставропольский государственный университет. – Черкесск, 2011. – 194 с. – Библиогр. 165-181.
444. Воробьёв, А.А. Проблема биотерроризма в современных условиях / А.А. Воробьёв, Б.В. Боев, В.М. Бондаренко, А.Л. Гинцбург // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. – 2002. – № 3. – С. 3-8. – ISSN 0372-9311.
445. Ramaswami, R. Optical Networks: A Practical Perspective / R. Ramaswami, K.N. Sivarajan. – San Francisco : Morgan Kaufmann, 1998. – 468 p. – ISBN 978-1558604453.
446. Kaucher, E. Interval analysis in the extended interval space IR / E. Kaucher // Fundamentals of Numerical Computation. – Wien : Springer, 1980. – P. 33-49. – ISBN 978-3211824867.
447. Hiokey, T. Interval arithmetic: from principles to implementation / T. Hiokey, Q. Ju, M.H. van Emden // Journal of the ACM. – № 5. Volume 48. – P. 1038-1068. – ISSN 0004-5411.

448. Ferson, S. Modeling correlation and dependencies among intervals / S. Ferson, V. Kreinovich // *Reliable Engineering Computing (REC-2006)*. – 2006. – P. 115-126. – ISBN 978-1846285713.
449. Popova, E. Multiplication distributivity of proper and improper intervals / E. Popova // *Reliable Computing*. – 2001. – № 2. Volume 7. – P. 129-140. – ISSN 1385-3139.
450. Young, R.C. Algebra of many-valued quantities / R.C. Young // *Mathematische Annalen*. – 1931. – Volume 104. – P. 260-290. – ISSN 0025-5831.
451. Nogueira, M. Why intervals? If we allow other sets, tractable problems become intractable / M. Nogueira, A. Nandigam // *Reliable Computing*. – 1998. – № 4. Volume 4. – P. 389-394. – ISSN 1385-3139.
452. Dorogov, A.Y. Morphological model of self-similar multilayer neural networks / A.Y. Dorogov // *Procedia Computer Science*. – 2021. – Volume 186. – P. 366-373. – ISSN 1877-0509.
453. Kochkarov, A.A. Identifying Bots in Social Networks Using the Example of LiveJournal / A.A. Kochkarov, N.V. Kalashnikov, R.A. Kochkarov // *World of New Economy*. – 2020. – Volume 14. – P. 44-50. – ISSN 2220-6469.
454. Gataullin, T.M. Management of financial flows on transport / T.M. Gataullin, S.T. Gataullin // *Twelfth International Conference «Management of Large-Scale System Development»*. – 2019. – P. 1-4. – ISSN 978-1-7281-1730-0.
455. Hu, Y. A reinforcement learning approach for optimizing multiple traveling salesman problems over graphs / Y. Hu, Y. Yao, W.S. Lee // *Knowledge-Based Systems*. – 2020. – Volume 204. – P. 1-14. – ISSN 0950-7051.

Список иллюстративного материала

1 Список рисунков

Рисунок 1.1 Схема диссертационного исследования.....	65
Рисунок 2.1 Схема функционирования СДСС от этапа конфигурирования до завершения функционирования в условиях деструктивных воздействий.....	75
Рисунок 2.2 Задачи модели СДСС НПМ БР, обеспечивающие выполнение задачи мониторинга	77
Рисунок 2.3 Предфрактальный граф G_3 в двух конфигурациях.....	81
Рисунок 2.4 Предфрактальный граф $G_{\text{конф}} = G_3$ с произвольной смежностью.....	82
Рисунок 2.5 Предфрактальный граф G_4 в двух конфигурациях.....	83
Рисунок 2.6 Укрупненная схема модели СДСС НПМ БР	93
Рисунок 2.7 Функциональные взаимосвязи между средствами СДСС НПМ БР	97
Рисунок 2.8 Иерархическая модель СДСС НПМ БР на основе динамического графа	103
Рисунок 2.9 Схематичное представление СДСС НПМ БР в виде сети с двумя потоками разнородной информации.....	105
Рисунок 2.10 Схематичное представление структурной динамики СДСС НПМ БР	105
Рисунок 3.1 Комплексная система распределенного мониторинга и записи теле- и радиовещания.....	117
Рисунок 3.2 Графа конфигурации телекоммуникационной сети (а), представление графа конфигурации в виде иерархий системы (б)	119
Рисунок 3.3 Граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ и граф воздействий $G_{\text{возд}}$...	127
Рисунок 3.4 Результаты $G_{KB} = G_{\text{конф}} G_{\text{возд}}$ воздействия на граф конфигурации	129

