

Министерство образования и науки Украины  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

На правах рукописи

ПОДОЛЯКА КСЕНИЯ ЕВГЕНЬЕВНА

*Підпис*

УДК 519.6:004.9

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РЕИНЖИНИРИНГА  
ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СИСТЕМ КРУПНОМАСШТАБНОГО  
МОНИТОРИНГА

05.13.12 – системы автоматизации проектных работ

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Бескоровайный Владимир  
Валентинович,  
доктор технических наук,  
профессор

Цей примірник дисертаційної роботи  
ідентичний за змістом з іншими,  
поданими до спеціалізованої вченої ради  
Д 64.052.02.

Вчений секретар спецради Д 64.052.02

*Підпис*  
*Печатка*

Л.В. Колесник

Харьков – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

Перечень условных обозначений .....	4
Введение .....	5
Раздел 1 Обзор и анализ современного состояния проблемы оптимизации систем крупномасштабного мониторинга .....	12
1.1 Системы крупномасштабного мониторинга как объекты реинжиниринга .....	12
1.2 Обзор математических моделей задач реинжиниринга систем мониторинга .....	19
1.3 Обзор методов оптимизации топологических структур систем мониторинга .....	29
1.4 Автоматизация процессов проектирования и реинжиниринга систем мониторинга .....	32
1.5 Постановка цели и задач исследования .....	37
Выводы по разделу 1 .....	40
Раздел 2 Методологические основы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга .....	42
2.1 Формализация описания систем крупномасштабного мониторинга ..	42
2.2 Декомпозиция проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга .....	45
2.3 Постановка задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга .....	55
2.4 Многокритериальная оценка эффективности вариантов реинжиниринга .....	58
Выводы по разделу 2 .....	62
Раздел 3 Математические модели структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга .....	64
3.1 Математическая модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию затрат .....	64

3.2 Математическая модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию оперативности . . . . .	71
3.3 Математическая модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию надежности . . . . .	76
3.4 Математическая модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию живучести . . . . .	81
3.5 Математическая модель многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга . . . . .	84
Выводы по разделу 3 . . . . .	90
Раздел 4 Методы реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга . . . . .	92
4.1 Модификация метода направленного перебора для реинжиниринга топологических структур систем мониторинга . . . . .	92
4.2 Методы решения задачи размещения узлов системы мониторинга . . . . .	94
4.3 Анализ эффективности модификаций метода направленного перебора . . . . .	102
4.4 Метод выбора многокритериальных решений при реинжиниринге топологических структур . . . . .	106
Выводы по разделу 4 . . . . .	112
Раздел 5 Программно-методический комплекс реинжиниринга топологических структур систем мониторинга . . . . .	114
5.1 Состав и функции программно-методического комплекса . . . . .	114
5.2 Реинжиниринг топологических структур в автоматическом режиме . . . . .	127
5.3 Реинжиниринг топологических структур в интерактивном режиме . . . . .	139
Выводы по разделу 5 . . . . .	143
Выводы . . . . .	145
Список использованных источников . . . . .	149
Приложение А Акты внедрения результатов диссертационной работы . . . . .	164

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АРМ – автоматизированное рабочее место.

ГА – генетический алгоритм.

ГРПС – геораспределенная производственная система.

КГ – коэффициент готовности.

КС – канал связи.

ЛПР – лицо, принимающее решения.

ПМК– программно-методический комплекс.

САПР – система автоматизированного проектирования.

СКММ – система крупномасштабного мониторинга.

ТРС – территориально распределенная система.

ФПЧК – функция полезности частного критерия.

GA – Genetic algorithm.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В условиях глобализации и информатизации антропогенных процессов решение множества социально-экономических и научно-исследовательских задач осуществляется на основе данных, предоставляемых системами экологического, метеорологического, астрономического, экономического, других видов крупномасштабного мониторинга. Изменение условий эксплуатации или средств мониторинга (количества объектов наблюдения, требований к оперативности и точности наблюдений, совершенствование технологий обработки, хранения и передачи информации) снижает эффективность существующих вариантов реализации систем и требует проведения их реинжиниринга.

Реинжиниринг систем крупномасштабного мониторинга (СКММ) предполагает решение комплекса проектных комбинаторных задач структурной, топологической, параметрической и технологической оптимизации. С учетом того, что мощности множеств допустимых технологий функционирования, параметров элементов и связей систем незначительны, основную трудность составляют задачи оптимизации их топологических структур.

Математические модели и методы проектирования систем крупномасштабного мониторинга базируются на теории сложных систем, основы которой изложены в работах *H. Good, G. Klir, D. Lesdon, D. Macko, R. Machol, M. Mesarovic, Y. Takahara*, Н.П. Бусленко.

Теория оптимизации топологических структур территориально распределенных объектов основывается на работах *P. Green, R. Lucky, L. Kleinrock*, В.М. Глушкова, Ю.П. Зайченка, М. Шварца, А.Д. Цвиркуна, Б.Я. Эттингера, Э.А. Якубайтиса, Г.Ф. Янбыха.

Дальнейшее развитие применительно к конкретным территориально распределенным объектам она получила в работах *D.Z. Du, P.M. Pardalos, K.R. Odom*, В.К. Акинфиева, С.В. Барбашева, В.В. Бескорвайного,

А.Б. Болотова, М.Д. Годлевского, Е.Ю. Зайченко, В.В. Малышева, Л.И. Нефедова, Э.Г. Петрова.

Несмотря на многочисленные публикации, посвященные решению задач проблемы оптимизации СКММ, в результате анализа ее современного состояния выявлено противоречие между необходимостью повышения эффективности существующих вариантов их реализации и ограниченностью существующих математических моделей и методов решения задач их структурно-топологической оптимизации, используемых в процессах их проектирования и реинжиниринга. Это определяет актуальность научно-технической задачи повышения эффективности средств автоматизации реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами Министерства образования и науки Украины в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) в период с 2011 по 2016 год в рамках научно-исследовательских работ: госбюджетная тема № 254-2 «Структурный синтез территориально распределенных объектов в условиях неполной определенности» (№ ГР 01116U002624); госбюджетная тема № 293-3 «Разработка математических моделей и методов реинжиниринга топологических структур территориально-распределенных объектов» (№ ГР 0115U001522).

Соискатель участвовала в выполнении работ по указанным темам в качестве исполнителя. В рамках проведенных исследований ею были разработаны математические модели, методы и программное обеспечение для решения задач реинжиниринга топологических структур трехуровневых централизованных систем крупномасштабного мониторинга.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка математических моделей, эффективных методов и программного обеспечения для решения задач многокритериального реинжиниринга

топологических структур систем крупномасштабного мониторинга.

Для достижения поставленной цели необходимо было:

- провести обзор и анализ современного состояния проблемы реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга;
- разработать системологическую модель проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга;
- выполнить формализацию наиболее часто используемых на практике частных критериев эффективности для задач реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга;
- разработать математические модели задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга по множеству функционально-стоимостных показателей;
- разработать базовый метод, позволяющий получать эффективные решения задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга;
- разработать модификации метода решения задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга, учитывающие ограничения по показателям точности и времени получения решений;
- разработать алгоритмы и программное обеспечение для решения задач реинжиниринга топологических структуры систем крупномасштабного мониторинга;
- провести экспериментальное исследование эффективности и практическую апробацию полученных теоретических результатов.

*Объект исследования* – системы крупномасштабного мониторинга.

*Предмет исследования* – процесс реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга.

**Методы исследования.** Исследование базируется на комплексном использовании методов системного анализа, исследования операций, теории принятия решений и математической статистики: для представления и анализа

вариантов топологических структур систем используются элементы теории графов; для формирования и выбора эффективных вариантов топологических структур используются методы направленного перебора, покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза, кластеризации; для оценки эффективности и выбора решений по множеству показателей используются методы количественной теории полезности и принятия решений; для оценки точности и временной сложности разработанных методов используются методы статистического анализа.

**Научная новизна полученных результатов.** В результате выполнения диссертационного исследования разработаны математические модели, методы и программное обеспечение для решения многокритериальных задач реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга.

При этом получены следующие новые научные результаты:

– получила дальнейшее развитие системологическая модель проблемы реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга в части учета топологических особенностей проблемно связанных задач, что позволяет корректно формировать исходные данные задач в логических схемах процессов их оптимизации;

– получила дальнейшее развитие путем формализации система частных критериев затрат (в направлении учета возможности модернизации и повторного использования имеющегося оборудования), оперативности, надежности и живучести для задач реинжиниринга централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга с однотипными элементами и связями в виде явных зависимостей от переменных, описывающих их топологические структуры;

– на основе предложенной формализации частных критериев впервые разработана математическая модель многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга по показателям затрат, оперативности,

надежности и живучести, частными случаями которой являются математические модели задач по одному, двум или трем критериям;

– получил дальнейшее развитие метод направленного перебора вариантов, позволяющий определять эффективные решения многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга, в части учета показателей оперативности, надежности и живучести;

– разработаны модификации метода направленного перебора для решения задач реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга, использующие схемы размещения узлов на основе покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза, кластеризации, имеющие существенно меньшие временные сложности, чем комбинаторные методы.

**Практическое значение полученных результатов.** Разработанные математические модели и методы решения задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга расширяют методологическую основу систем автоматизации проектирования, планирования развития и реинжиниринга территориально распределенных объектов различного назначения.

Все предложенные математические модели и модификации метода направленного перебора реализованы программно. На их основе создан программно-методический комплекс *Reengineering-TS*. Они апробированы, показали свою работоспособность и эффективность на примерах решения тестовых задач реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга по одному или множеству критериев.

Практическое использование полученных результатов позволяет за счет выбора (исходя из имеющихся вычислительных ресурсов и размерности решаемой задачи) наиболее эффективной модификации метода сократить затраты на реинжиниринг и оптимизировать функциональные характеристики топологических структур проектируемых систем.

Практическое значение результатов подтверждается их внедрением. Разработанные в диссертационной работе математические модели, методы и программное обеспечение для решения задач реинжиниринга топологических структур внедрены: в госбюджетные научно-исследовательские работы, выполняемые в рамках тематических планов научно-исследовательских работ Харьковского национального университета радиоэлектроники, финансируемых за счет Министерства образования и науки; в Главном центре специального контроля Государственного космического агентства Украины; в Украинском научно-исследовательском институте экологических проблем; в учебном процессе на кафедрах системотехники и технологии и автоматизации производства радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств Харьковского национального университета радиоэлектроники (приложение А).

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты диссертационной работы получены соискателем и опубликованы в работах [1–16]. В работах, опубликованных с соавторами, соискателю принадлежат следующие результаты: в [1, 12] – разработка системологической модели проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга; в [2] – разработка модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур трехуровневых централизованных систем крупномасштабного мониторинга; в [3, 13, 14] – формализация частных критериев затрат, оперативности, надежности и живучести для проектов реинжиниринга трехуровневых централизованных систем крупномасштабного мониторинга; в [4] – метод направленного перебора локальных экстремумов функции цели для решения задачи реинжиниринга систем с радиально-узловыми структурами по показателям оперативности и затрат; в [5] – модификация метода направленного перебора вариантов, позволяющая получать оптимальные решения по показателю затрат с учетом ограничений на показатели оперативности, надежности и живучести; в [6] – модификации метода направленного перебора для реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга, использующие полный перебор

всевозможных вариантов размещения узлов, а также схемы по координатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза, кластеризации на основе *k-means*; в [7, 15] – метод выбора многокритериальных решений при реинжиниринге топологических структур систем крупномасштабного мониторинга по показателям затрат, оперативности, надежности и живучести.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертационной работы прошли апробацию на: XI Всеукраинской научно-технической конференции «Математическое моделирование и информационные технологии» (Одесса, 2012 г.), XVIII Международном молодежном форуме «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харьков, 2014 г.); XIX Международном молодежном форуме «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харьков, 2015 г.); научной конференции физико-технического факультета Донецкого национального университета (Винница, 2015 г.); XI Международной научно-практической конференции «Управление проектами: состояние и перспективы» (Николаев, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Математическое моделирование процессов в экономике и управлении проектами» (Коблево, 2015 г.); IV Международной научно-практической конференции «Информационные системы и технологии» (Харьков, 2015 г.); XX Международном молодежном форуме «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харьков, 2016 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы представлены в 16-ти научных публикациях, в их числе: 1 коллективная монография, 1 статья в зарубежном периодическом издании, 5 статей в периодических изданиях, включенных в перечни специализированных научных изданий Украины по техническим наукам и 9 тезисов докладов на научных конференциях.

## РАЗДЕЛ 1

### ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ КРУПНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА

#### 1.1 Системы крупномасштабного мониторинга как объекты реинжиниринга

Системы крупномасштабного мониторинга предназначены для сбора и анализа данных о состоянии объектов наблюдения, рассредоточенных на значительных территориях, в воздушном или водном пространствах. Они находят широкое применение в различных областях человеческой деятельности. Примерами являются системы космического мониторинга наземных объектов, системы мониторинга экологии, лесных ресурсов, сейсмической, радиационной, радиотехнической активности, транспорта. Целевые задачи систем мониторинга определяются получателями информации, что во многом определяет требования к виду, объемам, точности, частоте обновления, другим характеристикам получаемой информации.

С ростом масштабов систем мониторинга их стоимостные и функциональные характеристики становятся все более зависимыми от топологии, т.е. территориальной (пространственной) организации. Это требует совместно с традиционными задачами структурного синтеза решать комплексы задач топологической или пространственной оптимизации систем и, таким образом, приводит к проблеме структурно-функционально-параметрического и топологического синтеза.

**Космические системы мониторинга.** Спутниковые системы мониторинга чаще всего рассматриваются как часть глобальной системы мониторинга конкретного назначения, предназначенной для создания единой информационной системы [17]. Системы космического мониторинга предоставляют информацию для экологического, климатического, транспортного, геологического и других видов мониторинга.

В структуру таких систем входит космический и наземный сегмент мониторинга, системы сбора, обработки и хранения информации. Топологическая структура наземной части системы мониторинга может быть различной и определяется стоимостными, климатическими, правовыми, экологическими ограничениями, а так же требованиями к стоимости, надежности, оперативности и живучести системы.

В качестве основных критериев оптимизации топологической структуры наземной части системы космического мониторинга при синтезе и реинжиниринге рассматриваются [17–19]: стоимость системы, стоимость получения информации, затраты на приобретение земельных ресурсов, полнота предоставляемых данных для принятия управленческих решений, вероятность того, что количество потребителей, обеспеченных информацией, будет не меньше заданного.

В процессе проектирования наземного сегмента системы мониторинга в обязательном порядке решаются задачи определения оптимального количества элементов системы и мест их размещения [17–19].

**Системы мониторинга лесных ресурсов.** Мониторинг лесных ресурсов осуществляется с целью сохранения или повышения их экологических функций, защиты, в том числе предупреждения и обнаружения пожаров [20].

Основные задачи систем мониторинга лесных пожаров – оценка площадей, обнаружение очагов воздействия и возгорания, оценка коэффициента пожарной опасности и др.

В структуру таких систем входят наземные средства сбора, обработки и хранения информации, космические и авиационные системы сбора и передачи информации [20, 21].

В качестве критериев оптимизации топологических структур наземной части систем мониторинга лесных ресурсов используются: стоимость систем, требуемый уровень контроля (повышенный контроль с многократным покрытием зоны мониторинга), оперативность [21, 22].

В процессе проектирования и оптимизации (реинжиниринга) систем

мониторинга и обнаружения лесных пожаров решаются задачи выбора и размещения элементов, средств сбора, обработки и хранения информации [20 – 22].

**Системы мониторинга сейсмической активности.** Для анализа сейсмичности используются данные крупнейших мировых геофизических центров, таких как Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC, USGS) и Международный сейсмологический центр (ISC) [23].

Задачи систем мониторинга сейсмической активности включают получение в реальном времени параметрических данных, предоставляемых сейсмологическими сетями, обработка, накопление и распространение информации, прогноз обстановки, международный обмен данными и прогнозами [24].

На территории Украины функционирует сеть сейсмических станций, которая, фактически, играет роль национальной сейсмологической сети [24].

В качестве критериев оптимизации топологических структур систем мониторинга сейсмической активности используются: стоимость системы, требуемый уровень контроля, максимизация покрытия заданной территории.

С течением времени существующая система мониторинга перестала удовлетворять эффективности: недостаточная зона покрытия, износ оборудования [24]. В процессе реинжиниринга системы требуется решение задач размещения пунктов мониторинга, узлов обработки и хранения информации, увеличение точности получаемых данных с использованием современного оборудования.

**Системы мониторинга радиационной активности.** В настоящее время во многих странах мира проводится радиационный мониторинг, основные задачи которого: раннее обнаружения радиационных аварий и принятие эффективных мер по защите населения и ликвидации последствий [25 – 27].

Большинство современных систем мониторинга радиационной активности являются трех- или четырехуровневыми и состоят из стационарных

постов, региональных и национальных центров, которые объединены в единую информационную сеть.

В Украине планируется разработка единой государственной автоматизированной системы контроля радиационной обстановки окружающей среды (ЕГАСКРО ОС). Основу этой системы составит существующая сеть автоматизированной системы контроля радиационной обстановки атомных электростанций, состоящая из пунктов радиационного мониторинга атмосферного воздуха (рис. 1.1) и сеть метеостанций системы Госкомгидромета Украины.

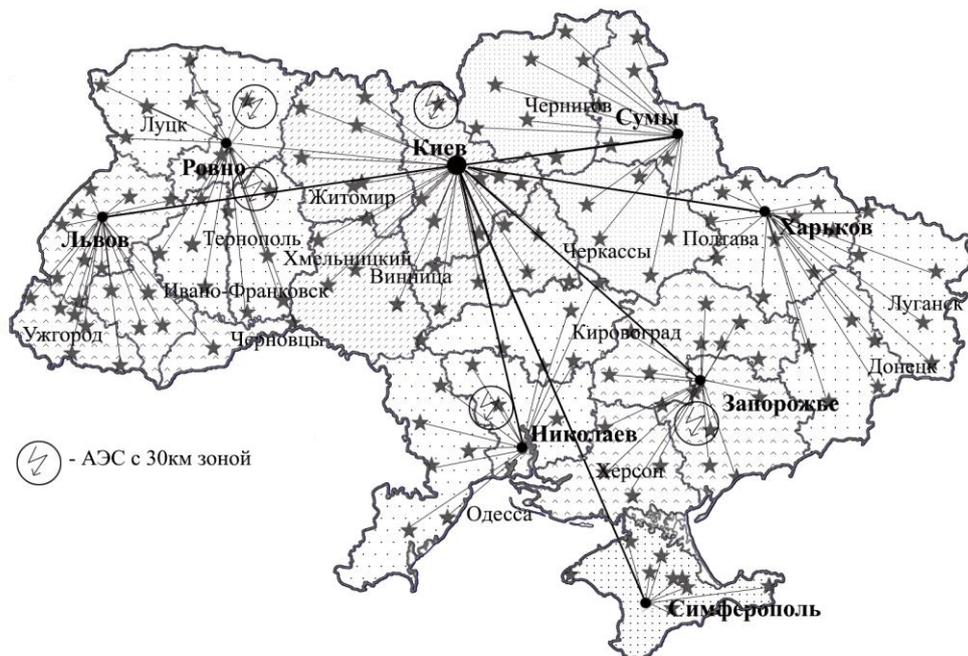


Рисунок 1.1 – Топологическая структура системы радиационного контроля атмосферного воздуха на территории Украины

Подробный анализ современного состояния радиационного мониторинга на территории Украины представлен в работе [28], где отмечается, что существующая система не обеспечивает необходимого уровня контроля и требуют дальнейшего развития. Это требует решения задачи ее реинжиниринга.

В процессе ее реинжиниринга, в частности, требуется решать задачи определения количества и мест расположения новых постов и центров контроля, выбора оборудования и совершенствования технологии мониторинга.

В качестве критериев оптимизации топологических структур систем радиационного мониторинга используются: затраты, оперативность (работа в реальном режиме времени), максимизация покрытия территории.

**Системы мониторинга транспорта газа.** Мониторинг транспорта газа от газораспределительных станций к пунктам потребления является одной из основных составляющих управления газотранспортной системой [29].

Подобные комплексы обеспечивают решение множества задач телеизмерения и трансляции технологических параметров, телеуправления крановыми узлами, диагностики, архивирования и документирования информации и действий оператора [29].

Существующие на данный момент технические комплексы для контроля и управления газораспределительными станциями представляют собой двухуровневые системы, контроль и управление которыми осуществляют с центрального пункта управления.

Функционально-топологический синтез структуры системы мониторинга состоит в определении оптимальных характеристик системы (количества и размещения точек измерения и выбор контролируемых в них показателей, функциональных характеристик средств измерений в каждой из точек, топологии и типов коммуникационных связей). В качестве основного критерия выступают затраты на создание системы [29].

Особенности задач проектирования и реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга различного целевого назначения представлены в работах [30–36].

На основании анализа существующих СКММ, представленных в известных проектах и публикациях, их структурных схем [17, 37] может быть составлена обобщенная схема системы мониторинга, которая представляет ее основные типовые подсистемы и связи между ними (рис. 1.2).