Рисунок 3.5 Граф-затравки и траектория динамического графа GL	138
Рисунок 3.6 Изменение АТИ в траектории динамического графа, сохраняющему тенденцию вне зависимости от весов	139
Рисунок 3.7 Вычисление показателя чувствительности ai	147
Рисунок 3.8 Блок-схема итерационного алгоритма в условиях деструктивных воздействий.....	154
Рисунок 3.9 Иерархические графы $Gt1, Gt2, Gt3, Gt4$	160
Рисунок 3.10 Конфигурация $Gt1 + 1$ СДСС НПМ БР	161
Рисунок 3.11 Конфигурация $Gt2 + 1$ СДСС НПМ БР	162
Рисунок 3.12 Конфигурация $Gt3 + 1$ СДСС НПМ БР	163
Рисунок 3.13 Конфигурация $Gt4 + 1$ СДСС НПМ БР	164
Рисунок 4.3 Схема методики построения графов конфигураций СДСС НПМ БР	174
Рисунок 4.4 Условия сохранения смежности	176
Рисунок 4.6 Неканонические предфрактальные графы.....	178
Рисунок 4.7 Траектория мультиграфа $G3$, порожденного множеством H	179
Рисунок 4.8 Блоки и подграф-затравки предфрактального графа $G3$	180
Рисунок 4.9 Графы конфигураций $G_{\text{конф}1}, G_{\text{конф}2}, G_{\text{конф}3}, G_{\text{конф}4}$ в различных вариациях порождения предфрактального графа $G4$	181
Рисунок 4.10 Иерархический граф $G3$	184
Рисунок 4.11 Сетецентрический граф $G3$	185
Рисунок 4.12 Иерархические и сетецентрические графы $G4$ и $G7$	186
Рисунок 4.13 Иерархический граф конфигурации СДСС НПМ БР ..	187
Рисунок 4.14 Метрики граф конфигурации $G_{\text{конф}} = G7$ и графа GKB	188

Рисунок 4.15 Схема методики распределенного параллельного реконфигурирования СДСС НПМ БР	191
Рисунок 4.16 Граф конфигурации $G_{\text{конф}}$ и граф воздействий $G_{\text{возд}}$...	194
Рисунок 4.17 Операция воздействия $G_{\text{конф}} G_{\text{возд}}$	195
Рисунок 4.18 Варианты управляющего воздействия $GU_{\text{Вт}}$	199
Рисунок 4.19 Формальное представление операций деструктивного воздействия и восстановления графа конфигурации СДСС НПМ БР в рамках метода реконфигурирования	204
Рисунок 4.20 Операции деструктивного воздействия и реконфигурирования СДСС НПМ БР по методике реконфигурирования ..	208
Рисунок 4.21 Множества вершин-источников V^* и вершин-потребителей U^*	210
Рисунок 4.22 Схема управления процессом обмена данных представлена	213
Рисунок 4.23 Блок-схема алгоритма определения несравнимых альтернатив	229
Рисунок 4.23 Блок схема алгоритма противодействия аномальной вычислительной сложности через управление ресурсами СДСС НПМ БР	232
Рисунок 4.24 Предфрактальный граф $G_3 = (V_3, E_3)$, порожденный треугольной затравкой, смежность старых ребер которого не нарушается.....	234
Рисунок 4.25 Подграфы предфрактального графа G_3	240
Рисунок 4.26 Иерархические графы $G_{t1}, G_{t2}, G_{t3}, G_{t4}$	241
Рисунок 4.27 Остовное дерево иерархического графа G_{t1}	244
Рисунок 5.1 Схема программно-алгоритмического комплекса реконфигурирования СДСС НПМ БР	266
Рисунок 5.2 Визуализация графов при сохранении смежности старых ребер	268