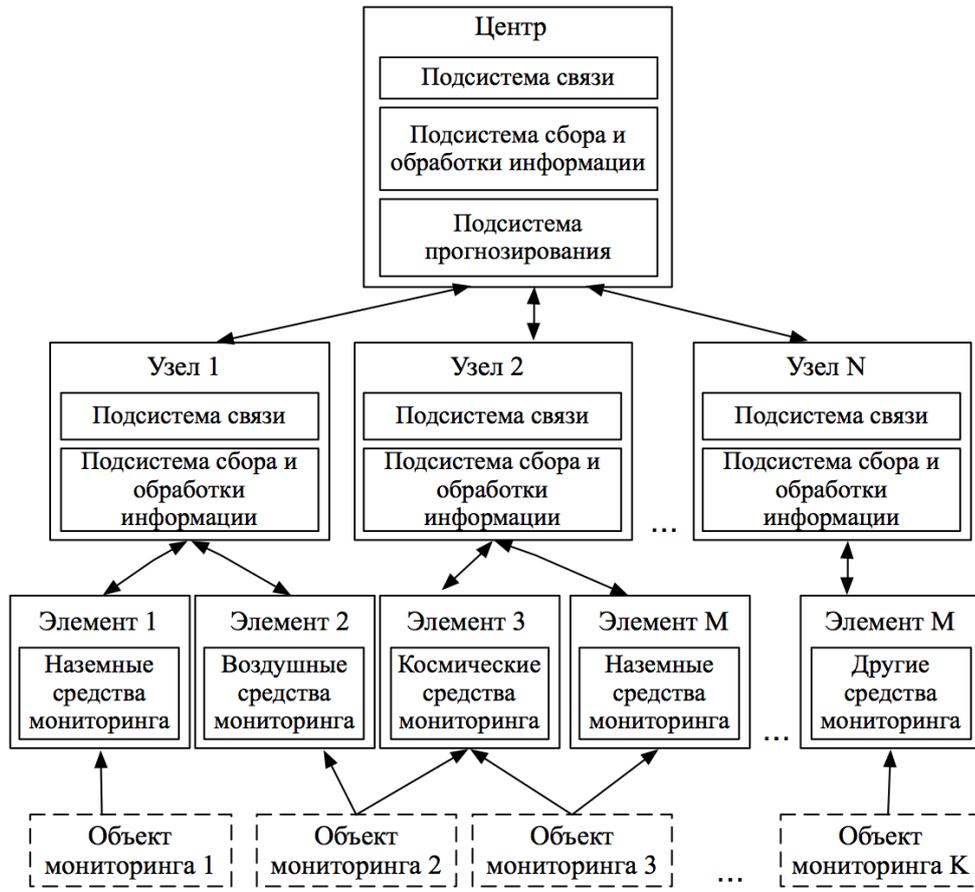


Рисунок 1.2 – Обобщенная структурная схема системы мониторинга

Несмотря на различное функциональное назначение и особенности задач мониторинга, все рассмотренные выше СКММ имеют следующие общие черты:

- общая цель, заключающаяся в удовлетворении запросов пользователя (пользователей) на некоторый вид информации;
- множество территориально распределенных элементов (средств сбора и предварительной обработки информации);
- существенная территориальная (пространственная) рассредоточенность объекта (объектов) и средств (элементов, узлов, центра) мониторинга;
- существование зон мониторинга (подмножеств наблюдаемых объектов) для каждого элемента системы;

– наличие в процессе мониторинга транспортных этапов, заключающихся в перемещении информации между элементами, узлами и центром системы и, во многом определяющих степень эффективности ее функционирования;

– для оценки эффективности их работы используется множество противоречивых показателей: затраты на создание, эксплуатацию, приведенные затраты, оперативность (время получения информации), надежность, живучесть, кратность покрытия объектов мониторинга, ряд других;

– выбор наилучшего варианта при их создании или реинжиниринге требует решения задачи многокритериального выбора компромиссного решения в условиях большей или меньшей неопределенности целей и (или) данных.

Учет значительной территориальной (пространственной) рассредоточенности СКММ в процессе ее оптимизации приводит к проблеме структурно-функционально-параметрического и топологического синтеза. В общем случае она может быть сформулирована следующим образом.

Для системы мониторинга заданного множества рассредоточенных объектов необходимо определить: структурные (количество уровней системы, количество узлов и элементов на каждом из уровней, схему их взаимосвязей и подмножества наблюдаемых ими объектов), топологические характеристики (размещение узлов, элементов и связей), параметры (мощности узлов, элементов, пропускные способности связей между ними) и технологию функционирования (алгоритмы сбора и обработки информации), удовлетворяющие установленным ограничениям и (или) экстремизирующие заданные показатели качества.

При этом следует учитывать, что СКММ функционируют в непрерывно изменяющихся внешних условиях, что делает их реализации неэффективными с течением времени. Это приводит к необходимости выбора достаточно устойчивых (робастных) вариантов их построения, способных с минимальными потерями адаптироваться к изменениям перечисленных факторов или периодически решать задачи их реинжиниринга.

Реинжиниринг СКММ предполагает решение множества комбинаторных задач структурной, топологической, параметрической и технологической оптимизации. С учетом того, что мощности множеств допустимых технологий функционирования, параметров элементов и связей систем мониторинга незначительны, основную трудность составляют задачи оптимизации их топологических структур.

Для совершенствования существующих и разработки новых средств структурно-топологического реинжиниринга СКММ необходимо провести обзор и анализ используемых на практике математических моделей и методов реинжиниринга.

## 1.2 Обзор математических моделей задач реинжиниринга систем мониторинга

Решение задач реинжиниринга топологических структур СКММ основано на применении методов теории прикладного системного анализа, который предполагает их теоретико-множественное представление, декомпозицию описания, выполнение этапов анализа и синтеза архитектуры.

Одной из первых работ, в которой использовано понятие «реинжиниринг», является работа Хаммера и Чампи [38], в которой представлены принципы реинжиниринга бизнес-процессов компаний, однако не приведены формальные модели и методы для его проведения.

Формализованные подходы к проблеме реинжиниринга представлены в работах [39–41], в которых наряду с понятием «реинжиниринг» используется понятие «перепроектирование» (*BPR Business Process Redesign*).

Детальный анализ проблемы реинжиниринга проведен в работе [42], где утверждается, что на данный момент нет общепринятого подхода к анализу существующих систем и выбору процессов, которые будут подвергнуты реинжинирингу.

В области технических систем наряду с понятиями «реинжиниринг» и

«перепроектирование» используются такие понятия как, «эволюция» [43–45], «миграция», «модернизация», «реструктуризация» [46].

В работах [47–49] излагаются особенности планирования развития крупномасштабных систем и построения комплексов моделей на основе проектно-программного и агрегативно-декомпозиционного подходов.

Популярные методологии структурного анализа и проектирования, такие как *Data Flow Diagrams*, *Structured Analysis and Design Technique*, которые используют механизм декомпозиции в качестве основного элемента абстракции, при этом не поддерживают анализ и представление альтернативных способов достижения цели [50].

Решению задачи структурного анализа, как важной составляющей процесса реинжиниринга территориально распределенной системы (ТРС) посвящена работа [51]. В качестве основных составляющих структурного анализа ТРС в ней выделено:

- теоретико-множественное представление системы;
- декомпозиция архитектуры ТРС;
- выделение типовых структур ТРС;
- перечисление вариантов структур ТРС;
- автоматизированный синтез структур ТРС;
- оценка и сравнение полученных вариантов с целью определения оптимального.

При этом формирование множества вариантов модернизируемой архитектуры ТРС предлагается проводить в два этапа:

- оценка множества возможных вариантов реинжиниринга структурно-топологической организации ТРС;
- формальный синтез архитектурных решений реинжиниринга ТРС.

Множество важнейших задач структурной, топологической и параметрической оптимизации, решаемых в процессе синтеза системы управления качеством добычи, переработки и транспорта газа определяется в работе [52]. Среди них выделены задачи определения местоположения узлов и

элементов системы, определения топологии каналов связи (КС) в системе, выбора каналов связи, оборудования узлов и элементов, оценки пропускной способности, надежности и помехозащищенности сети.

В работе представлена структурная модель информационной технологии автоматизированного синтеза системы мониторинга, которая представлена семью этапами, которые включают анализ объекта мониторинга и множество моделей задач структурной, топологической и параметрической оптимизации.

Более детальная формализация процессов синтеза и реинжиниринга ТРС предложена в работах [53, 54].

В работе [53] предложен подход к формированию и оценке вариантов системотехнической реализации системы мониторинга воздушного, наземного и надводного пространства в реальном времени. Процесс формирования рационального варианта состоит из следующих этапов: выделение множества требуемых функций системы, определение структурных элементов, формирование плана работ. Формально подход представлен теоретико-множественной моделью [53]:

$$M = M_1 \circ M_2 \circ M_3 \circ M_4 \circ M_5, \quad (1.1)$$

где  $\circ$  – знак композиции;

$M_1$  – модель определения функций системы;

$M_2$  – модель выбора средств реализации функций;

$M_3$  – модель формирования планов реализации функций;

$M_4$  – модель формирования частных планов построения системы;

$M_5$  – модель оценки и выбора рационального плана создания системы.

Каждая частная модель  $M_1 - M_5$  представлена множеством входных и выходных данных с их детальной формализацией [53].

Предложенный подход позволяет структурировать формирование рационального варианта построения системы мониторинга, однако не учитывает возможности дальнейшей модернизации и реинжиниринга.

В работе [54] предложена трехуровневая схема декомпозиции проблемы структурного синтеза ТРС, которая включает множества задач системного проектирования, планирования развития, адаптации и реинжиниринга. Проблема синтеза ТРС представлена в виде метазадачи *MetaTask*, которая состоит из множества подзадач множества иерархических уровней декомпозиции, взаимосвязанных по исходным данным и результатам решения [54]:

$$MetaTask = \{Task_l\}, Task_l = \{Task_i^l\}, i = \overline{1, i_l}, l = \overline{1, n_l}, \quad (1.2)$$

где  $Task_l$  – множество задач синтеза, относящихся к уровню  $l$ ;

$n_l$  – количество уровней описания ТРС;

$i$  – номер задачи (этапа, стадии проектирования);

$i_l$  – количество задач, подлежащих решению на уровне  $l$ .

При этом каждая задача представлена в виде:

$$Task_i^l := In_i^l \rightarrow Out_i^l, i = \overline{1, i_l}, l = \overline{1, n_l}, \quad (1.3)$$

где  $In_i^l$  – входные данные  $i$ -й задачи  $l$ -го уровня;

$Out_i^l$  – выходные данные  $i$ -й задачи  $l$ -го уровня.

На макроуровне выделено множество задач, отображающих специфику основных этапов жизненного цикла ТРС:

$$Task^1 = \{Task_i^1\}, i = \overline{1, 5}, \quad (1.4)$$

где  $Task_1^1$  – формирование требований к ТРС и разработка технического задания на проектирование;

$Task_2^1$  – системное проектирование;

$Task_3^1$  – планирование развития;

$Task_4^1$  – структурная адаптация;

$Task_5^1$  – реинжиниринг ТРС.

Каждая конкретная система мониторинга создается для удовлетворения определенного множества потребностей. Степень достижения цели ее создания и реинжиниринга оценивается с помощью одного или нескольких показателей эффективности.

В работе [55] представлена модель задачи реинжиниринга системы мониторинга, ориентированная на оптимизацию существующей топологической структуры по показателю финансовой выгоды от перераспределения  $n$  элементов (узлов):

$$N = \sum_n B - \sum_n C \rightarrow \max, \quad (1.5)$$

где  $N$  – общая прибыль от перераспределения  $n$  элементов (узлов);

$\Sigma B$  – суммарная денежная прибыль от перераспределения  $n$  элементов (узлов);

$\Sigma C$  – суммарные денежные затраты на перераспределение  $n$  элементов (узлов).

Такая модель является достаточно общей, в ней не отражаются топологические характеристики вариантов реинжиниринга и не учитываются ограничения на функционально-стоимостные характеристики вариантов и новые требования, которые могут быть дополнительно предъявлены к системе.

Модель задачи реинжиниринга топологических структур ТРС по показателю минимума дополнительных затрат представлена в работе [56]. В ней задача реинжиниринга рассматривается в следующей постановке. Заданы:

– множество элементов существующей системы  $I^o = \{i\}, i = \overline{1, n_E}$ ;

– топологическая структура существующей системы, задаваемая местами

расположения узлов  $Y^o = [y_i^o]$ ,  $i = \overline{1, n_E}$  ( $y_i^o$  – булева переменная,  $y_i^o = 1$ , если на базе  $i$ -го элемента существует узел;  $y_i^o = 0$  – в противном случае), а также связями между элементами, узлами и центром  $R^o = [r_{ij}^o]$ ;

– затраты на создание элементов, узлов и центра в новой структуре  $c'_i$ ,  $i = \overline{1, n_E}$ ;

– затраты на создание связей между элементами, узлами и центром в новой структуре  $c'_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n_E}$ ;

– затраты на модернизацию элемента, узла и центра в новой структуре  $\Delta c'_i$ ,  $i = \overline{1, n_E}$ ;

– затраты на модернизацию связей между элементами, узлами и центром в новой структуре  $\Delta c'_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n_E}$ .

Требуется определить новый вариант топологической структуры, который задается местами размещения узлов  $Y' = [y'_i]$ ,  $i = \overline{1, n'_E}$  (где  $n'_E$  – количество элементов в новой структуре), схемой связей между элементами, узлами и центром  $R' = [r'_{ij}]$  и, требующий минимальных дополнительных затрат:

$$\Delta C = \sum_{i=1}^{n'_E} [c'_i(1 - y_i^o)y'_i + \Delta c_i y_i^o y'_i] + \sum_{i=1}^{n'_E} \sum_{j=1}^{n'_E} [c'_{ij}(1 - r_{ij}^o)r'_{ij} + \Delta c_{ij} r_{ij}^o r'_{ij}] \rightarrow \min_{r'_{ij}}. \quad (1.6)$$

Математическая модель задачи (1.6) позволяет учитывать возможные граничные случаи реинжиниринга системы – максимальные (в случае полной замены элементов, узлов, центра и связей между ними) и минимальные затраты (в случае модернизации или использования существующих элементов, узлов, центра и связей между ними).

В работе [19] приводятся несколько моделей оптимизации размещения узлов геораспределенной производственной системы (ГРПС) на территории для

разных постановок задач. При этом во всех приведенных постановках, основное внимание уделяется затратам на работу с земельными ресурсами.

Задача 1. Необходимо минимизировать затраты на приобретение земельных участков для размещения узлов ГРПС [19]:

$$W = \sum_i \sum_j X_{ij} w_{ij} \rightarrow \min, \quad (1.7)$$

с учетом ограничений:

$$R \leq R', \quad R = \sum_i \sum_j X_{ij} r_{ij}, \quad (1.8)$$

$$Q \leq Q', \quad Q = \sum_i \sum_j X_{ij} q_{ij}, \quad (1.9)$$

$W$  – стоимость (покупки, аренды) земельных участков;

$X_{ij}$  – булева переменная,  $X_{ij} = 1$  если для  $i$ -го узла ГРПС выбран  $j$ -й земельный участок,  $X_{ij} = 0$  в противном случае  $R$  – стоимость работ по приведению земельных участков к готовности разместить узлы ГРПС;

$w_{ij}$  – стоимость  $j$ -го земельного участка для размещения  $i$ -го узла ГРПС;

$R'$  – допустимая стоимость работ по приведению земельных участков к готовности разместить узлы ГРПС;

$Q$  – стоимость поддержки требуемого экологического состояния;

$Q'$  – допустимая стоимость поддержки требуемого экологического состояния;

$r_{ij}$  – стоимость работ по приведению  $j$ -го земельного участка к готовности разместить узлы ГРПС;

$q_{ij}$  – стоимость поддержки требуемого экологического состояния  $j$ -го земельного участка при размещении  $i$ -го узла ГРПС.

Задача 2. Необходимо минимизировать стоимость работ по приведению земельных участков к готовности разместить узлы ГРПС [19]:

$$R = \sum_i \sum_j X_{ij} r_{ij} \rightarrow \min, \quad (1.10)$$

с учетом ограничений:

$$W \leq W', \quad W = \sum_i \sum_j X_{ij} w_{ij} \rightarrow \min, \quad (1.11)$$

$$Q \leq Q', \quad Q = \sum_i \sum_j X_{ij} q_{ij}, \quad (1.12)$$

где  $W'$  – допустимая стоимость приобретения земельных участков;

$w_{ij}$  – стоимость  $j$ -го земельного участка для размещения  $i$ -го узла ГРПС.

Задача 3. Необходимо минимизировать стоимость поддержки требуемого экологического состояния земельных участков для размещения узлов ГРПС [19]:

$$Q = \sum_i \sum_j X_{ij} q_{ij} \rightarrow \min, \quad (1.13)$$

с учетом ограничений (1.8), (1.11).

Многокритериальная модель выбора земельных участков представлена в виде суммы отдельных локальных критериев с учетом ограничений (1.8), (1.11) и (1.12) [19]:

$$K = \alpha_W W + \alpha_R R + \alpha_Q Q \rightarrow \min, \quad (1.14)$$

где  $\alpha_W, \alpha_R, \alpha_Q$  – весовые коэффициенты частных критериев, определяемые экспертами.

Кроме затрат к числу важнейших характеристик СКММ относят также

оперативность и надежность. В работах [57, 58] представлены модели задач для выбора пропускных способностей каналов связи и распределения потоков в сети, а также модель задачи для оценки живучести сети.

Задана сеть *MPLS* (*Multiprotocol label switching*) в виде орграфа  $G=(X,E)$ , где  $X=\{x_j\}, j=\overline{1,n}$  – множество узлов сети,  $E=\{(r,s)\}$  – множество каналов связи. Задано множество классов сервиса, которые обслуживаются в маршрутизаторах  $K$  (*Class of Service – CoS*), набор пропускных способностей КС  $D=\{d_1,d_2\dots d_k\}, k=\overline{1,K}$ , удельная стоимость КС  $C=\{c_1,c_2\dots c_k\}, k=\overline{1,K}$ , матрица требований входящих потоков соответствующих классов  $H=\|h_{ij}^{(k)}\|, i,j=\overline{1,n}, k=\overline{1,K}$ , ограничения на среднюю задержку для классов потоков  $T_{cp,k}$ .

Необходимо выбрать такие пропускные способности КС  $\{\mu_{rs}^{(o)}\}$  и определить распределение потоков всех классов  $F(k)=\{f_{rs}(k)\}$ , при которых стоимость сети будет минимальной с учетом заданных ограничений. Модель задачи представлена в следующем виде [57]:

$$C_{\Sigma} = \sum_{(r,s) \in E} C_{rs}(\mu_{rs}), \quad (1.15)$$

при ограничениях:

$$T_{cp,k}(F(k), \mu_{rs}) \leq T_{зад,k}, \quad k=\overline{1,K}. \quad (1.16)$$

Показатель живучести в работе [57] определяется как вероятность передачи заданной доли номинального потока при отказах ее элементов. Задача оптимизации сети по показателям живучести представлена в следующей постановке. Заданы надежностные характеристики элементов сети: коэффициенты готовности КС  $K_{\Gamma_{rs}}$ , узлов  $K_{\Gamma_i}$ , вероятности отказов  $P_{отк_i} = 1 - K_{\Gamma_i}$ .

Необходимо определить такую структуру сети, в которой будут обеспечиваться ограничения по уровню живучести для всех классов  $K$  [57]:

$$P\{H_{\Sigma}^{\phi}(k) \geq r\%H_{\Sigma}^{(0)}(k)\} \geq P_{r,зад}^{(k)}, \quad r = (50 \div 100), \quad k = \overline{1, K}, \quad (1.17)$$

дополнительные затраты при этом:

$$C_{\Sigma} = \sum C_{rs}^{pez}(\mu_{rs}) \rightarrow \min, \quad (1.18)$$

где  $C_{rs}^{pez}$  – стоимость резервирования КС.

В работе [59] представлена модель структурно-топологического синтеза системы мониторинга по критериям минимума приведенных затрат на мониторинг с учетом интервальных оценок затрат на оборудование узлов и элементов мониторинга, КС между ними и минимума интенсивности отказов на основании интенсивности отказов компонентов системы.

Кроме перечисленных выше показателей эффективности, в качестве критерия для систем мониторинга используется также максимизация зоны мониторинга (покрытия). Различные модели оптимизации СКММ по критерию максимизации покрытия объектов мониторинга (с регулярным и нерегулярным радиусами покрытия) представлены в работах [22, 60–62].

На практике математические модели задач оптимизации топологических структур СКММ в процессах их проектирования или реинжиниринга реализуются с использованием соответствующих математических методов. Для повышения эффективности технологий автоматизированного проектирования СКММ необходимо предварительно провести анализ используемых в них методов решения задач реинжиниринга топологических структур.

### 1.3 Обзор методов оптимизации топологических структур систем мониторинга

Одной из важнейших задач, решаемых при проектировании и реинжиниринге СКММ является построение эффективных схем передачи информации в них. Это предполагает решение задачи структурно-топологического синтеза (реинжиниринга) СКММ. Суть задачи состоит в доопределении варианта построения системы (с учетом заданных технологий функционирования, параметров элементов и связей) количеством узлов и топологией, которую они формируют.

Среди методов решения таких задач выделяют точные (комбинаторные) и приближенные (в том числе эвристические) [63, 64]. Точные методы позволяют гарантированно найти оптимальное решение, однако, ввиду их NP-сложности на практике такие требуемые затраты могут быть неприемлемы, что приводит к необходимости получения приближенных решений за более короткое время.

Для поиска решения задачи синтеза (реинжиниринга) топологических структур ТРС предложен ряд методов [56, 64, 65].

Суть точного метода, предложенного в работе [56], состоит в определении отрезка  $[n'_{min}, n'_{max}]$ , который гарантированно содержит оптимум функции дополнительных затрат (1.6) (где  $n'_{min}$ ,  $n'_{max}$  – соответственно нижняя и верхняя границы оптимального количества узлов). Для определения оптимального решения необходимо пройти найденный отрезок  $[n'_{min}, n'_{max}]$ , который определяется оптимумами функций максимальных и минимальных дополнительных затрат, увеличивая или уменьшая значение количества узлов системы.

В работе [65] для поиска глобального решения предлагается использовать эволюционный метод роя частиц (метод численной оптимизации, который не требует знания точного градиента оптимизируемой функции).

Различные аспекты проблемы поиска глобальных решений для синтеза

СКММ представлены в работах [66, 67].

Для поиска локально оптимальных решений (определения мест оптимального размещения узлов топологической структуры СКММ) так же применяются точные и приближенные методы. При этом точные методы реализуются на основе комбинаторных (переборных) алгоритмов. Среди приближенных методов, к числу наиболее популярных относят методы эволюционного синтеза, основанные на использовании генетических алгоритмов (ГА) [65, 66] и методы, использующие схемы покоординатной оптимизации [71, 74].

Примеры использования эволюционных методов при решении задач размещения узлов систем мониторинга приведены в работах [72, 73]. Методы этой группы приспособлены и для решения многокритериальных задач, но при этом уступают другим методам (например, использующим процедуры покоординатной оптимизации) по показателю точности и по комплексному показателю «точность-время решения».

Обширный анализ методов локального поиска представлен в [74–76].

С целью повышения качества получаемых проектных решений и уменьшения времени решения задачи в схемах приближенных методов применяют следующие стратегии:

– определение множества элементов, на базе которых целесообразно создавать узлы (анализ матрицы ближайших соседей, анализ минимального стягивающего дерева, анализ стягивающего дерева связывающего элементы с центром) [77–79]. Алгоритм может остановиться на одном из локальных минимумов, который далек от оптимального решения. Увеличение множества мест возможного размещения узлов (списка соседей) увеличивает вероятность получения оптимального решения, при этом увеличивается и время получения решения. На достаточно больших объемах данных такой подход может оказаться малоэффективным по показателю «точность-время решения»;

– оценка оптимального количества узлов, определение пар альтернатив [64, 80, 81]. Увеличение объема анализируемых данных, и соответственно, мест

возможного размещения элементов приводит к тому, что вычисление предварительных оценок приводит к незначительному уменьшению времени получения решения [64]. Применение кластерного анализа для решения данной задачи имеет так же ряд недостатков. Так результат решения существенно зависит от инициализации центра кластеров (*k-means*, *c-means*) [82, 83]. Этот недостаток предлагается компенсировать различными алгоритмами выбора начальных значений, например *k-means++* [84]. При этом алгоритмы кластеризации стремятся минимизировать суммарное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров (с учетом используемой стратегии определения расстояния между точками), что может не приводить к оптимальному решению задачи;

– перезапуск алгоритма с множеством случайно выбранных начальных значений, процедура *Multi-start* [85]. Увеличение множества возможного размещения узлов приводит к увеличению числа локальных экстремумов, что приводит к неэффективности использования этого подхода на больших объемах данных;

– использование метаэвристик [86, 87]. Такой подход предполагает улучшение процесса поиска оптимального решения путем временного принятия худшего варианта, позволяя таким образом выйти из локального оптимума. Для каждой последующей итерации используется опыт, накопленный во время пробега алгоритма. Недостатком такого подхода является использование дополнительной памяти для хранения данных о предыдущих итерациях. Размер хранилища информации о предыдущих итерациях может изменяться динамически и существенно влияет на время работы алгоритма. Чем больше размер хранилища, тем медленнее работает алгоритм. Небольшой размер хранилища позволяет осуществить более быстрый поиск, однако это приводит к возможности многократного расчета одного и того же решения.

Задача размещения узлов топологической структуры СКММ решается в условиях различной степени определенности исходных данных, временных и

ресурсных ограничений. Это требует разработки методов решения задачи определения оптимального количества и мест размещения узлов топологической структуры СКММ, различающихся по показателям точности и сложности, которые имеют меньшие временные затраты, чем комбинаторные методы и большую точность, чем существующие приближенные методы.

Для практической реализации математических моделей и методов структурно-топологического реинжиниринга СКММ необходимо провести анализ подходов к разработке технологий и методического обеспечения автоматизированного проектирования и реинжиниринга подобных объектов.

#### 1.4 Автоматизация процессов проектирования и реинжиниринга систем мониторинга

С увеличением сложности современных СКММ возрастают временные и финансовые затраты на их проектирование (реинжиниринг), возрастают риск и цена ошибочных или нерациональных решений. Это приводит к необходимости разработки и использования специализированных автоматизированных рабочих мест (АРМ) и систем автоматизированного проектирования (САПР), обеспечивающих получение эффективных проектных решений.

Технологии проектирования и реинжиниринга в современных САПР построены на основе структурного, блочно-иерархического, объектно-ориентированного подходов, которые реализуются с использованием итерационных процедур.

Использование этих подходов позволяет структурировать процесс проектирования (реинжиниринга), типизировать и унифицировать проектные решения [88].

Суть современных технологий проектирования и реинжиниринга СКММ как территориально распределенных объектов может быть представлена в виде итерационной схемы, включающей следующие этапы (рис. 1.3) [100].

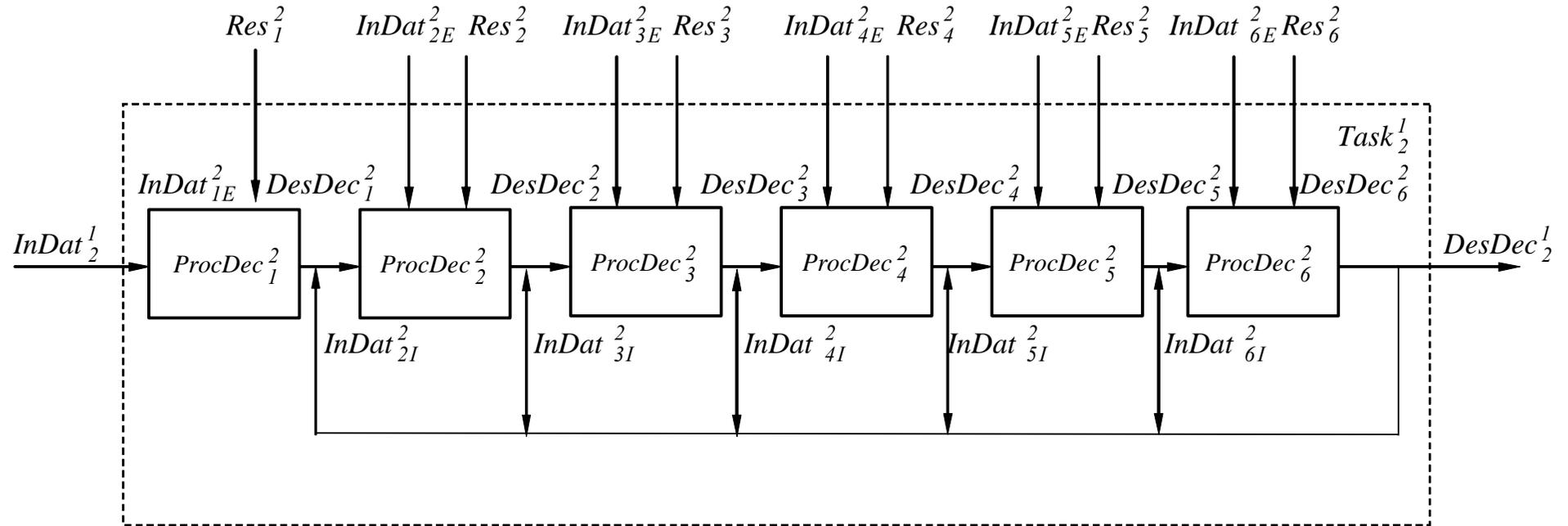
1. Начало решения. Ввод исходных данных  $InDat_2^1$  и ограничений  $Res_2^1$  задачи  $Task_2^1$ .
2. Формирование стратегии поиска решения.
3. Выбор варианта структуры системы (задача  $Task_2^2$ ).
4. Определение топологии элементов и связей (задача  $Task_3^2$ ).
5. Выбор технологии функционирования (задача  $Task_4^2$ ).
6. Определение параметров элементов и связей (задача  $Task_5^2$ ).
7. Проверка системы ограничений задачи  $Task_2^1$ . Если оценки свойств полученного варианта построения системы  $K(s)$  не удовлетворяют ограничениям задачи  $Res_2^1$ , перейти к п.3.
8. Оценка эффективности и выбор лучшего варианта.
9. Если стратегия поиска решения не исчерпана, переход к п.3.
10. Формирование решений оператором, оценка их эффективности и выбор лучшего варианта.
11. Окончание решения. Определены лучший вариант построения ТРС  $s^o$  и его оценка  $K(s^o)$  по множеству частных критериев  $K$ .

К настоящему времени разработаны и успешно используются системы и отдельные средства проектирования систем крупномасштабного мониторинга различного целевого назначения.

В работе [21] приведено описание системы автоматизации проектирования системы наземного мониторинга.

Архитектура этой системы состоит из совокупности взаимосвязанных модулей:

- модуля автоматизированного проектирования;
- модуля расчетного анализа;
- модуля интерфейса;
- управляющего модуля;
- базы данных со служебной информацией, информацией об оборудовании и картографическими данными.



$ProcDec_1^2$  – процедура определения принципов построения ТРС;  $ProcDec_2^2$  – процедура выбора структуры;  $ProcDec_3^2$  – процедура определения топологии элементов и связей;  $ProcDec_4^2$  – процедура выбора технологии функционирования;  $ProcDec_5^2$  – процедура определения параметров элементов и связей;  $ProcDec_6^2$  – процедура оценки эффективности вариантов и выбора решений.

Рисунок 1.3 – Итерационная схема системного проектирования ТРС

Ее основными функциями являются:

- ввод хранение и обработка исходных данных;
- выбор оборудования системы;
- определение мест размещения оборудования;
- вывод данных о полноте покрытия.

Для реализации этой САПР применялись технологии *Silverlight*, *XAML*, алгоритмы функционирования реализованы на языке *C#* в среде *Microsoft Visual Studio 2010*, база данных реализована на *Microsoft SQL Server 2008*.

В работе [57] представлена САПР сетей с технологией MPLS, функциями которой являются:

- решение комплекса задач синтеза и оптимизации структуры и топологии сетей с технологией MPLS при обеспечении заданных показателей качества;
- анализ показателей живучести и оптимизация структуры сети при заданных ограничениях на показатели живучести.

Архитектура ее программного комплекса состоит из следующих модулей:

- модуль структурного синтеза сети;
- модуль оценки показателей качества;
- модуль анализа и оптимизации функциональных характеристик сети;
- модуль анализа живучести сети, который включает программы нахождения максимального потока в сети при отказах ее элементов.

Для работы этой САПР был разработан и реализован банк данных, который включает в себя отдельные базы данных каналов связи, узлов сети и их характеристик, базу данных требований входящих потоков и их распределения по классам сервиса. В качестве СУБД использовался *My SQL Server*.

Проведенный анализ технологий проектирования позволяет представить обобщенную структурную схему САПР для реинжиниринга систем мониторинга в следующем виде (рис. 1.4).

Для упрощения разработки САПР и ускорения решения прикладных

задач разрабатываются новые подходы и технологии. Так, в работе [88] предлагается использование технологии построения и анализа топологических структур для САПР. Суть технологии заключается в возможности восстановления различных топологических отношений между объектами непосредственно перед решением прикладной задачи.



Рисунок 1.4 – Обобщенная схема архитектуры САПР реинжиниринга систем мониторинга

Таким образом, автоматизация и развитие технологий проектирования крупномасштабных объектов, включая СКММ, не позволяют в короткое время существенно повышать эффективность проектных решений. С учетом этого, основным резервом повышения эффективности современных систем автоматизированного проектирования крупномасштабных объектов следует признать совершенствование их математического обеспечения.

## 1.5 Постановка цели и задач исследования

Проведенный обзор литературных источников, посвященных различным аспектам проблемы реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга, показал, что к настоящему времени накоплен существенный опыт в ее решении. При этом основные результаты получены в процессе решения отдельных задач проблемы: размещения центров, узлов или элементов системы; выбора их типов; определение рациональных значений параметров каналов связи; изменение технологии функционирования.

В проектах реинжиниринга многие решения принимаются на основании опыта и интуиции проектировщиков, а топологические аспекты в подавляющем большинстве моделей не рассматриваются в явном виде или рассматриваются вне теснейшей взаимосвязи с другими аспектами реинжиниринга.

В процессе некоторых задач используется нормативный подход, при котором количество элементов или подсистем в них определяется исходя из утвержденных нормативов без учета территориального расположения наблюдаемых объектов, особенностей технологий, других факторов.

Анализ задач реинжиниринга топологических структур СКММ в различных постановках показал, что большинство из них относится к классу комбинаторных, а все методы их решения разделяют на три группы: комбинаторные, отсечения и приближенные (эвристические).

Комбинаторные методы предполагают перебор всевозможных вариантов топологических структур. Временная сложность большинства методов этой группы имеет порядок от  $C_n^m$  до  $2^n$  и даже  $(m-1)!$  (где  $n$  – количество мест возможного размещения элементов системы;  $m$  – количество элементов системы). С учетом современного развития средств вычислительной техники это ограничивает область их применения системами с относительно небольшим количеством элементов (в зависимости от вида задачи до 50–100).

Приближенные методы находят широкое применение в связи со сложностью реализации и невозможностью применения для решения

практических задач большой размерности точных методов.

Характерной особенностью задач реинжиниринга СКММ является их многокритериальность. Это затрудняет разработку формальных методов их решения. Одной из основополагающих при реинжиниринге СКММ является задача выбора совокупности критериев оптимальности, направленных на максимизацию эффектов от их функционирования и минимизацию затрат на их модернизацию и (или) эксплуатацию. В качестве единственного критерия при решении подавляющего большинства задач используются их стоимость (капитальные, эксплуатационные или приведенные затраты), гораздо реже в качестве критериев используются оперативность, живучесть или надежность.

Наиболее распространенные подходы, позволяющие упростить многокритериальные задачи реинжиниринга СКММ, состоят в определении основного критерия и переводе остальных в разряд ограничений или свертке частных критериев в функцию полезности.

Неполная определенность исходных данных, многокритериальность, высокая вычислительная сложность методов решения, а также наличие специфических трудноформализуемых условий и ограничений позволяют отнести задачу реинжиниринга СКММ к слабоструктурированным.

Для задач такого вида перспективными оказываются интерактивные (человеко-машинные) технологии решения, позволяющие объединить в едином процессе наиболее эффективные математические методы оптимизации с опытом и знаниями проектировщика или лица, принимающего решения. При этом проектировщик имеет возможность активно вмешиваться в процесс поиска решения. Такие технологии синтеза реализуются на основе так называемых систем поддержки принятия управленческих или проектных решений (*DSS – Decision Support System*).

Таким образом, несмотря на многочисленные публикации, посвященные решению проблемы реинжиниринга СКММ, эта проблема еще далеко не решена и требует дальнейшего исследования. Поэтому актуальной является задача повышения эффективности систем автоматизации реинжиниринга

систем крупномасштабного мониторинга путем разработки комплекса математических моделей, методов и инструментальных средств для решения многокритериальных задач реинжиниринга топологических структур.

С учетом этого, целью диссертационной работы является разработка математических моделей, эффективных методов и программного обеспечения для решения задач многокритериального реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести обзор и анализ современного состояния проблемы реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга;
- разработать системологическую модель проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга;
- выполнить формализацию наиболее часто используемых на практике частных критериев эффективности для задач реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга;
- разработать математические модели задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга по множеству функционально-стоимостных показателей;
- разработать базовый метод, позволяющий получать эффективные решения задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга;
- разработать модификации метода решения задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга, учитывающие ограничения по показателям точности и времени получения решений;
- разработать алгоритмы и программное обеспечение для решения задач реинжиниринга топологических структуры систем крупномасштабного мониторинга;
- провести экспериментальное исследование эффективности и практическую апробацию полученных теоретических результатов.

## Выводы по разделу 1

Растущая потребность в непрерывном получении данных об объектах мониторинга, изменение средств и условий мониторинга приводит к необходимости развития, модернизации и реинжиниринга существующих систем, а все возрастающая сложность систем мониторинга приводит к существенному увеличению затрат на их проектирование, создание, эксплуатацию и реинжиниринг.

Современные средства крупномасштабного мониторинга представлены преимущественно централизованными системами с радиальной, радиально-узловой или смешанной структурой и включают подсистемы сбора данных (пункты мониторинга, элементы), обработки и хранения информации (узлы); распространения информации (центр или множество центров).

подавляющее большинство публикаций, посвященных проблеме оптимизации систем крупномасштабного мониторинга, других крупномасштабных объектов, посвящено решению отдельных частных задач реинжиниринга по одному критерию применительно к конкретному виду систем мониторинга.

Высокая временная сложность точных и низкая точность приближенных (эвристических) методов делает первые непригодными для решения задач оптимизации систем с большим количеством элементов, а использование вторых приводит к получению решений далеких от оптимальных. Это, в свою очередь, приводит к значительным нерациональным затратам разнородных ресурсов в проектах реинжиниринга систем мониторинга.

По результатам анализа проблемы реинжиниринга СКММ выявлено противоречие между необходимостью повышения эффективности существующих вариантов их реализации и ограниченностью существующих математических моделей и методов решения задач их структурно-топологической оптимизации, используемых в процессах их проектирования и реинжиниринга.

На основании проведенного анализа проблемы структурно-топологического реинжиниринга СКММ сформулированы цель и задачи исследования.

Основные результаты этого раздела опубликованы в [1, 8, 9, 13, 14].

## РАЗДЕЛ 2

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО РЕИНЖИНИРИНГА СИСТЕМ КРУПНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА

## 2.1 Формализация описания систем крупномасштабного мониторинга

Формализованное описание системы крупномасштабного мониторинга основано на формализации описания территориально-распределенной системы  $S$ , которое предложено в работе [54]:

$$S = \langle E, R, G \rangle, \quad (2.1)$$

где  $E$  – множество элементов;

$R$  – множество отношений (связей) между элементами;

$G$  – топологическая реализация структуры  $\langle E, R \rangle$ .

СКММ рассматривается как территориально-распределенная система  $S$ , топологическая реализация структуры которой может быть представлена совокупностью топологий элементов  $G_E$ , отношений  $G_R$ , траекторий передачи информации  $G_A$ .

Для реализации структурно-топологического реинжиниринга СКММ необходимо определить подмножество свойств, которыми система обладает на данный момент  $P''$  и которыми система должна обладать после реализации реинжиниринга  $P'$ . Свойства  $P'$  и  $P''$  могут быть определены на универсальных множествах элементов  $E^U$ , отношений  $R^U$ , топологий  $G^U$  и являются подмножествами множества свойств  $P^U$ :

$$P^U = \varphi(E^U, R^U, G^U), \quad (2.2)$$

где  $\varphi$  – некоторое отображение.

Универсальное множество  $E^U$  включает всевозможные типовые элементы, которые могут быть использованы в процессе реинжиниринга СКММ, и определяется элементами множеств  $E^U$  и  $R^U$  [54].

Определив разность множеств элементов в существующей  $E''$  и новой структурах  $E'$  можно получить подмножество элементов, которые должны быть включены в новую структуру  $E^+$ :

$$E^+ = E'' \setminus E'. \quad (2.3)$$

Таким же образом можно определить подмножество элементов существующей структуры СКММ, которые будут исключены из дальнейшего рассмотрения в процессе реинжиниринга  $E^-$ :

$$E^- = E' \setminus E''. \quad (2.4)$$

Пересечение множеств  $E'$  и  $E''$  определяет подмножество элементов  $E^S$ , которые будут повторно использованы в системе после реинжиниринга:

$$E^S = E' \cap E'', \quad E' = E^S \cup E^-, \quad E'' = E^+ \cup E^S. \quad (2.5)$$

Полученные множества  $E'$  и  $E''$  определяют состав множества связей между элементами  $R'$ ,  $R''$  и множества топологий  $G'$ ,  $G''$ . Это позволяет определить соответствующие подмножества отношений  $R^+$ ,  $R^-$  и топологий  $G^+$ ,  $G^-$ , которые должны будут включены или исключены в процессе реинжиниринга, а так же подмножества отношений и топологий, которые будут повторно использоваться в системе после реинжиниринга  $R^S$ ,  $G^S$ :

$$R^+ = R'' \setminus R', \quad R^- = R' \setminus R'', \quad R^S = R' \cap R'', \quad R' = R^S \cup R^-, \quad R'' = R^+ \cup R^S; \quad (2.6)$$

$$G^+ = G'' \setminus G', G^- = G' \setminus G'', G^S = G' \cap G'', G' = G^S \cup G^-, G'' = G^+ \cup G^S. \quad (2.7)$$

Определение множества свойств системы, которые должны быть включены  $P^+ = P'' \setminus P'$  или исключены  $P^- = P' \setminus P''$  в процессе реинжиниринга, основывается на анализе схемы взаимосвязей категорий «элемент», «отношение», «топология», «свойство» (рис.2.1).