Рисунок 5.3 Визуализация графов с произвольной смежностью старых ребер	268
Рисунок 5.4 Визуализация взвешенных графов.....	269
Рисунок 5.5 Схема комплексного алгоритма с учетом числа вычислителей и недетерминированности весов	270
Рисунок 5.6 Алгоритмы оптимизации СДСС НПМ БР при возникновении аномальных вычислительных сложностей в составе ПАК.....	271
Рисунок 5.7 Алгоритмы αl размещения центра	274
Рисунок 5.8 Алгоритмы $\alpha 0$ размещения центра.....	275
Рисунок 5.9 Алгоритмы βl размещения кратной медианы	277
Рисунок 5.10 Алгоритмы $\beta 0$ размещения медианы	278
Рисунок 5.11 Алгоритмы χl выделения ОЛМВ.....	279
Рисунок 5.12 Алгоритмы $\chi 0$ выделения ОДМВ.....	280
Рисунок 5.13 Параллельный алгоритм αl размещения кратного центра	282
Рисунок 5.14 Параллельный алгоритм $\alpha 0$ размещения центра	283
Рисунок 5.15 Параллельный алгоритм βl размещения кратной медианы	284
Рисунок 5.16 Параллельный алгоритм $\beta 0$ размещения медианы.....	285
Рисунок 5.17 Параллельный алгоритм χl выделения ОЛМВ	286
Рисунок 5.18 Параллельный алгоритм $\chi 0$ выделения ОДМВ.....	286
Рисунок 5.19 Вычислительные сложности алгоритма α и известного алгоритма	292
Рисунок 5.21 Время исполнения алгоритма α и известного алгоритма для большого числа вершин.....	293
Рисунок 5.22 Время исполнения алгоритма β и известного алгоритма.	294
Рисунок 5.23 Решения $x_1 *$ и $x_2 *$ на графе G_3	296
Рисунок 5.24 Предфрактальный граф G_3 , порожденный $H = \{H\}$	298

Рисунок 5.25 Кратные центры графа G_3 : (1) – интервальные числа; (2) – нечеткие множества; (3) – временные ряды	301
Рисунок 5.26 Интерполяция прогнозного значения временного ряда..	304
Рисунок 6.1 Состав и характеристики СДСС НПМ БР для вычислительных экспериментов	311
Рисунок 6.2 Схема оценки эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР в соответствии с заданными критериями.....	312
Рисунок 6.3 Порядок проведения вычислительного эксперимента исследования эффективности метода реконфигурирования СДСС НПМ БР ..	318
Рисунок 6.4 Построение графа системы третьего уровня	320
Рисунок 6.5 Структурно-функциональные критерии F_1 , F_2 и F_3	321
Рисунок 6.6 Агрегированный топологический индекс в связи с количеством узлов.....	322
Рисунок 6.7 Комплексный показатель эффективности в связи с количеством узлов.....	323
Рисунок 6.8 Граф конфигурации $G_{\text{конф}6} = G_6$ с 4 типами узлов СДСС НПМ БР	325
Рисунок 6.9 Моделирование отказов 25% элементов системы.....	327
Рисунок 6.11 Динамика АТІ при структурных отказах системы	331
Рисунок 6.12 Динамика АРЕ при функциональной деградации каналов связи	331
Рисунок 6.13 Сравнительный анализ реконфигурации системы в условиях деструктивных воздействий	332
Рисунок 6.14 Сравнительный анализ оценки состояния системы при различных режимах функционирования системы	332
Рисунок 6.15 Сравнительный оценки состояния системы при различных режимах функционирования системы.....	333
Рисунок 6.1 – Дерево целей городской целевой программы «Электронная Москва»	336

Рисунок 6.17 Информационные потоки дерева целей	337
Рисунок 6.18 Покрытие мероприятий программы проектами	337
Рисунок 6.19 Определение степени достижения целей соответствует оценке состояния отдельных узлов системы и корневого узла как всей системы	338
Рисунок 6.20 Взвешенный двудольный граф G *	340
Рисунок 6.21 Граф $G3$ порожден двумя полными затравками: $H1$ и $H2$	342
Рисунок 6.22 Сеть взаимодействия агентов $G3$	343
Рисунок 6.23 Покрытие предфрактального графа $G4$ звездами	344
Рисунок 6.24 Граф $G4$, порожденный множеством затравок-лесов ..	345

2 Список таблиц

Таблица 3.1 Сравнительная таблица результатов изменений конфигураций	164
Таблица 5.1 Сравнения значений критериев	297
Таблица 5.2 Интервальные веса графа $G3$	298
Таблица 5.3 Веса графа $G3$ – нечеткие множества	299
Таблица 5.4 Веса графа $G3$ – временные ряды	299
Таблица 5.5 Сравнения значений критериев	301
Таблица 5.6 Свертка интервальных весов	302
Таблица 5.7 Центры тяжести нечетких множеств	302
Таблица 5.8 Прогнозные значения временных рядов	302
Таблица 5.9 Взвешивания из 3 наборов весов	302
Таблица 5.10 Сравнительная таблица значения критериев	304
Таблица 6.1 Пороговые значения критериев эффективности	316
Таблица 6.2 Параметры моделирования	316
Таблица 6.3 Типы узлов и их описание	326
Таблица 6.4. Статистика компонент связности при 25% отказов	328

Таблица 6.5. Классификация результатов оценки эффективности ...	330
Таблица 6.6 Данные рейтинга антивирусов COMSS.TV за 2014 год	346
Таблица 6.7 Соответствие структурных изменений изменениям матрицы смежности	350