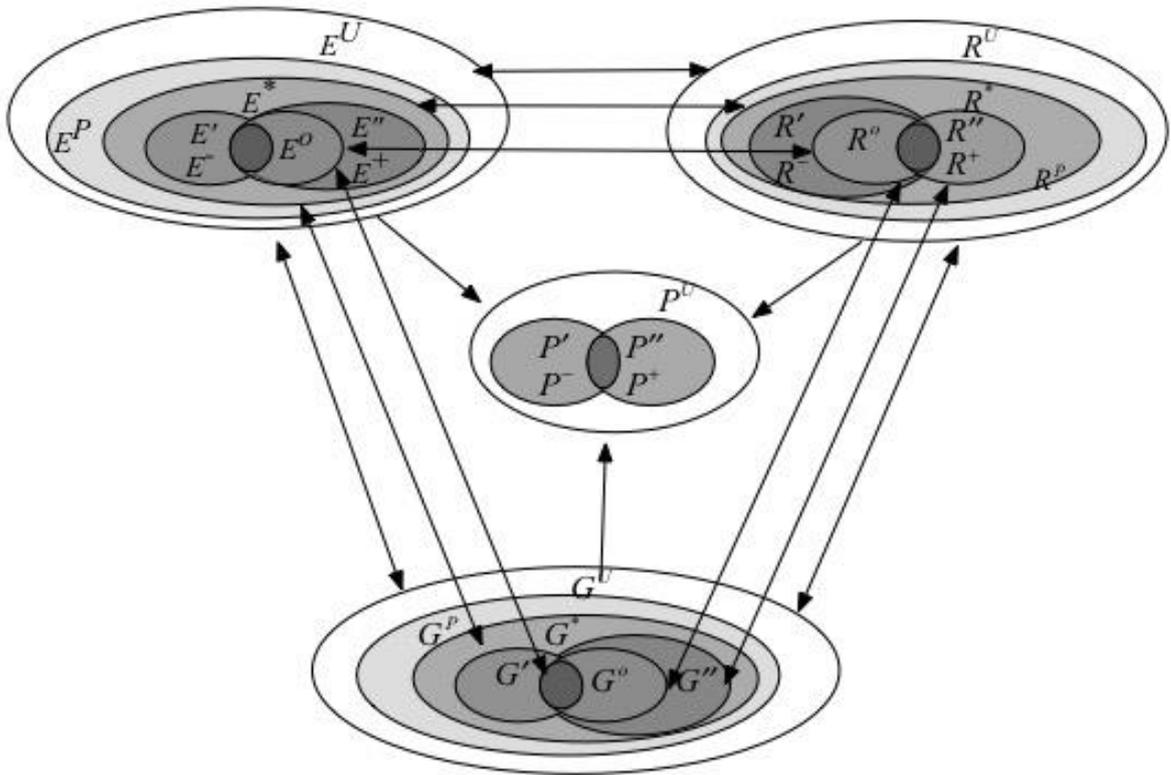


Рисунок 2.1 – Схема связи категорий «элемент», «отношение», «топология» и «свойство» в процессе реинжиниринга СКММ

На первом этапе процесса реинжиниринга СКММ множество допустимых решений  $S^* = \{s\}$ ,  $S^* \subseteq S''$  определяется подмножествами элементов  $E^* \subseteq E'' \subseteq E^U$ , отношений  $R^* \subseteq R'' \subseteq R^U$  и топологий  $G^* \subseteq G'' \subseteq G^U$ .

На последующих этапах процесса реинжиниринга топологической структуры СКММ определяются подмножества элементов  $E^o \subseteq E^*$ , отношений  $R^o \subseteq R^*$  и топологий  $G^o \subseteq G^*$  из допустимой области  $S^* = \{s\}$ , совокупность

которых позволяет получить требуемые свойства системы  $P'' \subseteq P^U$ . Свойства системы задаются в виде целевых функций и функционально-стоимостных ограничений.

Для проведения структурно-топологического реинжиниринга СКММ необходимо провести декомпозицию проблемы на задачи различных иерархических уровней, учитывая их взаимосвязь по входным и выходным данным.

## 2.2 Декомпозиция проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга

Проведенный анализ современных публикаций, направленных на решение проблем синтеза и реинжиниринга территориально-распределенных систем и СКММ показал, что на данный момент не существует единой универсальной модели жизненного цикла систем. В жизненном цикле СКММ, как и большинства антропогенных объектов, традиционно выделяют стадии: замысла; разработки; производства; применения; сопровождения (поддержки применения); прекращения применения и утилизации [1].

Разработка (синтез) новой системы мониторинга предполагает реализацию новой функциональности с использованием новых ресурсов и технологий.

Под сопровождением системы мониторинга понимается деятельность, направленная на выполнение изменений, которые не влияют на структуру существующей системы (например, коррекция и исправление недостатков системы, выявленных в процессе эксплуатации).

В отличие от сопровождения, модернизация (развитие) предусматривает значительные изменения существующей системы мониторинга, которые могут влиять на существующую структуру системы, однако в процессе модернизации не принимается решение об утилизации системы или замещении ее новой.

Проведение структурно-топологического реинжиниринга СКММ связано

с изменением характеристик контролируемых объектов, требованиями точности показаний мониторинга и качества работы системы в целом, совершенствованием ее элементов, технологий сбора, обработки, хранения и передачи информации. Это приводит к необходимости кардинальных структурных, топологических, технологических, параметрических изменений. При этом допускается как полная замена оборудования элементов, узлов и центра, так и их модернизация.

Структурно-топологический реинжиниринг СКММ состоит из множества подзадач (этапов), которые во многом совпадают с задачами традиционного проектирования, однако могут отличаться по исходным данным и ограничениям.

Основываясь на общей схеме декомпозиции проблемы синтеза ТРС [54], декомпозиция проблемы реинжиниринга может быть проведена на мета-, макро- и микроуровнях (рис. 2.2):

$$MetaTask = Task_1^0, Task_1^0 = \{Task_i^1\}, i = \overline{1, i_1}, Task_i^1 = \{Task_j^2\}, j = \overline{1, i_2}, \quad (2.8)$$

где  $\{Task_i^l\}$  – множество задач реинжиниринга СКММ уровня  $l$ ,  $l = \overline{0, 2}$ ;

$i_1, i_2$  – соответственно, количество задач, решаемых на уровнях 1 и 2.

Задачи каждого уровня определяются входными и выходными данными и могут быть представлены в следующем виде:

$$Task_i^l : In_i^l \rightarrow Out_i^l, i = \overline{1, i_1}, l = \overline{0, 2}, \quad (2.9)$$

где  $In_i^l, Out_i^l$  – соответственно входные и выходные данные  $i$ -й задачи  $l$ -го уровня.

**Задача метауровня ( $l = 0$ ).** На метауровне задача структурно-топологического реинжиниринга СКММ состоит в получении такого решения, которое будет учитывать текущее состояние системы мониторинга (параметры,

центра, узлов, элементов и связей, структурно-топологическую реализацию, технологию функционирования). При этом решение должно быть достаточно устойчивым к возможным изменениям условий проведения мониторинга.

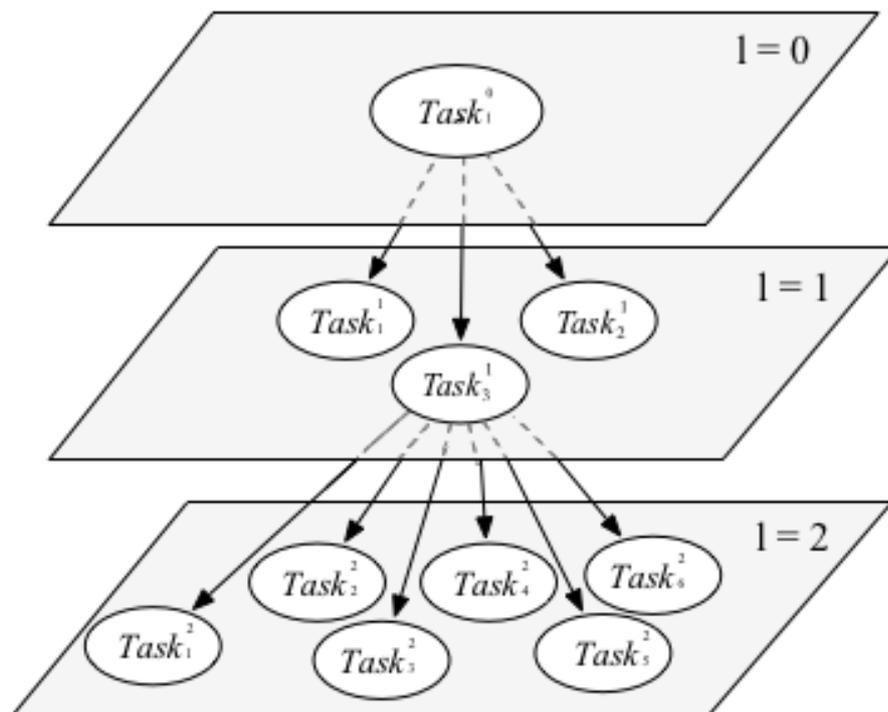


Рисунок 2.2 – Схема декомпозиции проблемы структурно-топологического реинжиниринга системы крупномасштабного мониторинга

Формально задача реинжиниринга на метауровне может быть представлена в виде [1]:

$$MetaTask = Task_1^0 : \{ObjS, s, Q^*, C^*, S'\} \rightarrow \{s^o, K(s^o)\}, \quad (2.10)$$

где  $ObjS$  – множество количественных и качественных характеристик объектов СКММ;

$s$  – существующий вариант построения СКММ;

$Q^*$  – требуемый набор функциональных свойств системы;

$C^*$  – предельные значения стоимостных характеристик системы;

$S'$  – область реинжиниринга (возможные варианты построения) системы;

$s^o$  – вариант построения СКММ, получаемый в результате ее реинжиниринга;

$K(s^o)$  – критериальная оценка выбранного варианта структуры и топологии СКММ.

**Задачи макроуровня ( $l = 1$ ).** Задачи макроуровня составляют средний уровень процесса структурно-топологического реинжиниринга СКММ:

$$Task^l = \{Task_i^l\}, i = \overline{1,3}, \quad (2.11)$$

где  $Task_1^l$  – оценка свойств существующей системы;

$Task_2^l$  – принятие решения о реинжиниринге;

$Task_3^l$  – разработка технического задания на реинжиниринг.

**$Task_1^l$  – оценка свойств существующей системы.** Для адекватной оценки свойств существующей системы необходимо проведение детального анализа по соотношению показателей «эффект–затраты», в результате которого анализируется эффективность структурно-топологической организации, параметров и элементов, технологий функционирования. Полученная информация имеет оценочный характер, некоторые из оценок могут быть получены только экспертным путем.

Входные данные: множество объектов мониторинга  $ObjS$ ; существующий вариант построения системы  $s$ ; множество элементов системы мониторинга  $E$ ; множество связей между элементами  $R$ ; топология элементов и связей между ними  $G$ ; технология функционирования системы  $A$ .

Выходные данные: оценки эффекта от использования системы  $Q(s)$ , затрат на функционирование системы  $C(s)$ , критериальная оценка  $K(s)$  соотношения «эффект-затраты» [1]:

$$Task_1^l : \{ObjS, s, E, R, G, A\} \rightarrow \{Q(s), C(s), K(s)\}. \quad (2.12)$$

**$Task_2^1$**  – принятие решения о реинжиниринге. На основании результатов решения задачи  $Task_1^1$  проводится анализ вариантов возможных изменений в системе по заданным показателям качества, определяется лучший вариант  $s^*$  и принимается решение о необходимости проведения модернизации, реинжиниринга или отказе от реинжиниринга (в случае если существующая система удовлетворяет предъявляемым требованиям).

Входные данные: выходные данные задачи  $Task_1^1$ , множество дополнительных ограничений, накладываемых на варианты реинжиниринга (модернизации) системы  $Los$ . Формально задачу  $Task_2^1$  можно представить следующим образом [1]:

$$Task_2^1 : \{ObjS, s, E, R, G, A, Q(s), C(s), K(s), Los\} \rightarrow \{s^*, Q(s^*), C(s^*), K(s^*)\}. \quad (2.13)$$

**$Task_3^1$**  – разработка технического задания на реинжиниринг. На основании проведенного анализа существующей системы  $s$  (задача  $Task_1^1$ ), осуществляющей мониторинг множества объектов  $ObjS$ , допустимых принципов ее построения  $\Pi$ , имеющихся ресурсов  $C^*$ , предъявляемых к системе требований  $Q^*$  и существующих ограничений  $Los$  проводится разработка технического задания на ее реинжиниринг [1]:

$$Task_3^1 : \{ObjS, \Pi, E, R, G, A, C^*, Q^*, Los\} \rightarrow \{s^o, Q(s^o), C(s^o), K(s^o)\}. \quad (2.14)$$

Предлагаемая технология решения задачи структурно-топологического реинжиниринга СКММ основана на идеях агрегативно-декомпозиционного подхода, системного анализа и проектирования сложных систем.

На основании анализа множества задач первого уровня  $Task^1 = \{Task_i^1\}, i = \overline{1,3}$  предлагается итерационная схема технологии реинжиниринга СКММ на макроуровне, отражающая взаимосвязи задач по входным и выходным данным (рис. 2.3).

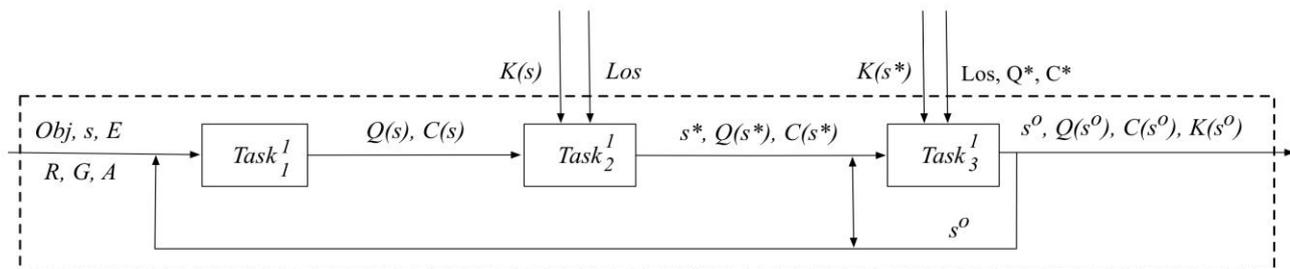


Рисунок 2.3 – Итерационная схема технологии структурно-топологического реинжиниринга СКММ на макроуровне

**Задачи микроуровня ( $l = 2$ ).** Задачи микроуровня ориентированы на реализацию концепции реинжиниринга и являются подзадачами задач макроуровня [1]:

$$Task^2 = \{Task_j^2\}, \quad j = \overline{1,6}, \quad (2.15)$$

где  $Task_1^2$  – выбор принципов построения системы;

$Task_2^2$  – реинжиниринг структуры системы;

$Task_3^2$  – реинжиниринг топологии элементов и связей;

$Task_4^2$  – реинжиниринг технологии функционирования;

$Task_5^2$  – определение параметров элементов и связей;

$Task_6^2$  – оценка эффективности и выбор лучшего варианта реинжиниринга.

**$Task_1^2$  – выбор принципов построения системы.** Определение новых принципов функционирования и построения СКММ  $\pi \in \Pi$  осуществляется неформальными методами на основании знаний и опыта проектировщиков. Решение задачи выбора принципов построения и функционирования СКММ основано на решении традиционной задачи синтеза ТРС [54]:

$$Task_1^2 : \{ObjS, \Pi, S', K, Q^*, C^*\} \rightarrow \{\pi, S^*\}, \quad (2.16)$$

где  $ObjS$  – множество характеристик объектов мониторинга, определяющих требования к элементам и связям системы;

$\Pi$  – множество допустимых принципов построения СКММ;

$K$  – множество частных критериев для оценки и выбора варианта построения системы;

$Q^*$  – требуемый уровень эффекта системы;

$C^*$  – предельный уровень затрат на систему;

$S^*$  – множество допустимых вариантов построения системы, определяемых выбранными принципами ее построения  $\pi \in \Pi$ .

**$Task_2^2$  – реинжиниринг структуры системы.** Суть задачи состоит в определении варианта ее построения  $s_{ER}^o \in S^*$  путем уточнения множества элементов  $E$  и связей  $R$ , оценки свойств полученного варианта в критериальном пространстве  $K(s_{ER}^o)$ , с учетом ограничений на уровень эффекта  $Q^*$  и затрат  $C^*$ :

$$Task_2^2 : \{ObjS, s, S^*, E, R, G, A, B, Q^*, C^*\} \rightarrow \{E^o, R^o, s_{ER}^o, K(s_{ER}^o)\}. \quad (2.17)$$

где  $G$  – топология (территориальное размещение) элементов и связей;

$B$  – множество значений параметров элементов и связей;

$A$  – технология функционирования СКММ.

**$Task_3^2$  – реинжиниринг топологии элементов и связей.** Суть задачи состоит в изменении существующего варианта построения системы  $s \in S^*$ , задаваемого множествами элементов  $E$ , связей между ними  $R$ , значениями их параметров  $B$  и технологией функционирования  $A$ . В процессе решения задачи проводится оптимизация топологии элементов и связей  $G \subseteq G^*$  с учетом заданных ограничений на уровни эффекта  $Q^*$  и затрат  $C^*$ :

$$Task_3^2 : \{Obj_s, s, S^*, E, R, G, A, B, Q^*, C^*\} \rightarrow \{G^o, s_G^o, K(s_G^o)\}, \quad (2.18)$$

где  $G^o$  – вариант топологии системы, полученный после ее реинжиниринга;

$s_G^o$  – вариант реинжиниринга системы с выбранной топологией;

$K(s_G^o)$  – покритеиальная оценка полученного варианта реинжиниринга системы с выбранной топологией  $s_G$ .

**$Task_4^2$  – реинжиниринг технологии функционирования.** Задача состоит в дополнении варианта реинжиниринга  $s \in S^*$  лучшей технологией функционирования  $A \subseteq A^*$  при ограничениях на требуемые уровни эффекта  $Q^*$  и затрат (стоимости)  $C^*$ :

$$Task_4^2 : \{Obj_s, s, S^*, E, R, G, A, B, Q^*, C^*\} \rightarrow \{A^o, s_A^o, K(s_A^o)\}, \quad (2.19)$$

где  $s_A^o$  – вариант построения системы с оптимизированной технологией ее функционирования  $A^o$ ;

$K(s_A^o)$  – покритеиальная оценка полученного варианта  $s_A^o$ .

**$Task_5^2$  – определение параметров элементов и связей.** Решение задачи предполагает внесение таких изменений в СКММ, чтобы совокупность параметров  $B$ , элементов  $E$  и связей  $R$  приводили к наиболее эффективному функционированию системы.

Задача  $Task_5^2$  может быть представлена следующим образом [1]:

$$Task_5^2 : \{Obj_s, s, S^*, E, R, G, A, B, Q^*, C^*\} \rightarrow \{B^o, s_B^o, K(s_B^o)\}, \quad (2.20)$$

где  $B^o$  – оптимальный вариант значений параметров элементов и связей системы;

$s_B^o$  – вариант реинжиниринга с наилучшими значениями параметров элементов и связей;

$K(s_B^o)$  – покритериальная оценка полученного варианта  $s_B^o$ .

**$Task_6^2$  – оценка эффективности и выбор лучшего варианта реинжиниринга.** В процессе решения задачи проводится оценка вариантов построения СКММ  $s \in S^*$  по заданному множеству критериев  $K(s)$  и выбор лучшего варианта  $s^o = \underset{s \in S^*}{arg\ opt} K(s)$ .

Решение этой задачи базируется на заданных структурных  $(E, R)$ , топологических  $G$  и технологических  $A$  характеристиках системы, параметрах элементов и связей  $B$ , ограничениях на уровни эффекта  $Q^*$  и затрат  $C^*$ :

$$Task_6^2 : \{Objs, s, S^*, E, R, G, A, B, Q^*, C^*\} \rightarrow \{s^o, K(s^o)\}. \quad (2.21)$$

В процессе структурно-топологического реинжиниринга СКММ могут также решаться другие задачи, отражающие специфику конкретной системы мониторинга и (или) используемой технологии проектирования.

Декомпозиция задач микроуровня  $Task_j^2, j = \overline{1,6}$  формирует комплекс задач синтеза элементов, элементарных связей и элементов технологий функционирования СКММ. Предложенный подход к декомпозиции проблемы структурно-топологического реинжиниринга СКММ позволяет структурировать процесс формирования оптимального варианта системы, позволяет получить более точные оценки эффективности полученной в процессе реинжиниринга системы. Итерационная схема технологии реинжиниринга топологических структур СКММ на микроуровне базируется на входных и выходных данных задач  $Task^2 = \{Task_j^2\}, j = \overline{1,6}$  и взаимосвязей между ними (рис. 2.4).

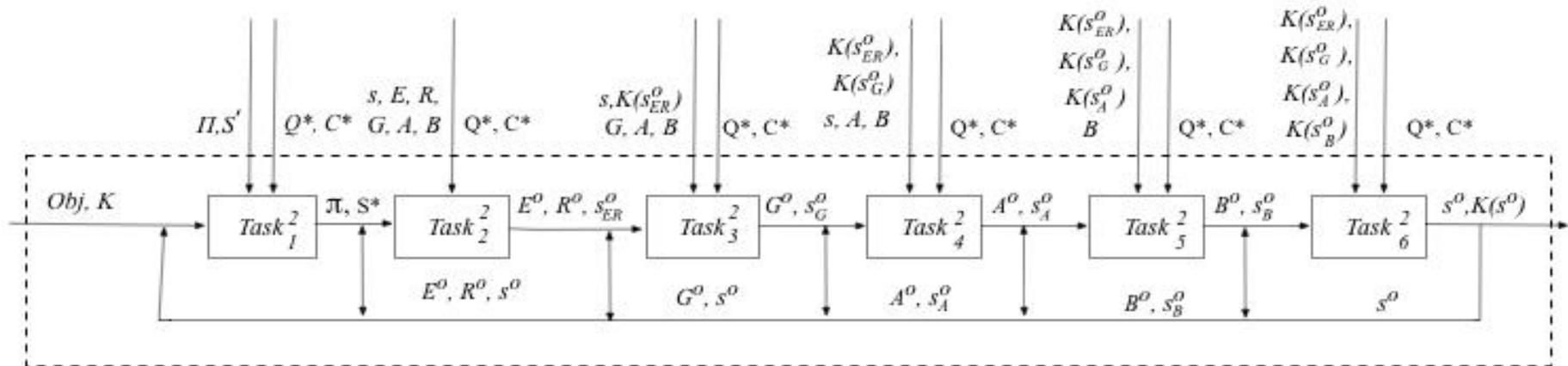


Рисунок 2.4 – Итерационная схема технологии структурно-топологического реинжиниринга СКММ на микроуровне

Предложенная трехуровневая схема декомпозиции и разработанная системологическая модель задачи структурно-топологического реинжиниринга системы крупномасштабного мониторинга позволила определить состав и схему взаимосвязи проблемно связанных задач по входным и выходным данным. Для создания более эффективных средств структурно-топологического реинжиниринга СКММ с предложенной технологией для САПР необходимо сформулировать и проанализировать общую постановку задачи структурно-топологического реинжиниринга систем мониторинга.

### 2.3 Постановка задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга

Простейшими, широко распространенными на практике являются задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем мониторинга, построенных на однотипных элементах, узлах и каналах связи.

Базовую задачу реинжиниринга топологической структуры трехуровневой СКММ, построенную на однотипных элементах, узлах и каналах связи будем рассматривать в следующей постановке [2]. Задано:

– множество элементов системы мониторинга  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , покрывающих все множество объектов мониторинга;

– существующий вариант топологической структуры системы  $s' \in S$  (где  $S$  множество допустимых вариантов топологических структур), задаваемый местами расположения элементов  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , узлов  $y' = [y'_i]$ ,  $i = \overline{1, n}$  ( $y'_i$  – булева переменная,  $y'_i = 1$ , если на базе  $i$ -го элемента существует узел;  $y'_i = 0$  – в противном случае), центра (без потери общности будем считать, что центр системы расположен на базе элемента  $i = 1$ ), а также связями между элементами, узлами и центром  $[s'_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  ( $s'_{ij}$  – булева переменная,  $s'_{ij} = 1$ ,

если между элементами  $i$  и  $j$  существует непосредственная связь;  $s'_{ij} = 0$  – в противном случае);

– затраты на создание или модернизацию узлов  $[c_i]$ ,  $i = \overline{1, n}$  и связей  $[c_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ .

Необходимо определить наилучший по множеству функционально-стоимостных показателей вариант топологической структуры СКММ  $s^o \in S$  (где  $S$  – допустимое множество вариантов) с учетом заданных ограничений на затраты, время получения информации, показатели надежности и живучести системы.

Каждый вариант реинжиниринга топологической структуры СКММ задается, количеством узлов  $u$ , местами их размещения и схемой связей между элементами, узлами и центром  $[s_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ .

Считается, что заданной множество объектов мониторинга покрыто системой мониторинга с заданной кратностью; узлы системы размещаются исключительно на базе элементов, при этом элементы подключаются к узлу по минимуму стоимости; объем запросов к каждому элементу системы  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  равен  $\alpha = [\alpha_i]$ ,  $\alpha_i = const$ ,  $i = \overline{1, n}$ ; объем ответа от каждого из элементов  $\beta = [\beta_i]$ ,  $\beta_i = const$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Базовая постановка задачи реинжиниринга топологических структур СКММ базируется на постановке задачи реинжиниринга территориально распределенных объектов, предложенной в работе [56]. При этом с учетом симметричности предлагается преобразовать матрицу связей  $[s'_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  к нижнему диагональному виду и хранить в ней информацию о местах размещения узлов ( $s'_{ii} = 1$ , если на базе элемента  $i$  размещается узел системы,  $s'_{ii} = 0$  – в противном случае  $i = \overline{1, n}$ ).

Предложенное преобразование матрицы связей  $[s'_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  позволяет несколько упростить модель задачи за счет уменьшения количества

переменных и вдвое сократить компьютерной памяти для хранения информации о топологической структуре системы.

С учетом этих изменений, исходное множество допустимых решений задачи реинжиниринга топологических структур СКММ определяется следующими условиями:

$$S = \{s\} = \begin{cases} [s_{ij}], s_{ij} \in \{0, 1\}, i, j = \overline{1, n}, s_{11} = 1; \\ \sum_{i=j}^n s_{ij} \geq 1, \forall j = \overline{1, n}; \\ \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n s_{ij} = n + \sum_{i=1}^n s_{ii}; \\ s_{ii} = 1 \rightarrow s_{i1} = 1 \quad \forall i = \overline{1, n}; \\ s_{ii} = 1 \wedge s_{ij} = 1 \rightarrow ij = \arg \min_{i \leq j \leq n} c_{ji} \quad \forall i, j = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2.22)$$

где  $S$  – множество допустимых вариантов топологических структур системы мониторинга;

$s$  – вариант топологической структуры системы;

$[s_{ij}], i, j = \overline{1, n}$  – матрица связей ( $s_{ij}$  – булева переменная,  $s_{ij} = 1$ , если между элементами  $i$  и  $j$  существует непосредственная связь;  $s_{ij} = 0$  – в противном случае;  $s_{ii} = 1, i = \overline{1, n}$ , если на базе элемента  $i$  размещается узел системы,  $s_{ii} = 0, i = \overline{1, n}$  – в противном случае);

$n$  – количество элементов системы;

$c_{ij}, i', j = \overline{1, n}$  – стоимость связи между элементами  $i'$  и  $j$ .

Оптимизацию решения предлагается проводить по критериям затрат, оперативности, надежности и живучести.

Для решения поставленной задачи в среде системы автоматизированного проектирования необходима разработка комплекса математических моделей, эффективных методов и соответствующих инструментальных средств.

## 2.4 Многокритериальная оценка эффективности вариантов реинжиниринга

Задачи оценки эффективности вариантов построения систем мониторинга составляют основу процедур анализа в САПР. Их суть состоит в определении стоимостных и функциональных характеристик вариантов, а также их соотношений в комплексных показателях эффективности при заданных значениях структурных, топологических и технологических параметров.

В качестве основных анализируемых характеристик предлагается рассматривать показатели затрат, оперативности, надежности и живучести. При этом для оценки функциональных характеристик систем мониторинга будем использовать аналитические модели и методы теории массового обслуживания и теории надежности. Это обусловлено тем, что в процессе реинжиниринга систем мониторинга основное внимание уделяется исследованию установившихся режимов их функционирования.

Для решения многокритериальных задач реинжиниринга предлагается объединить достоинства ординалистического и кардиналистического подходов к описанию предпочтений одного другому [7].

В рамках ординалистического подхода проектировщики (на основе формализованных или неформализованных предпочтений) будут определять на относительно небольшом множестве допустимых вариантов реинжиниринга  $S=\{s\}$  для выделенных пар порядок: «лучше-хуже». При таком подходе предпочтение представляет собой бинарное отношение  $R$  на множестве альтернатив  $S=\{s\}$ , отражающее факт, что альтернатива  $s^i$  лучше альтернативы  $s^j$  или не хуже ее:  $s^i R s^j$ .

При большом количестве альтернатив их многофакторную оценку предлагается производить в рамках кардиналистического подхода в автоматическом режиме. При этом для каждой из альтернатив  $s \in S$  будет вычисляться скалярная количественная оценка  $0 \leq P(s) \leq 1$ , интерпретируемая как ее полезность (где  $P(s)$  – значение функции полезности альтернативы  $s \in S$ ).

Каждая функция полезности  $P(s)$  определяет соответствующий порядок (предпочтение)  $R$  на множестве альтернатив  $S$ . Этот подход связан с необходимостью задания скалярной целевой функции  $P(s)$ , оптимизация по которой будет приводить к выбору наиболее эффективного варианта реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга.

По сути, постановка и решение многокритериальных задач реинжиниринга связаны с заменой (аппроксимацией) представления проектировщиков об эффективности вариантов некоторым другим понятием эффективности, которое удастся формализовать в виде векторного критерия и довести решение задачи до конструктивной оптимизационной процедуры [7].

Возможность автоматической генерации и анализа огромного количества альтернативных вариантов топологических структур СКММ расширяют область применения в САПР кардиналистического подхода. Схему решения проблемы многокритериального реинжиниринга в рамках кардиналистического подхода будем представлять в виде [101]:

$$Q \rightarrow A \rightarrow \text{opt } P \rightarrow s^o, \quad (2.23)$$

где  $Q$  – ситуация принятия решения;

$A$  – аксиоматика принятия решения, представляющая собой набор аксиом, которые определяют схему компромисса, т. е. принцип упорядочения возможных решений;

$\text{opt } P$  – схема компромисса (обобщенный критерий оценки эффективности);

$s^o$  – эффективное решение.

Плодотворным для решения этой проблемы оказывается применение аналитико-эвристического подхода, заключающегося в выборе аксиоматики  $A$  лицом, принимающим решение (ЛПР), на основе эвристических соображений.

В моделях многокритериального выбора в основном используются функций общей полезности, построенные на основе аддитивной или

мультипликативной схем компромисса [101]:

$$P(s) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \xi_i(s), \quad (2.24)$$

$$P(s) = \prod_{i=1}^m [\xi_i(s)]^{\lambda_i}, \quad (2.25)$$

где  $P(s)$  – полезность альтернативы  $s$ ;

$m$  – количество частных критериев;

$\lambda_i$  – коэффициент, характеризующий степень важности критерия  $k_i(s)$ ,

$$\sum_i \lambda_i = 1, \quad \lambda_i \geq 0; \quad i = \overline{1, m};$$

$\xi_i(s) = \xi_i[k_i(s)]$  – функция полезности (ФПЧК) частного критерия  $k_i(s)$ .

Как наиболее распространенной в практике принятия решений для скалярного многофакторного оценивания вариантов реинжиниринга воспользуемся схемой (2.24). Если определен вектор предпочтений  $\lambda = [\lambda_i]$ ,  $i = \overline{1, m}$  и известен вид всех функций полезности  $\xi_i(s)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , то задача выбора для аддитивной схемы (2.24) может быть сведена к задаче оптимизации вида

$$s^o = \arg \max_{s \in S} P(s). \quad (2.26)$$

В общем случае и вектор весовых коэффициентов  $\lambda = [\lambda_i]$ ,  $i = \overline{1, m}$  и ФПЧК  $\xi_i(s)$ ,  $i = \overline{1, m}$  требуют своего определения.

Традиционно определение вектора весовых коэффициентов  $\lambda$  осуществляется экспертным путем методами ранжирования, приписывания баллов, последовательных предпочтений или парных сравнений. В последнее время для выбора значений векторов весовых коэффициентов (предпочтения) в задачах многофакторного оценивания наряду с экспертным оцениванием все чаще используется метод компараторной идентификации [101]. Решать задачу

определения весовых коэффициентов предлагается методом, объединяющим достоинства вышеназванных методов.

Для сокращения области поиска в задаче многокритериального выбора варианта реинжиниринга предлагается предварительно определять подмножество эффективных (неулучшаемых, Парето-оптимальных) решений.

С учетом этого множество допустимых решений  $S=\{s\}$  будем представлять состоящим из двух подмножеств

$$S = S^S \cup S^K, \quad (2.27)$$

где  $S^S$  – подмножество согласия, любое решение из которого может быть улучшено хотя бы по одному критерию без ухудшения качества по другим;

$S^K$  – подмножество компромиссов, ни одно из решений которого не может быть улучшено одновременно по всем показателям.

Так как любое решение, принадлежащее подмножеству согласия  $s \in S^S$ , может быть улучшено, по крайней мере, по одному частному критерию без снижения качества по всем остальным, то подмножество согласия не содержит оптимального решения  $s^o \notin S^S$  и поэтому может быть исключено из рассмотрения при его определении. Таким образом, условие  $s^o \in S^K$  является необходимым условием оптимальности решения многокритериальной задачи реинжиниринга [101].

Точное определение подмножества компромиссов связано с серьезными вычислительными трудностями, которые возрастают с ростом размерности задачи (количества элементов системы мониторинга). С целью снижения временной сложности методов решения задачи реинжиниринга топологических структур СКММ предлагается формировать подмножество эффективных решений  $S^K$  параллельно с формированием множества допустимых решений  $S=\{s\}$ .

Для выбора единственного решения из подмножества компромиссов

$s^o \in S^K$  в рамках кардиналистического подхода требуется оценить полезность (ценность) каждой из альтернатив  $s \in S$ . Для этой цели воспользуемся функциями полезности частных критериев  $\xi_i(s) = \xi_i[k_i(s)]$ ,  $i = \overline{1, m}$  (где  $m$  – количество частных критериев), реализующих отображения  $\xi_i : k_i(s) \rightarrow E^1$ .

ФПЧК должна быть универсальной и хорошо приспособленной к учету особенностей системы мониторинга, их целей и критериев. Для этого она должна удовлетворять ряду требований [101]: быть монотонной и безразмерной; иметь единый интервал изменения (например, от 0 до 1); быть инвариантной к виду экстремума частного критерия (*min* или *max*); позволять реализовать как линейные, так и нелинейные зависимости от значений параметров системы. Перечисленным требованиям отвечает, в частности, ФПЧК вида [101]:

$$\xi_i(s) = \left( \frac{k_i(s) - k_i^-}{k_i^+ - k_i^-} \right)^{\mu_i}, \quad (2.28)$$

где  $k_i(s)$  – значение  $i$ -го частного критерия для варианта реинжиниринга системы  $s \in S$ ;

$k_i^+$ ,  $k_i^-$  – соответственно текущее, наихудшее и наилучшее значения  $i$ -го частного критерия,  $i = \overline{1, m}$ ;

$\mu_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  – параметр, определяющий вид зависимости (2.28). При  $\mu_i = 1$  реализуется линейная, при  $0 < \mu_i < 1$  – выпуклая, а при  $\mu_i > 1$  – вогнутая зависимости от значения частного критерия  $k_i(s)$ .

## Выводы по разделу 2

Анализ этапов жизненного цикла современных систем крупномасштабного мониторинга показал, что их реинжиниринг занимает

промежуточное место между разработкой новых систем и сопровождением существующих.

Построение и анализ схемы взаимосвязей понятий «элемент», «топология» «отношение» и «свойство» для систем мониторинга позволил получить их формализованное описание как территориально распределенных объектов, включая подмножества элементов, отношений, топологий и свойств, которые будут использоваться впервые, повторно в новой топологической структуре или исключены из дальнейшего рассмотрения. На их основе формируется множество допустимых решений задачи реинжиниринга.

В результате декомпозиции проблемы реинжиниринга топологических структур систем мониторинга определены состав и схема взаимосвязи задач по входным и выходным данным, что позволило разработать ее системологическую модель. Полученная модель позволяет корректно формировать исходные данные для проблемно связанных задач в логических схемах процессов оптимизации систем мониторинга.

Для итерационной схемы технологии структурно-топологического реинжиниринга систем мониторинга на микроуровне сформулирована базовая постановка многокритериальной задачи реинжиниринга их топологических структур и в рамках кардиналистического подхода определена методология оценки эффективности вариантов реинжиниринга.

Практическое применение системологической модели и итерационной технологии структурно-топологического реинжиниринга систем мониторинга позволит повысить качество получаемых проектных решений.

Основные результаты этого раздела опубликованы в [1, 3, 10 – 12].

РАЗДЕЛ 3  
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧ СТРУКТУРНО-  
ТОПОЛОГИЧЕСКОГО РЕИНЖИНИРИНГА СИСТЕМ  
КРУПНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА

3.1 Математическая модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию затрат

Математическая модель задачи реинжиниринга топологической структуры по показателю минимума дополнительных затрат разрабатывается для трехуровневой централизованной системы мониторинга, в состав которой входят подсистемы сбора данных об объектах наблюдения (пункты мониторинга, элементы), предварительной обработки (узлы), обработки и распространения информации (центр).

Запросы на получение информации об объектах наблюдения поступают из центра и проходят через узлы системы к ее элементам, а информация от них поступает через узлы к центру. При этом все множество объектов мониторинга  $I = \{i\}, i = \overline{1, n}$  с заданной кратностью находится под наблюдением элементов системы мониторинга.

Затраты  $C(s')$  на существующий вариант топологической структуры системы  $s' \in S$ , (где  $S$  – множество допустимых вариантов топологических структур) состоят из затрат на центр  $C_c(s')$ , узлы  $C_U(s')$ , элементы  $C_E(s')$ , связи между узлами и центром  $C_{UC}(s')$ , элементами и узлами  $C_{EU}(s')$  [56]:

$$C(s') = C_c(s') + C_U(s') + C_{UC}(s') + C_E(s') + C_{EU}(s'). \quad (3.1)$$

Затраты  $C(s'')$  на оптимальный вариант топологической структуры системы для новых условий функционирования  $s'' \in S$  без учета существующей топологической структуры  $s' \in S$  по аналогии с (3.1) можно представить в виде суммы:

$$C(s'') = C_C(s'') + C_U(s'') + C_{UC}(s'') + C_E(s'') + C_{EU}(s''). \quad (3.2)$$

В этих обозначениях оценка дополнительных затрат (на реинжиниринг)  $\Delta C(s', s'')$  может быть представлена в виде разности (3.1) и (3.2):

$$\Delta C(s', s'') = C(s') - C(s''). \quad (3.3)$$

При этом, очевидно, что полученное соотношение (3.3) не позволяет учитывать возможности использования части (узлов и каналов связи) топологической структуры существующей системы  $s' \in S$ , а также затрат на возможный демонтаж и прибыли от возможной реализации части оборудования существующей системы.

Для учета перечисленных факторов предлагается новый вид критерия дополнительных затрат:

$$k_1(s', s) = \Delta C(s', s) = \sum_{i=1}^n [c_i(1 - s'_{ii}) s_{ii} + d_i s'_{ii} s_{ii} + e_i(1 - s_{ii}) s'_{ii} - g_i(1 - s_{ii}) s'_{ii}] + \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n [c_{ij}(1 - s'_{ij}) s_{ij} + d_{ij} s'_{ij} s_{ij} + e_{ij}(1 - s_{ij}) s'_{ij} - g_{ij}(1 - s_{ij}) s'_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S} \quad (3.4)$$

где  $c_i$  – затраты на  $i$ -й элемент, узел или центр в новой структуре,  $i = \overline{1, n}$ ;

$s'_{ij}$ ,  $s_{ij}$  – соответственно элементы матриц смежности (связей) между элементами, узлами и центром в существующей структуре  $[s'_{ij}]$  и структуре после реинжиниринга  $[s_{ij}]$  ( $s'_{ij} = 1$  или  $s_{ij} = 1$ , если между элементами  $i$  и  $j$  существует непосредственная связь;  $s'_{ij} = 0$  или  $s_{ij} = 0$  – в противном случае);

$d_i$  – затраты на модернизацию  $i$ -го элемента, узла или центра в новой структуре,  $i = \overline{1, n}$ ;

$e_i$  – затраты на демонтаж  $i$ -го узла существующей структуры,  $i = \overline{1, n}$ ;

$g_i$  – стоимость ресурсов, которые могут быть повторно использованы (или реализованы) после демонтажа оборудования  $i$ -го узла,  $i = \overline{1, n}$ ;

$c_{ij}$  – стоимость связи между элементами  $i$  и  $j$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ;

$S$  – множество допустимых вариантов топологических структур системы мониторинга (2.22).

При этом в общем случае равенство (3.3) и (3.4) не выполняется, т.е.

$$C(s') - C(s'') \neq k_1(s', s). \quad (3.5)$$

Основные ограничения, учитываемые при оптимизации трехуровневых централизованных топологических структур территориально распределенных систем, применимы и для систем мониторинга [54]:

– каждый элемент системы  $i$ ,  $i = \overline{1, n}$  должен быть связан с одним из узлов, т.е.  $\sum_{j=1}^i s_{ij} + \sum_{i=j}^n s_{ij} = 1$  для всех  $i$ , для которых  $s_{ii} = 0$ ,  $i = \overline{1, n}$  или непосредственно с центром  $s_{ii} = 1$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;

– к каждому узлу должно быть подключено более одного элемента  $\sum_{j=1}^i s_{ij} + \sum_{i=j}^n s_{ij} > 1$ , для всех  $i$ , для которых  $s_{ii} = 1$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;

– каждый элемент  $i$  присоединяется к узлу  $j$  по минимуму стоимости:  $s_{ii} = 1 \wedge s_{ij} = 1 \rightarrow ij = \arg \min_{i \leq j \leq n} c_{ji} \quad \forall i, j = \overline{1, n}$ ;

– каждый из узлов системы  $j$  связывается с центром  $s_{jj} = 1 \rightarrow s_{ij} = 1$ ;

– количество узлов может изменяться в интервале от 1 до  $n$ , т.е.

$$1 \leq \sum_{i=1}^n s_{ii} \leq n;$$

– количество симметричных связей в структуре трехуровневой централизованной СКММ равно  $\sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n s_{ij} = n + \sum_{i=1}^n s_{ii}$ .

В отличие от критерия минимизации дополнительных затрат, предложенного в [54], критерий (3.4) учитывает необходимые затраты на демонтаж узлов и оборудования для организации связей, а также возможность повторного использования части имеющегося оборудования.

Критерий (3.4) так же справедлив для указанных в [54] крайних случаев реинжиниринга, когда необходимы максимальные затраты  $\Delta C_{max} = \max \Delta C$  при полной замене узлов и связей существующего варианта топологической структуры СКММ, и минимальные затраты  $\Delta C_{min} = \min \Delta C$ , когда не требуется производить изменений существующей топологической структуры.

С учетом предложенной формализации (3.4) математическую модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию минимума затрат представим в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1(s', s) = \sum_{i=1}^n [c_i(1 - s'_{ii}) s_{ii} + d_i s'_{ii} s_{ii} + e_i(1 - s_{ii}) s'_{ii} - g_i(1 - s_{ii}) s'_{ii}] + \\ + \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n [c_{ij}(1 - s'_{ij}) s_{ij} + d_{ij} s'_{ij} s_{ij} + e_{ij}(1 - s_{ij}) s'_{ij} - g_{ij}(1 - s_{ij}) s'_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S}; \\ k_2(s) \leq k_2^*; \\ k_3(s) \geq k_3^*; \\ k_4(s) \geq k_4^*, \end{array} \right. \quad (3.6)$$

где  $k_1(s', s)$  – целевая функция для оценки показателя затрат на реинжиниринг топологической структуры системы мониторинга;

$S = \{s\}$  – множество допустимых топологических структур системы мониторинга;

$k_2^*$ ,  $k_3^*$  и  $k_4^*$  – граничные значения показателей оперативности  $k_2(s)$ , надежности  $k_3(s)$  и живучести  $k_4(s)$ .

Снимая одно, два или все три ограничения в модели (3.6), получим математические модели частных задач реинжиниринга топологических

структур систем мониторинга по критерию затрат с меньшим количеством ограничений или без ограничений.

Для выбора наиболее эффективного метода решения задачи реинжиниринга топологических структур по критерию затрат (3.6) необходимо предварительно провести анализ зависимости функции  $k_j(s', s)$  (3.4) от количества узлов.

Функция  $k_j(s', s)$  в критерии затрат (3.4) учитывает существующую топологическую структуру системы  $s' \in S$  и топологическую структуру после ее реинжиниринга  $s \in S$  (где  $S$  – множество допустимых вариантов топологических структур системы). С учетом этого, в отличие от функций затрат, используемых при решении задач традиционного проектирования топологических структур [56, 64, 71], функция в (3.4), в зависимости от количества узлов в системе, может иметь многоэкстремальный характер. Вид (унимодальность или многоэкстремальность) функции затрат определяет класс методов, которые могут быть применены для поиска ее минимума при изменении количества узлов в системе в диапазоне  $1 \leq u \leq n$ .

Проанализируем изменение огибающей локальных экстремумов функции  $k_j(s', s)$  (3.4) на интервале  $1 \leq u \leq n$ .

В процессе реинжиниринга топологических структур СКММ все множество допустимых вариантов предполагает затраты, размер которых ограничивается двумя крайними значениями: минимальными и максимальным дополнительными затратами.

В случае, когда существующий вариант топологической структуры  $s' \in S$  является наилучшим из возможных  $S = \{s\}$  (где  $S$  – множество допустимых вариантов), это потребовало минимума затрат ресурсов на его реализацию. В этом случае в процессе реинжиниринга предполагается полное использование существующей топологической структуры СКММ, т.е.  $s_{ij} = s'_{ij}, \forall i, j = \overline{1, n}$  (где  $s'_{ij}, s_{ij}$  – соответственно элементы матриц смежности в существующей структуре и структуре после реинжиниринга) и не требуются дополнительные

затраты, т.е. в (3.4)  $\Delta C(s',s)=0$ . При этом, зависимость затрат  $\Delta C(s',s)$  (3.4) от количества узлов  $u$  на интервале  $1 \leq u \leq n$  в системе, построенной на «старой» элементной базе и технологиях, будет унимодальной.

Второй крайний случай требует максимальных дополнительных затрат  $\Delta C_{max}(s',s)$  и предполагает полную замену существующих компонентов топологической структуры  $s' \in S$ , т.е.  $s_{ij} \neq s'_{ij}, \forall i, j = \overline{1, n}$ . При этом затраты на модернизацию, демонтаж и стоимость ресурсов элементов, узлов и центра, которые могут быть повторно использованы в соотношении (3.4) равны нулю, т.е.  $d_i = 0, e_i = 0, g_i = 0, \forall i = \overline{1, n}$ .

В процессе реинжиниринга на вид зависимости огибающей локальных экстремумов показателя затрат  $k_l(s',s)$  будут оказывать влияние взаимные изменения составляющих в выражении (3.4) при увеличении количества узлов в системе для вариантов  $s \in S$ .

Суммарные затраты на оборудование центра, узлов и элементов системы  $C(u)$  от количества узлов  $u$  представим в виде суммы:

$$C(u) = C_C(u) + C_U(u) + C_E(u), \quad (3.7)$$

где  $C_C(u)$  – затраты на центр;

$C_U(u)$  – затраты на узлы;

$C_E(u)$  – затраты на элементы.

Функция  $C(u)$  при этом будет монотонно возрастать, скорость ее роста зависит от соотношения значений  $c_i$  и  $e_i, i = \overline{1, n}$ .

Суммарные затраты на связи узел-центр  $C_{uc}(u)$  будут монотонно возрастать, суммарные затраты а на связь элемент-узел  $C_{eu}(u)$  – монотонно уменьшаться. Следовательно, суммирующая функция затрат на связи от количества узлов  $u$  будет унимодальной.

Зависимость значения критерия  $k_l(s',s)$  при максимуме дополнительных

затрат  $\Delta C_{max}(s', s)$  от количества узлов  $u$  будет одноэкстремальной [56].

Таким образом в процессе решения задачи реинжиниринга значение показателя затрат  $k_I(s', s)$  при изменении количества узлов в системе  $1 \leq u \leq n$  находится в диапазоне  $\Delta C_{min} \leq k_I(s', s) \leq \Delta C_{max}(s', s)$ .

Затраты на модернизацию, демонтаж и стоимость повторно использованных ресурсов не превышают затрат на создание новых элементов, узлов, центра и связей между ними, т.е.:

$$\begin{aligned} e_i < c_i, \quad d_i < c_i, \quad g_i < c_i, \quad i = \overline{1, n}; \\ e_{ij} < c_{ij}, \quad d_{ij} < c_{ij}, \quad g_{ij} < c_{ij}, \quad i, j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

В процессе решения задачи реинжиниринга с увеличением количества узлов в системе  $1 \leq u \leq n$  возможны ситуации, когда будут использоваться различные части существующей топологической структуры. Это может приводить к появлению локальных экстремумов функции  $k_I(s', s) = \Delta C(s', s)$  на интервале  $1 \leq u \leq n$ .

Таким образом, для решения задачи реинжиниринга топологических структур СКММ необходимо применение методов, позволяющих получить оптимальное решения с учетом многоэкстремальности функции (3.4) (рис. 3.1).

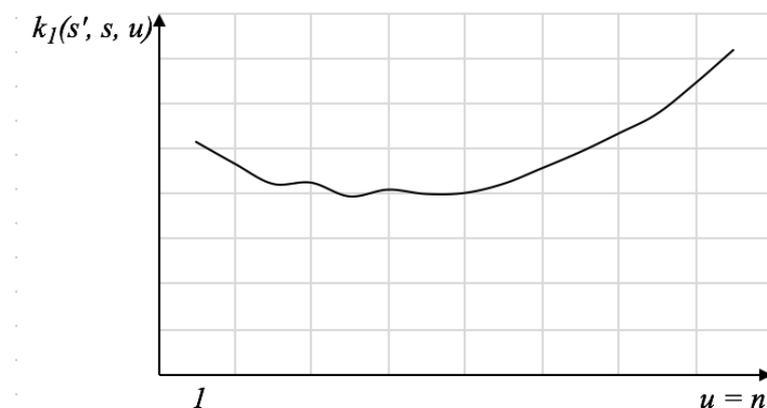


Рисунок 3.1 – Пример зависимости значения частного критерия  $k_I(s', s)$  от количества узлов в системе  $1 \leq u \leq n$

В практике оптимизации топологических структур СКММ зачастую недостаточно учитывать только ограничения на показатели оперативности, надежности и живучести, а стремятся к экстремизации перечисленных показателей. С этой целью необходима разработка математических моделей задач реинжиниринга топологических структур систем мониторинга по показателям оперативности, надежности и живучести.

### 3.2 Математическая модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию оперативности

Системы мониторинга служат средством получения информации о состоянии наблюдаемых объектов в системах планирования и управления. Своевременность получения информации о состоянии наблюдаемых объектов во многом определяет своевременную выдачу управляющих воздействий и, таким образом, существенно влияет на эффективность управления. Это обуславливает необходимость учета показателей оперативности при решении задач проектирования и реинжиниринга систем мониторинга.

Задачу реинжиниринга топологической структуры трехуровневой СКММ по показателю оперативности, построенную на однотипных элементах, узлах и каналах связи будем рассматривать в следующей постановке [2]. Задано:

- множество элементов системы мониторинга  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , покрывающих все множество объектов мониторинга;
- существующий вариант топологической структуры системы  $s' \in S$  (где  $S$  множество допустимых вариантов топологических структур), задаваемый местами расположения элементов  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , узлов, центра (центр системы расположен на базе элемента  $i = I$ ), а также связями между элементами, узлами и центром  $[s'_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  ( $s'_{ij}$  – булева переменная,  $s'_{ij} = 1$ , если между элементами  $i$  и  $j$  существует непосредственная связь;  $s'_{ij} = 0$  – в противном случае);

– объемы запросов из центра к каждому элементу системы  $\alpha = [\alpha_i]$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;

– объемы ответов от каждого из элементов  $\beta = [\beta_i]$ ,  $i = \overline{1, n}$  к центру;

–  $\gamma_i$  – пропускные способности каналов связи центр-узел,  $i = \overline{1, n}$ ;

–  $\gamma_{ij}$  – пропускные способности каналов связи узел-элемент,  $i, j = \overline{1, n}$ ;

–  $h_1, h_2$  – скорости обработки запросов и ответов в узлах системы.

Необходимо определить наилучший  $s^o \in S$  (где  $S$  – допустимое множество вариантов) по показателю оперативности  $k_2(s)$  вариант топологической структуры СКММ с учетом заданных ограничений на затраты, показатели надежности и живучести.

С учетом того, что в процессе реинжиниринга СКММ требуется анализ огромного количества альтернативных вариантов, для решаемой задачи предлагается использовать детерминированную модель оценки показателя оперативности. Создаваемая модель должна будет учитывать зависимость времени получения информации о наблюдаемых объектах (доставки запроса и получения ответа) от топологической реализации системы для однозначно заданной (детерминированной) технологии функционирования.

Ввиду использования детерминированной технологии функционирования, реализуемой на однотипных элементах, узлах и каналах связи, в каналах и узлах будут существовать детерминированные потоки данных, направленные от центра и к центру системы.

Время получения информации от каждого из элементов системы  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  представим в виде суммы времен пребывания запросов и ответов на каждом из этапов цепочки «центр–узел–элемент–узел–центр»:

$$k_{2i}(s) = \tau_i(s) = \tau_i^C + \tau_i^{CU}(s) + \tau_i^{UI}(s) + \tau_i^{UE} + \tau_i^E + \tau_i^{EU} + \tau_i^{U2}(s) + \tau_i^{UC}(s), \quad i = \overline{1, n}, \quad (3.9)$$

где  $\tau_i^C = \tau^C = const$  – время выдачи запроса для  $i$ -го элемента центром;

$\tau_i^{CU}(s)$  – время передачи запроса для  $i$ -го элемента по каналу центр-узел;

$\tau_i^{U1}(s)$  – время обработки запроса для  $i$ -го элемента в узле;

$\tau_i^{UE}$  – время передачи запроса для  $i$ -го элемента по каналу узел-элемент;

$\tau_i^E = \tau^E = const$  – время получения информации  $i$ -м элементом системы;

$\tau_i^{EU}$  – время передачи ответа от  $i$ -го элемента по каналу элемент-узел;

$\tau_i^{U2}(s)$  – время обработки ответа от  $i$ -го элемента в узле;

$\tau_i^{UC}(s)$  – время передачи ответа от  $i$ -го элемента по каналу узел-центр.

Топологическая реализация системы мониторинга влияет на время передачи запросов и ответов по каналам центр-узел  $\tau_i^{CU}(s)$ , обработки запросов и ответов в узлах  $\tau_i^{U1}(s)$ ,  $\tau_i^{U2}(s)$ ,  $i = \overline{1, n}$ . При этом время выдачи запроса центром  $\tau_i^C$ , получения информации элементом системы  $\tau_i^E$  и передачи ответа по каналу элемент-узел  $\tau_i^{EU}$  не зависят от топологической реализации системы мониторинга  $s \in S$ .

С учетом введенных обозначений для детерминированных потоков запросов и ответов одинаковых объемов  $\alpha_i = \bar{\alpha} = const$ ,  $\beta_i = \bar{\beta} = const$ ,  $i = \overline{1, n}$ , а также скоростей обработки  $h_1$ ,  $h_2$  и передачи  $\gamma_i = \gamma_1 = const$ ,  $\gamma_{ij} = \gamma_2 = const$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  получены следующие выражения:

$$\tau_i^{CU}(s) = \frac{\bar{\alpha}}{\gamma_1} \sum_{j=1}^n \sum_{l=j}^n s_{jl} s_{jj}; \quad \tau_i^{UC}(s) = \frac{\bar{\beta}}{\gamma_2} \sum_{j=1}^n \sum_{l=j}^n s_{jl} s_{jj} \quad (3.10)$$

$$\tau_i^{U1}(s) = \frac{\bar{\alpha}}{h_1} \sum_{j=1}^n \sum_{l=j}^n s_{jl} s_{jj}; \quad (3.11)$$

$$\tau_i^{UE} = \frac{\bar{\alpha}}{\gamma_2} = const, \quad \tau_i^E = const; \quad (3.12)$$

$$\tau_i^{EU}(s) = \frac{\bar{\beta}}{\gamma_1} = const; \quad (3.13)$$

$$\tau_i^{U2}(s) = \frac{\bar{\beta}}{h_2} \sum_{j=1}^n \sum_{l=j}^n s_{jl} s_{jj}, \quad (3.14)$$

где  $\alpha_i = \bar{\alpha} = const$ ,  $i = \overline{1, n}$  – объем запроса, поступающего из центра к  $i$ -му элементу системы;

$\gamma_i = \gamma_1$ ,  $i = \overline{1, n}$  – пропускная способность канала связи между центром и узлом на базе  $i$ -го элемента системы;

$s_{jl}, s_{jj}$ ,  $j, l = \overline{1, n}$  – элементы матрицы связей ( $s_{jl} = 1$ , если между элементами  $j$  и  $l$  существует непосредственная связь;  $s_{jl} = 0$  – в противном случае);

$h_1$  – скорость обработки запроса в узлах системы;

$\gamma_{jl} = \gamma_2$ ,  $j, l = \overline{1, n}$  – пропускная способность канала связи элементами  $j$  и  $l$ ;

$\beta_j = \bar{\beta} = const$ ,  $j = \overline{1, n}$  – объем ответа, поступающего от элемента  $j$ ;

$h_2$  – скорость обработки ответа на запрос в узлах системы.

Исходя из требования минимизации максимального времени получения данных мониторинга от элементов системы, критерий максимума оперативности может быть представлен в следующем виде:

$$k_2(s) = \max_{1 \leq i \leq n} k_{2i}(s) \rightarrow \min_{s \in S} \quad (3.15)$$

или после преобразования с учетом (3.9) – (3.14):

$$k_2(s) = \left\{ \tau^C + \frac{\bar{\alpha}}{\gamma_1} + \tau^E + \frac{\bar{\beta}}{\gamma_2} + \left( \frac{\bar{\alpha}}{\gamma_1} + \frac{\bar{\alpha}}{h_1} + \frac{\bar{\beta}}{h_2} + \frac{\bar{\beta}}{\gamma_2} \right) \sum_{j=1}^n \sum_{l=j}^n s_{jl} s_{jj} \right\} \rightarrow \min_{s \in S}, \quad (3.16)$$

где  $k_{2i}(s)$  – время получения информации от  $i$ -го элемента системы после  $s$ -го варианта реинжиниринга;

$S$  – множество допустимых вариантов реинжиниринга топологических структур;

$\tau^C$  – время выдачи запроса для элемента центром;

$\tau^E$  – время получения информации о состоянии наблюдаемого объекта элементом системы.

С учетом предложенной формализации времени получения информации (3.16) математическую модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию оперативности представим в виде:

$$\begin{cases} k_2(s) = \left[ \tau^C + \frac{\bar{\alpha}}{\gamma_2} + \tau^E + \frac{\bar{\beta}}{\gamma_1} + \left( \frac{\bar{\alpha}}{\gamma_1} + \frac{\bar{\alpha}}{h_1} + \frac{\bar{\beta}}{h_2} + \frac{\bar{\beta}}{\gamma_2} \right) \sum_{j=1}^n \sum_{l=j}^n s_{jl} s_{jj} \right] \rightarrow \min_{s \in S}; \\ k_1(s', s) \leq k_1^*; \\ k_3(s) \geq k_3^*; \\ k_4(s) \geq k_4^*, \end{cases} \quad (3.17)$$

где  $k_2(s)$  – целевая функция для оценки оперативности системы мониторинга;

$k_{2i}(s)$  – время получения информации от  $i$ -го элемента системы после  $s$ -го варианта реинжиниринга;

$S = \{s\}$  – множество допустимых топологических структур системы мониторинга;

$k_1(s', s)$  – функция показателя затрат на реинжиниринг топологической структуры системы мониторинга  $s' \in S$ ;

$k_1^*$ ,  $k_3^*$  и  $k_4^*$  – граничные значения показателей затрат  $k_1(s', s)$ , надежности  $k_3(s)$  и живучести  $k_4(s)$ .

Если убрать одно, два или все три ограничения в модели (3.17), получим математические модели частных задач реинжиниринга топологических структур систем мониторинга по критерию оперативности с меньшим

количеством ограничений или без ограничений.

Анализ зависимости значения критерия оперативности  $k_{2i}(s)$  (3.17) от количества узлов в системе  $u$  показал, что минимальное время получения информации будет в случае прямого подключения всех элементов к центру. С увеличением количества узлов значение критерия будет сначала возрастать, затем монотонно убывать, т.е. зависимость имеет унимодальный характер (рис. 3.2).

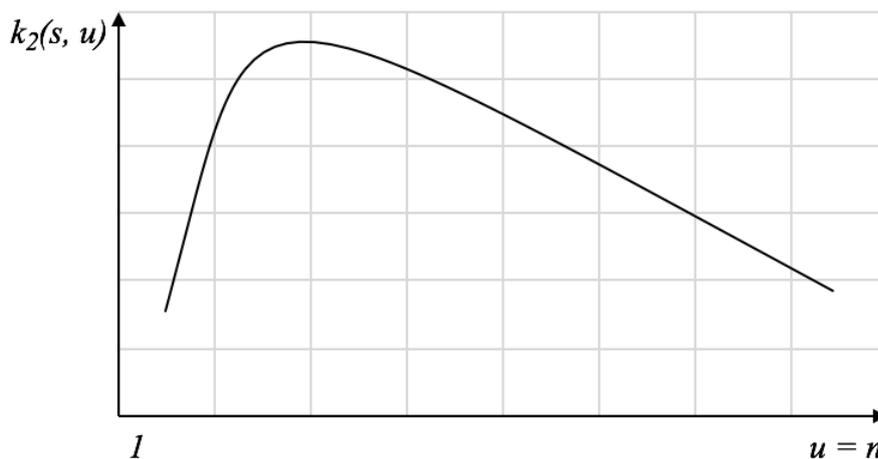


Рисунок 3.2 – Пример зависимости значения частного критерия  $k_2(s)$  от количества узлов в системе  $I \leq u \leq n$

При использовании в системе мониторинга технологии функционирования с ациклическим опросом элементов для оценки оперативности следует использовать вероятностные аналитические или имитационные модели [90].

### 3.3 Математическая модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию надежности

Надежность является одним из основных требований, предъявляемым, в частности, к системам мониторинга опасных объектов. В современной литературе рассматриваются различные методы повышения аппаратной и структурной надежности топологических структур систем мониторинга. К

числу основных относятся: применение надежного дорогостоящего оборудования, внесение структурной избыточности, оптимизация структурно-топологической организации (количества узлов и схемы связей), резервирования элементов, узлов и связей [91 – 93].

Для оценки надежности системы мониторинга  $k_3(s)$  предлагается использовать комплексный показатель – коэффициент готовности (КГ), оценка которого проводится при условии выполнения следующих допущений и ограничений [2, 94, 95]:

- время между возникновениями отказов является случайной величиной с экспоненциальным распределением;
- время восстановления работоспособности системы является случайной величиной с произвольным распределением;
- нарушения работоспособности системы являются взаимно независимыми событиями.

С целью упрощения модели учитывается только общая оценка надежности. Различные аспекты методологии расчета надежности территориально распределенных объектов с различной топологической организацией приводятся в работах [94 – 98].

Для общей оценки надежности системы мониторинга воспользуемся соотношением [94]:

$$k_3(s) = k_3^C(s) \times k_3^U(s) \times k_3^E(s) \times k_3^{CU}(s) \times k_3^{UE}(s), \quad (3.18)$$

где  $k_3(s)$  – КГ топологической структуры СКММ в целом;

$k_3^C(s)$  – КГ технических средств верхнего уровня (центра);

$k_3^U(s)$  – КГ технических средств среднего уровня (узлов);

$k_3^E(s)$  – КГ технических средств нижнего уровня (элементов);

$k_3^{CU}(s)$  – КГ каналов связи верхнего уровня (центр – узлы);

$k_3^{UE}(s)$  – КГ каналов связи нижнего уровня (узлы – элементы).

Анализ показателя надежности (3.18) показал, что вид топологической структуры системы мониторинга влияет на показатели надежности комплекса технических средств среднего уровня  $k_3^U(s)$ , а надежность центрального узла  $k^C$  и комплекса технических средств нижнего уровня  $k_3^E$  определяется исключительно их аппаратной надежностью.

Коэффициенты готовности технических средств среднего и нижнего уровней можно определить по формулам:

$$k_3^U(s) = k^U \cdot u, \quad u = \sum_{i=1}^n s_{ii}; \quad (3.19)$$

$$k_3^E = k^E \cdot n, \quad (3.20)$$

где  $k^U$  – коэффициент готовности узла;

$u$  – количество узлов в системе;

$n$  – количество элементов системы;

$s_{ii}$  – диагональные элементы матрицы связей системы,  $i = \overline{1, n}$ ;

$k^E$  – коэффициент готовности элемента.

Коэффициенты готовности технических каналов связи верхнего и нижнего уровней в принятых выше обозначениях могут быть представлены в виде [2]:

$$k_3^{CU}(s) = k^{CU} \cdot u; \quad (3.21)$$

$$k_3^{UE} = k^{UE} \cdot n, \quad (3.22)$$

где  $k^{CU}$  – коэффициент готовности канала связи верхнего уровня (центр-узел);

$k^{UE}$  – коэффициент готовности канала связи нижнего уровня (узел-элемент).

Подставив в выражение (3.18) соотношения для оценки надежности технических средств всех уровней (3.19) – (3.22) получим расчетное выражение для оценки надежности системы мониторинга в целом:

$$k_3(s) = k^C \times k^{U^u} \times k^{E^n} \times k^{CU^u} \times k^{UE^n} \rightarrow \max_{s \in S}, \quad (3.23)$$

где  $S$  – множество допустимых вариантов топологических структур системы.

С учетом предложенной формализации коэффициента готовности системы мониторинга в целом математическую модель задачи реинжиниринга ее топологической структуры по критерию надежности представим в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_3(s) = k^C \times (k^U)^u \times (k^E)^n \times (k^{CU})^u \times (k^{UE})^n \rightarrow \max_{s \in S}; \\ u = \sum_{i=1}^n s_{ii}; \\ k_1(s', s) \leq k_1^*; \\ k_2(s) \leq k_2^*; \\ k_4(s) \geq k_4^*, \end{array} \right. \quad (3.24)$$

где  $k_3(s)$  – целевая функция показателя надежности системы мониторинга;

$n$  – количество элементов системы мониторинга;

$S = \{s\}$  – множество допустимых топологических структур системы мониторинга;

$k_1(s', s)$  – функция показателя затрат на реинжиниринг топологической структуры системы мониторинга  $s' \in S$ ;

$k_1^*$ ,  $k_2^*$  и  $k_4^*$  – граничные значения показателей затрат  $k_1(s', s)$ , оперативности  $k_3(s)$  и живучести  $k_4(s)$ .

Снимая одно, два или три ограничения в модели (3.24), получим математические модели частных задач реинжиниринга топологических структур систем мониторинга по критерию надежности с меньшим количеством ограничений или без ограничений.

Проведенный анализ полученных соотношений для оценки коэффициента готовности системы в целом (3.18) – (3.22) показал, что ее надежность монотонно убывает с увеличением количества узлов в системе  $u$  (рис. 3.3).

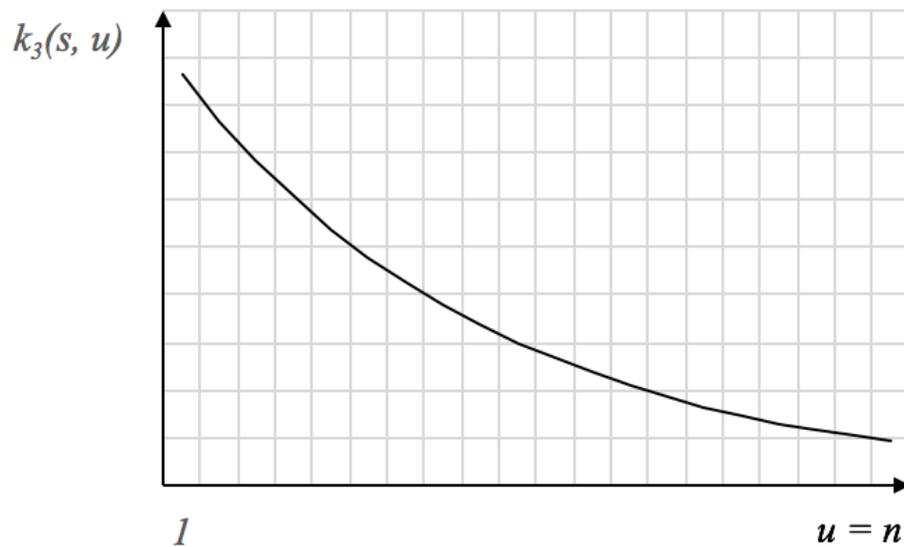


Рисунок 3.3 – Пример зависимости значения частного критерия  $k_3(s)$  от количества узлов в системе  $1 \leq u \leq n$

В ходе проектирования и реинжиниринга систем мониторинга опасных объектов получаемые значения показателя надежности могут не удовлетворять предъявляемым требованиям. В таких случаях надежность системы может быть повышена путем резервирования элементов, узлов и соответствующих каналов связи, что требует дополнительных материальных затрат.

### 3.4 Математическая модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию живучести

В результате негативного внешнего воздействия на систему мониторинга может произойти выход из строя ее элементов, узлов или каналов связи, что может уменьшить зону покрытия объектов контроля. Желательной целью является построение такой топологической структуры системы, которая обеспечивала бы максимальную зону покрытия объектов контроля при повреждении ее элементов.

С учетом этого под живучестью системы мониторинга будем понимать ее способность в максимальном объеме выполнять свои функции при воздействии факторов внешней среды, например, неблагоприятных условий эксплуатации.

Оценку живучести предлагается проводить по показателю значения доли элементов системы мониторинга, связанных с центром, при единичных повреждениях ее центра, элементов, узлов или связей. Будем предполагать выходы из строя компонентов структуры системы (центра, узлов, элементов или одной из связей) равновероятными.

При повреждении оборудования центра система мониторинга становится неработоспособной не зависимо от количества узлов в сети и схемы связей компонентов в ней. С учетом этого при оценке живучести системы мониторинга случаи повреждения центра можно не учитывать, так как это не будет влиять на выбор лучшего варианта топологической структуры.

В результате анализа трехуровневых централизованных систем мониторинга с радиально-узловыми структурами установлено, что их живучесть по принятому выше определению для системы, состоящей из  $n$  элементов, составляет:

– при повреждении центра:

$$k_4^C(s) \equiv 0; \quad (3.25)$$

– при повреждении одной связи центр-узел ( $1-j$ ):

$$k_{4j}^{CU}(s) = \frac{n - \sum_{j=2}^n \sum_{i=j}^n s_{ji} s_{ij}}{n}; \quad (3.26)$$

– при повреждении одного узла (на базе элемента  $j$ ):

$$k_{4j}^U(s) = \frac{n - \sum_{j=2}^n \sum_{i=j}^n s_{ji} s_{ii}}{n}; \quad (3.27)$$

– при повреждении одной связи узел-элемент или одного элемента:

$$k_4^{UE}(s) = k_4^E(s) \equiv \frac{n-1}{n}. \quad (3.28)$$

$$k_4^{UE}(s) = k_4^E(s) \equiv \frac{n-1}{n}. \quad (3.29)$$

Очевидно, что схема связей компонентов в СКММ с радиально-узловыми структурами не влияет на значения показателей их живучести  $k_4^C(s)$  (3.25),  $k_4^{UE}(s)$  (3.28) и  $k_4^E(s)$  (3.29). Вследствие этого, во многих случаях значения этих показателей не учитываются при решении задач оптимизации в процессах проектирования или реинжиниринга систем мониторинга.

В качестве критерия живучести СКММ предлагается использовать показатель, определяющий минимальное значение доли элементов, связанных с центром в функционирующей системе, при единичных повреждениях узлов или связей центр-узел:

$$k_4(s) = \left\{ \min_{1 \leq j \leq n} \left( \frac{n - \sum_{j=2}^n \sum_{i=j}^n s_{ji} s_{ii}}{n} \right) \right\} \rightarrow \max_{s \in S}. \quad (3.30)$$

С учетом предложенной формализации критерия (3.31) математическую модель задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга по критерию живучести представим в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_4(s) = \left\{ \min_{1 \leq j \leq n} \left( \frac{n - \sum_{j=2}^n \sum_{i=j}^n s_{ji} s_{ii}}{n} \right) \right\} \rightarrow \max_{s \in S}; \\ k_1(s', s) \leq k_1^*; \\ k_2(s) \leq k_2^*; \\ k_3(s) \geq k_3^*, \end{array} \right. \quad (3.31)$$

где  $k_4(s)$  – целевая функция для оценки живучести системы мониторинга;

$S = \{s\}$  – множество допустимых топологических структур системы мониторинга;

$k_1(s', s)$  – функция показателя затрат на реинжиниринг топологической структуры системы мониторинга  $s' \in S$ ;

$k_1^*$ ,  $k_2^*$  и  $k_3^*$  – граничные значения показателей затрат  $k_1(s', s)$ , оперативности  $k_2(s)$  и надежности  $k_3(s)$ .

Снимая одно, два или три ограничения в модели (3.31), получим математические модели частных задач реинжиниринга топологических структур систем мониторинга по критерию живучести с меньшим количеством ограничений или без ограничений.

К каждому узлу в топологической структуре СКММ может быть подключено разное количество элементов, поэтому суммарное значение доли элементов, связанных с центром при увеличении количества узлов  $n$  может привести к образованию локальных экстремумов функции цели (3.30).

Пример зависимости значения частного критерия  $k_4(s)$  от количества узлов  $1 \leq u \leq n$  предоставлен на рисунке 3.4.

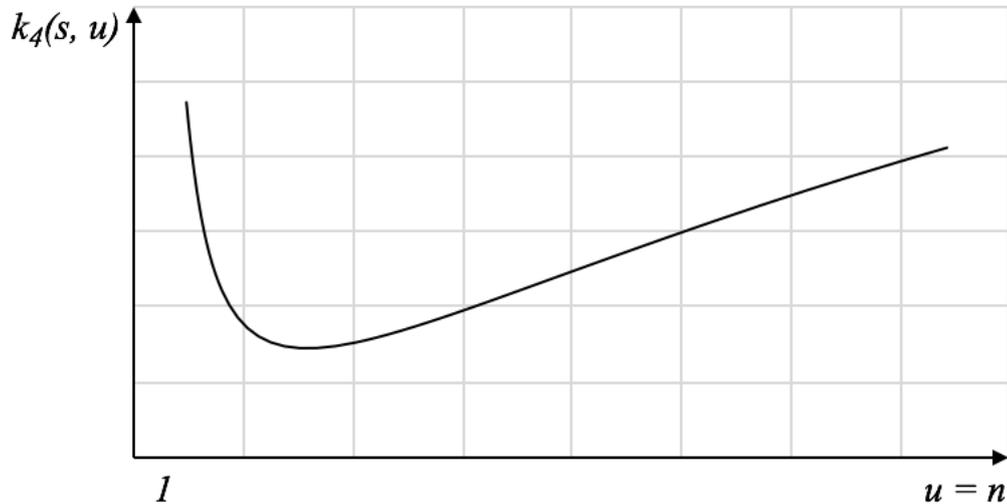


Рисунок 3.4 – Пример зависимости значения частного критерия  $k_4(s)$  от количества узлов  $1 \leq u \leq n$

Общей задачей в процессе проектирования и реинжиниринга СКММ является задача оптимизации варианта решения по всем заданным критериям с учетом всего множества ограничений. Это требует предварительной разработки математической модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур СКММ по показателям затрат, оперативности, надежности и живучести.

### 3.5 Математическая модель многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга

Для возможности выбора наиболее эффективных вариантов при решении задач реинжиниринга топологических структур систем мониторинга предлагается ее многокритериальная математическая модель, которая использует предложенные ранее показатели затрат  $k_i(s', s)$  (3.4), оперативности

$k_2(s)$  (3.9), надежности  $k_3(s)$  (3.18), живучести  $k_4(s)$  (3.30) и объединяет возможности математических моделей частных однокритериальных задач (3.6), (3.17), (3.24) и (3.31):

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1(s', s) = \sum_{i=1}^n [c_i(1-s'_{ii})s_{ii} + d_i s'_{ii} s_{ii} + e_i(1-s_{ii})s'_{ii} - g_i(1-s_{ii})s'_{ii}] + \\ + \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n [c_{ij}(1-s'_{ij})s_{ij} + d_{ij} s'_{ij} s_{ij} + e_{ij}(1-s_{ij})s'_{ij} - g_{ij}(1-s_{ij})s'_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S}; \\ k_1(s', s) \leq k_1^*; \\ k_2(s) = \left\{ \tau^C + \frac{\bar{\alpha}}{\gamma_2} + \tau^E + \frac{\bar{\beta}}{\gamma_1} + \left( \frac{\bar{\alpha}}{\gamma_1} + \frac{\bar{\alpha}}{h_1} + \frac{\bar{\beta}}{h_2} + \frac{\bar{\beta}}{\gamma_2} \right) \sum_{j=1}^n \sum_{l=j}^n s_{jl} s_{jj} \right\} \rightarrow \min_{s \in S}; \quad k_2(s) \leq k_2^*; \quad (3.32) \\ k_3(s) = k^C \times \left( \xi^U \right)^n \times \left( \xi^E \right)^n \times \left( \xi^{CU} \right)^n \times \left( \xi^{UE} \right)^n \rightarrow \max_{s \in S}; \\ u = \sum_{i=1}^n s_{ii}; \quad k_3(s) \geq k_3^*; \\ k_4(s) = \left\{ \min_{1 \leq j \leq n} \left( \frac{n - \sum_{j=2}^n \sum_{i=j}^n s_{ji} s_{ii}}{n} \right) \right\} \rightarrow \max_{s \in S}; \quad k_4(s) \geq k_4^*, \end{array} \right.$$

где  $c_i$  – затраты на  $i$ -й элемент, узел или центр в новой структуре,  $i = \overline{1, n}$ ;

$n$  – количество элементов системы мониторинга;

$s'_{ij}, s_{ij}$  – соответственно элементы матриц связей между элементами,

узлами и центром в существующей структуре  $[s'_{ij}]$  и структуре после

реинжиниринга  $[s_{ij}]$  ( $s'_{ij} = 1$  или  $s_{ij} = 1$ , если между элементами  $i$  и  $j$

существует непосредственная связь;  $s'_{ij} = 0$  или  $s_{ij} = 0$  – в противном случае);

$d_i$  – затраты на модернизацию  $i$ -го элемента, узла или центра в новой структуре,  $i = \overline{1, n}$ ;

$e_i$  – затраты на демонтаж  $i$ -го узла существующей структуры,  $i = \overline{1, n}$ ;

$g_i$  – стоимость ресурсов, которые могут быть повторно использованы (или реализованы) после демонтажа оборудования  $i$ -го узла,  $i = \overline{1, n}$ ;

$c_{ij}$  – стоимость связи между элементами  $i$  и  $j$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ;

$S$  – множество допустимых вариантов топологических структур системы мониторинга (2.22);

где  $\bar{\alpha}$  – объем запроса, поступающего из центра к элементу системы;

$\gamma_l$  – пропускная способность канала связи между центром и узлом системы;

$h_l$  – скорость обработки запроса в узлах системы;

$\gamma_{jl} = \gamma_2$ ,  $j, l = \overline{1, n}$  – пропускная способность канала связи элементами  $j$  и  $l$ ;

$\beta_j = \bar{\beta} = const$ ,  $i = \overline{1, n}$  – объем ответа, поступающего от элемента  $j$ ;

$h_2$  – скорость обработки ответа на запрос в узлах системы.

$k^C$ ,  $k^U$ ,  $k^E$ ,  $k^{CU}$ ,  $k^{UE}$  – соответственно коэффициенты готовности центра, узла, элемента, канала связи верхнего уровня (центр-узел) и канала связи нижнего уровня (узел-элемент);

$k_1^*$ ,  $k_2^*$ ,  $k_3^*$  и  $k_4^*$  – граничные значения показателей затрат на реинжиниринг  $k_1(s', s)$ , оперативности  $k_2(s)$ , надежности  $k_3(s)$  и живучести  $k_4(s)$ .

Абстрагируясь от внутреннего содержания целевых функций частных критериев, математическую модель многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем мониторинга (3.32) удобнее представлять в более компактном виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1(s', s) \rightarrow \min_{s \in S}; \quad k_1(s', s) \leq k_1^*; \\ k_2(s) \rightarrow \min_{s \in S}; \quad k_2(s) \leq k_2^*; \\ k_3(s) \rightarrow \max_{s \in S}; \quad k_3(s) \geq k_3^*; \\ k_4(s) \rightarrow \max_{s \in S}; \quad k_4(s) \geq k_4^*. \end{array} \right. \quad (3.33)$$

Ограничения в модели (3.32) – (3.33) на показатели затрат  $k_1(s',s) \leq k_1^*$ , оперативности  $k_2(s) \leq k_2^*$ , надежности  $k_3(s) \geq k_3^*$  и живучести  $k_4(s) \geq k_4^*$  могут существенно изменять исходное множество допустимых решений задачи, определяемое условиями (2.22).

Путем исключения частных критериев и ограничений из предложенной модели (3.32) – (3.33) можно получить модели задач реинжиниринга по одному, двум или трем частным критериям в условиях ограничений на все или некоторые из показателей.

Для выбора единственного решения задачи (3.32) предлагается использовать положения теории полезности, в соответствии с которой ЛПР приписывает альтернативам  $s \in S$  некоторую полезность  $P(s)$  и осуществляет выбор лучшей из них  $s^o \in S$  по ее значению.

В тех случаях, когда на завершающих этапах реинжиниринга удается выделить относительно небольшое подмножество эффективных вариантов, ЛПР на основе оценок по множеству частных критериев  $k_i(s)$ ,  $i = \overline{1,4}$  устанавливает порядковую (качественную) полезность на множестве альтернатив  $s \in S$ .

Для выражения качественных (сравнительных) характеристик альтернатив будем использовать понятие «предпочтение», а термин «полезность» – для количественного выражения предпочтений [99].

В процессе формализации процедуры выбора эффективных решений ЛПР используем аппарат бинарных отношений. Бинарным отношением  $R$  на непустом множестве вариантов реинжиниринга  $S = \{s\}$  будем называть подмножество множества всех упорядоченных пар из множества  $S$ . При этом множество всех упорядоченных пар задается прямым произведением  $S \times S = \{ \langle s^i, s^j \rangle : s^i, s^j \in S \}$ . Запись  $s^i R s^j$  ( $s^i$  находится в отношении  $R$  к  $s^j$ ) означает, что  $\langle s^i, s^j \rangle$  принадлежит  $R$ ; аналогично не  $s^i R s^j$  ( $s^i \bar{R} s^j$ ) означат, что  $\langle s^i, s^j \rangle$  не принадлежит  $R$ , или что  $s^i$  не находится в отношении  $R$  к  $s^j$ .

Для задания предпочтений используем три вида бинарных отношений:

- эквивалентности (безразличия)  $R_E(S) = \{ \langle s^i, s^j \rangle : s^i, s^j \in S, s^i \sim s^j \}$ ;
- нестрогого предпочтения  $R_{NS}(S) = \{ \langle s^i, s^j \rangle : s^i, s^j \in S, s^i \succeq s^j \}$ ;
- строгого предпочтения  $R_S(S) = \{ \langle s^i, s^j \rangle : s^i, s^j \in S, s^i \succ s^j \}$ .

Бинарные отношения  $R$  в зависимости от вида технологии принятия решений (автоматическая, интерактивная, смешанная) будем задавать путем перечисления  $R(S) = \{ \langle s^i, s^j \rangle, \langle s^j, s^k \rangle, \langle s^k, s^l \rangle \dots \}$ , путем задания общего свойства  $R(S) = \{ \langle s^i, s^j \rangle : s^i, s^j \in S, [ \text{задаваемое свойство} ] \}$  или с помощью матрицы  $A(R)$ , элементы которой определяются условием:

$$a_{ij}(R) = \begin{cases} 1, & \text{если } \langle s^i, s^j \rangle \in R(S); \\ 0, & \text{если } \langle s^i, s^j \rangle \notin R(S). \end{cases} \quad (3.34)$$

Бинарное отношение  $R$  на множестве  $S$  по классическому определению будем считать:

- рефлексивным, если  $s^i R s^i$  для каждого  $s^i \in S$ ; нерефлексивным, если  $s^i \bar{R} s^i$  для каждого  $s^i \in S$ ;
- симметричным, если из  $s^i R s^j$  следует  $s^j R s^i$ ; асимметричным, если из  $s^i R s^j$  следует  $s^j \bar{R} s^i$ ;
- транзитивным, если из  $s^i R s^j$  и  $s^j R s^k$  следует  $s^i R s^k$ ; отрицательно транзитивным, если из  $s^i \bar{R} s^j$  и  $s^j \bar{R} s^k$  следует  $s^i \bar{R} s^k$ .

Транзитивное бинарное отношение  $R(S)$  называется упорядочением или отношением порядка.

В случае, когда предпочтения не образуют циклов, а безразличия не предполагаются транзитивными, каждое непустое конечное множество допустимых вариантов реинжиниринга  $S = \{s\}$  содержит максимально предпочтительную альтернативу  $s^o$  [99]:

$$s^o \succ s^i \succ s^j \dots \succ s^N, \quad (3.35)$$

где  $s^o, s^i, s^j, \dots, s^N \in S$ .

При решении задач реинжиниринга СКММ в САПР в автоматизированном или автоматическом режиме требуется количественная оценка предпочтений альтернатив (3.36). Для этого необходимо выполнить формализацию понятия полезности вариантов реинжиниринга  $P(s)$ ,  $s \in S$ . С этой целью на основе ФПЧК (2.28) будем формировать обобщенную оценку полезности  $P(s)$  для каждого из допустимых вариантов  $s \in S$ . Желательным является, чтобы функции полезности всех частных критериев имели бы один и тот же вид и различались только значениями параметров.

На основании рекомендаций из [101, 102] для данной модели предлагается использовать аддитивную свертку частных критериев, построенную на основе их функций полезности [100, 101]:

$$\xi_i(s) = \left( \frac{k_i(s) - k_i^-}{k_i^+ - k_i^-} \right)^{\mu_i}, \quad i = \overline{1, 4}, \quad (3.36)$$

где  $k_i(s)$ ,  $k_i^+$ ,  $k_i^-$  – соответственно текущее, наилучшее и наихудшее значения  $i$ -го частного критерия,  $i = \overline{1, 4}$ ;

$\mu_i$  – параметр, определяющий вид зависимости (3.36): выпуклая, линейная или вогнутая.

Совмещенный график полученных функций полезности для частных критериев  $k_1(s', s)$ ,  $k_2(s)$ ,  $k_3(s)$  и  $k_4(s)$  при  $\mu_i = 1$ ,  $i = \overline{1, 4}$  представлен на рисунке 3.5.

На последних этапах реинжиниринга необходим более тщательный анализ альтернативных решений. На практике с этой целью применяют сочетания различных методов, что позволяет компенсировать их недостатки для получения эффективного решения [7].



Рисунок 3.5 – Пример характерных зависимостей ФПЧК и обобщенного критерия эффективности  $P(s)$  от количества узлов в системе  $1 \leq u \leq n$

Для сокращения времени выбора наилучшего варианта реинжиниринга СКММ на практике целесообразно предварительно выделять подмножество компромиссных (Парето-оптимальных) решений.

### Выводы по разделу 3

Для сформулированной в разделе 2 постановки многокритериальной задачи реинжиниринга централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга с однотипными элементами и связями с учетом ее системологической модели выполнена формализация частных критериев затрат, оперативности, надежности и живучести.

Целевая функция, отражающая затраты на реинжиниринг, усовершенствована в части возможности учета затрат на демонтаж компонентов существующей системы (элементов, узлов и связей), возможности повторного использования имеющихся ресурсов в системе после

реинжиниринга и прибыли от реализации неиспользуемого в дальнейшем оборудования. При этом полученные формализации позволяют в явном виде учитывать зависимости показателей качества систем мониторинга от переменных, описывающих их топологические структуры.

На основе предложенной формализации частных критериев разработана математическая модель многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга по показателям затрат, оперативности, надежности и живучести, частными случаями которой являются математические модели задач по одному, двум или трем критериям.

С целью снижения емкостной сложности в разработанных математических моделях для хранения информации о связях элементов и размещении узлов предложено использовать треугольную матрицу. Это позволяет практически в два раза сократить размер требуемой компьютерной памяти для программной реализации моделей.

Практическое использование предложенной математической модели четырехкритериальной задачи реинжиниринга топологических структур СКММ в САПР за счет одновременного учета всех основных требований и ограничений объекта оптимизации позволит повысить качество принимаемых проектных решений.

Основные результаты этого раздела опубликованы в работах [2 – 4, 13, 14].

## РАЗДЕЛ 4

МЕТОДЫ РЕИНЖИНИРИНГА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СИСТЕМ  
КРУПНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА4.1 Модификация метода направленного перебора для реинжиниринга  
топологических структур систем мониторинга

Проведенный в разделе 3 анализ зависимостей огибающих локальных экстремумов функций частных критериев затрат  $k_1(s', s)$ , оперативности  $k_2(s)$ , надежности  $k_3(s)$  и живучести  $k_4(s)$  от количества узлов в системе  $u$  позволил выявить их характерное поведение (рис. 3.5). Установлено, что все они, за исключением  $k_1(s', s)$ , имеют наилучшие значения при  $u = 1$ .

На отрезке  $1 \leq u \leq n$  ФПЧК оперативности  $\xi_2(s, u)$  и живучести  $\xi_4(s, u)$  являются одноэкстремальными, ФПЧК надежности  $\xi_3(s, u)$  является монотонно убывающей, а огибающая локальных экстремумов ФПЧК затрат  $\xi_1(s', s, u)$  может быть многоэкстремальной. Это требует для решения задач реинжиниринга топологических структур систем мониторинга применения методов, которые позволяют получить эффективное решение с учетом многоэкстремальности функции общей полезности  $P(s)$  в выражении (2.26).

С учетом того, что ФПЧК оперативности, надежности и живучести на начальном отрезке  $1 \leq u \leq n$  убывают (рис. 3.5), то для того, чтобы существовало хотя бы одно решение задачи (3.32), т.е.  $Card S \geq 1$ , необходимо, чтобы ее ограничения выполнялись хотя бы для  $u = 1$ . В противном случае, задача не будет иметь ни одного допустимого решения, т.е.  $S = \emptyset$ .

Будем считать, что выбор оборудования и технологии функционирования системы мониторинга осуществлен так, что для всех анализируемых вариантов топологических структур выполняются ограничения по оперативности  $k_2(s) \leq k_2^*$ , надежности  $k_3(s) \geq k_3^*$  и живучести  $k_4(s) \geq k_4^*$ .

С учетом многоэкстремальности функции (3.4) от количества узлов в

системе  $k_i(u)$  для поиска глобального оптимального решения задачи предлагается использовать идею метода, предложенного в [56].

Суть ее состоит в определении отрезка  $[u_{min}, u_{max}]$ , который гарантированно содержит оптимальное решение. В качестве нижней границы количества узлов в системе выберем  $u_{min} = 1$ . Для определения верхней границы  $u_{max}$  необходимо определить минимум максимальных дополнительных затрат  $\Delta C_{max}(u)$ . С этой целью требуется решить задачу синтеза оптимальной топологии сети без учета существующей топологии. Поиск оптимального решения задачи производится методом направленного перебора путем последовательного увеличения количества узлов в системе по правилу  $u := u + 1$ .

Таким образом, для решения задачи необходимо решение двух подзадач: поиска минимума максимальных дополнительных затрат  $\Delta C_{max}$  и поиска минимума функции дополнительных затрат на реинжиниринг. Каждая задача сравнима по сложности с классической задачей структурно-топологического синтеза. С учетом этого временная сложность предлагаемой модификации базового метода имеет порядок  $2 \cdot O[t(n)]$  (где  $t(n)$  – временная сложность метода решения задачи структурно-топологического синтеза).

Точность предложенной модификации базового метода определяется точностью методов решения задач определения количества узлов  $u$  и мест их размещения.

Графически суть предложенного метода представлена на рисунке 4.1.

Так как в процессе реинжиниринга требуется решать задачи оптимизации топологических структур для систем мониторинга с различными количествами элементов  $n$  и с различной точностью, предлагается ряд модификаций метода направленного перебора с использованием различных процедур определения мест наилучшего размещения узлов. Они будут различаться по точности получаемых с их помощью решений, временной и емкостной сложности.

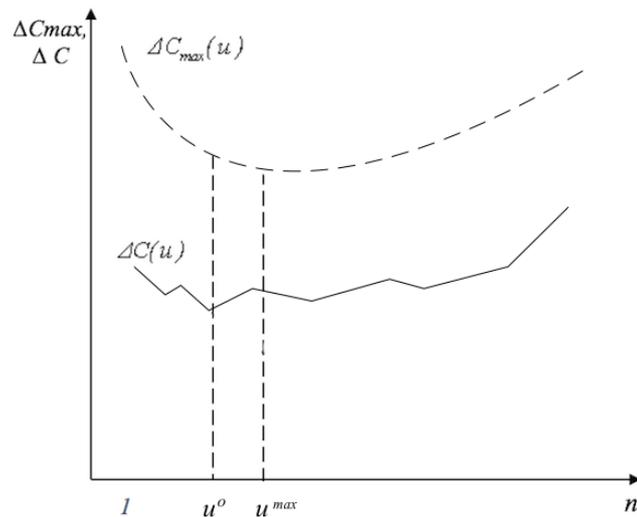


Рисунок 4.1 – Схема поиска минимума целевой функции  $k_1(s', s)$

В качестве базовой использована комбинаторная процедура, предполагающая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов. В качестве альтернативных предлагается использовать процедуры на основе методов покоординатной оптимизации (МПО, *COM – coordinatewise optimization method*), имитации отжига (*SA – Simulated annealing*), поиска с запретами (*TS – Tabu Search*), эволюционного синтеза на основе генетического алгоритма (ГА, *GA – Genetic algorithm*), кластеризации на основе k-means.

#### 4.2 Методы решения задачи размещения узлов системы мониторинга

В процессе реинжиниринга топологической структуры СКММ решается задача размещения центра, узлов, элементов системы и каналов связи между ними на некоторой заданной территории. В системах мониторинга с радиально-узловыми структурами каждый элемент связан с центром через один из узлов. Без потери общности будем считать, что центр и узлы создаются на базе одного из элементов системы.

Задача определения множества узлов и их оптимального размещения является комбинаторной задачей. Общее количество возможных вариантов

топологических структур в процессе реинжиниринга СКММ, состоящей из  $n$  элементов и  $u$  узлов, равно количеству сочетаний из  $n$  по  $u$ :

$$N_u(n) = C_n^u = \frac{n!}{u!(n-u)!}. \quad (4.1)$$

Теоретически оптимальное количество узлов  $u^o$  может изменяться в диапазоне  $1 \leq u \leq n$ . Таким образом, общее количество всевозможных вариантов топологических структур системы мониторинга будет равно:

$$N_u(n) = \sum_{u=1}^n C_n^u = \sum_{u=1}^n \frac{n!}{u!(n-u)!} \approx 2^n. \quad (4.2)$$

Анализ такого количества вариантов для современной вычислительной техники, используемой в САПР, уже при  $80 \leq n \leq 100$  представляет собой весьма сложную задачу. В результате анализа особенностей радиально-узловых структур и функций затрат на создание крупномасштабных систем с радиально-узловыми структурами установлено, что зависимость суммарной длины связей в них и затрат на их реализацию от количества узлов  $u$  является многоэкстремальной, огибающая локальных минимумов – одноэкстремальной, а ее минимум достигается при  $u < \frac{n}{2}$  [104, 105].

Методы решения задачи размещения узлов при реинжиниринге топологических структур систем мониторинга по критерию (3.4) представлены ниже.

**Метод на основе покоординатной оптимизации (COM – *coordinatewise optimization method*).** Суть метода состоит в улучшении некоторого начального решения путем циклической поочередной оптимизации мест размещения для каждого узла при условно фиксированных размещениях  $u-1$  узла.

Алгоритм метода включает следующую последовательность шагов.

1. Задание исходных данных: множества мест возможного размещения узлов; количества узлов  $u$ ; индекса текущего узла  $-j := 1$ ; значения текущей итерации  $-i := 0$ ; значения счетчика полного прохода по всем пунктам  $l$ ; начальных значений для наилучшего варианта мест размещения узлов  $w^0$ ; лучшего текущего значения критерия  $\Delta C(w_i^l) = \infty$ .

2. Сформировать начальное размещение узлов  $w_i^l$ , рассчитать значение критерия  $\Delta C(w_i^l)$ .

3. Увеличить значение счетчика количества итераций  $i := i + 1$ ; для узла  $j$  в  $w_i^l$  изменить место его размещения при фиксированных значениях для  $u - 1$  узлов.

4. Рассчитать значение критерия  $\Delta C(w_i^l)$ . Если  $\Delta C(w_i^l) \leq \Delta C(w_{i-1}^l)$ , присвоить  $\Delta C(w^l) := \Delta C(w_i^l)$ ,  $w^o := w_i^l$  и перейти к шагу 5.

5. Увеличить индекс текущего узла  $j := j + 1$ . Если  $j < u$  перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 6.

6. Если  $l = 0$ , присвоить  $w_i^{l+1} := w_i^l$ ,  $l := l + 1$ ,  $j := 1$ , и перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 7.

7. Если  $\Delta C(w^l) \leq \Delta C(w^{l-1})$  присвоить  $w_i^{l+1} := w_i^l$ ,  $l := l + 1$ ,  $j := 1$  и перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 8.

8. Окончание работы алгоритма: получено решение  $w^o$  с минимальным из рассмотренных значением затрат  $\Delta C(w^o)$ .

**Метод имитации отжига (SA – Simulated annealing).** Метод основан на имитации физического процесса, который происходит при кристаллизации вещества [107]. Основная идея метода состоит в том, чтобы позволить движению алгоритма в направлении ухудшения решения для ухода из локальных минимумов. Вероятность выполнить такой шаг уменьшается во время поиска.

В процессе решения задачи методом имитации отжига необходим расчет значения изменения энергии процесса  $\Delta E$ , вероятности перехода к

полученному значению  $P(\Delta E)$ , функции понижения температуры  $T$ .

Изменения энергии перехода определяется как разность значения заданного критерия на текущей и предыдущей итерации по следующей формуле:

$$\Delta E = C(w_i) - C(w_{i-1}), \quad (4.3)$$

где  $w_i$  – множество мест возможного размещения узлов, определенных на  $i$ -й итерации;

$w_{i-1}$  – множество мест возможного размещения узлов, определенных на  $(i-1)$ -й итерации.

Вероятность перехода к полученному результату определяется следующим образом:

$$P(\Delta E) = e^{-\Delta E/t_i}, \quad (4.4)$$

где  $t_i$  – температура процесса на  $i$ -й итерации.

Температура понижается в процессе поиска. Таким образом, с одной стороны, при фиксированной температуре, чем больше  $\Delta E$ , тем меньше вероятность перехода от решения  $w_{i-1}$  к решению  $w_i$ , с другой стороны, чем выше температура – тем больше вероятность принятия худшего решения.

Выбор вида функции понижения температуры имеет решающее значение для выполнения алгоритма. При выборе линейной функции – время счета может оказаться достаточно большим, в случае степенной функции, время счета значительно ниже, но и точность полученного результата хуже.

Для функции понижения температуры был выбран линейный вариант:

$$T(i) = t_1/i, \quad (4.5)$$

где  $t_1$  – начальная температура процесса;

$i$  – номер итерации.

Алгоритм метода для решения задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга состоит из следующих шагов.

1. Задание исходных данных: множества мест возможного размещения узлов; минимальной  $t_{min}$ , максимальной  $t_{max}$  и начальной  $t_1 = t_{max}$  температуры отжига; значения текущей итерации  $i := 0$ ; количества узлов  $u := u_{max}$ ; количество узлов (из  $u$  заданных), изменяемых на каждой итерации  $k := u_{max}$ .

2. Сформировать начальное решение: множество мест размещения узлов  $w_0$ ,  $w^0 := w_0$ ; матрицу связей элементов, узлов и центра  $[s_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ .

3. Проверить условие окончания: если  $t_i \leq t_{min}$  перейти к шагу 9, в противном случае перейти к шагу 4.

4. Увеличить значение счетчика итераций  $i := i + 1$  и сгенерировать решение  $w_i(k)$ .

5. Определить изменение энергии процесса  $\Delta E$  (4.3).

6. Если  $\Delta E \leq 0$ , сохранить лучшее решение  $w^0 := w_i$  и перейти к шагу 3, в противном случае перейти на шаг 7.

7. Рассчитать вероятность перехода  $p(\Delta E)$  (4.4) и перейти с полученной вероятностью к полученному варианту.

8. Понизить температуру процесса  $t_{i+1} := T(i)$  (4.5), уменьшить значение  $k$  и перейти к шагу 3.

9. Окончание работы алгоритма: получено решение  $w^0$  с минимальным из рассмотренных значением затрат на реинжиниринг  $\Delta C(w^0)$ .

**Метод поиска с запретами (TS – Tabu Search).** В основе метода лежит процедура анализа матрицы ближайших соседей. Основным в механизме, который помогает алгоритму выйти из локального оптимума, является анализ списка запретов, куда входит предыстория поиска. В литературе рассматриваются разные критерии останова алгоритма [106]:

- по достижению фиксированного количества итераций;
- по достижению фиксированного количества итераций, когда значение

функции не улучшается;

– по достижению заданной точности.

В работе использован второй вариант критерия останова алгоритма.

В процессе реализации метода необходимо решение дополнительной задачи – формирование списка «ближайших соседей». Сложность методов решения таких задач оценивается величиной порядка  $o[n^2]$ .

Ключевым вопросом в формировании списка «ближайших соседей» являются вспомогательные структуры данных и использование дополнительных техник, например *Locality-sensitive hashing (LSH)*. Наиболее популярными структурами являются *kd*-дерево, *R*-дерево, *X*-дерево [109 – 110].

Для решения задачи был выбран поиск соседей внутри фиксированной окрестности. Поэтому в качестве структур данных были выбраны ассоциативные структуры.

Алгоритм метода *Tabu Search* для решения задачи реинжиниринга топологической структуры СКММ на основе [108] состоит из следующих шагов.

*Шаг 1.* Задание исходных данных: множества мест возможного размещения узлов, список запретов  $T := \emptyset$ , окрестность поиска ближайших соседей, количество итераций  $i := 0$ ; лучшее текущее значение критерия  $\Delta C(w_i^l) = \infty$ .

*Шаг 2.* Сформировать список «ближайших соседей».

*Шаг 3.* Сформировать начальное решение  $w_0$ ,  $w^0 := w_0$ .

*Шаг 4.* Проверка окончания алгоритма: если условие останова выполнено перейти к шагу 8, в противном случае перейти к шагу 5.

*Шаг 5.* Сформировать решение  $w_i$  на основании матрицы «ближайших соседей» и списка запретов  $T$ .

*Шаг 6.* Если  $C(w_i) < C(w_{i-1})$ ,  $w^0 := w_i$ , добавить элементы множества  $T$  в список запретов.

*Шаг 7.* Увеличить счетчик итераций  $i := i + 1$ , перейти к шагу 4.

*Шаг 8.* Окончание работы алгоритма, получено лучшее из рассмотренных решение  $w^0$ .

**Метод эволюционного синтеза на основе генетического алгоритма (GA – Genetic algorithm).** Метод реализован на основе базового генетического алгоритма, использующего для работы методы наследования, мутации, отбора, кроссинговера [111].

При реализации генетического алгоритма использованы негомологические хромосомы, которые принимают значения в заданном интервале. При этом в хромосоме не может быть двух одинаковых генов. Каждая хромосома представляет множество мест возможного размещения узлов. Под геном понимается код индекса узла. В качестве функции приспособленности используется функция затрат на реинжиниринг системы мониторинга (3.4).

Суть операторов, используемых при генерации топологии СКММ, состоит в следующем:

- кроссовер – оператор скрещивания, применение которого приводит к образованию из двух хромосом одной или нескольких новых. При одноточечном кроссовере случайным образом выбирается точка разрыва, которая разбивает родителя на два сегмента, которые формируют нового потомка;

- мутация – операция, в результате которой случайным образом изменяется один или несколько генов хромосомы.

Алгоритм метода представлен следующими шагами.

*Шаг 1.* Задание исходных данных: множества мест возможного размещения узлов, размера популяции хромосом  $N$ , вероятности мутации  $p$ ; номера итерации (популяции)  $i := 0$ ; лучшего текущего значения критерия  $\Delta C(w_i^l) = \infty$ .

*Шаг 2.* При помощи генератора случайных чисел получить начальную популяцию  $w_0$ ,  $w^0 = w_0$ .

*Шаг 3.* Расчет приспособленности популяции по критерию (3.4).

*Шаг 4.* Если  $\Delta C(w_{i-1}) > \Delta C(w_i)$ , то  $w^0 := w_i$  и перейти к шагу 8, в противном случае – к шагу 5.

*Шаг 5.* Селекция хромосом.

*Шаг 6.* Применение операции скрещивания.

*Шаг 7.* Формирование новой популяции. Переход к шагу 3.

*Шаг 8.* Окончание работы алгоритма, получено лучшее из рассмотренных решение  $w^0$ .

**Метод кластеризации k-means.** Суть метода заключается в минимизации суммарного отклонения точек кластеров от их центров [112]. Это достигается за счет разбиения множества элементов системы мониторинга на заранее известное количество кластеров. На каждой итерации алгоритма проводится вычисление центра масс кластера, полученного на предыдущем шаге. Далее элементы повторно разбиваются на кластеры в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике.

Каждая точка кластера представлена местом возможного размещения узлов, ее координаты определяются координатами элемента. Центроид  $v$  является центром масс кластера и определяется по формуле:

$$v_k^j = (1/n_v) \sum_{i=1}^{n_v} x_i^j, \quad (4.6)$$

где  $v_k^j$  –  $j$ -я координата  $k$ -го центроида,  $j = \overline{1, 2}$ ,  $k = \overline{1, u}$ ;

$n_v$  – количество точек в  $k$ -м кластере (количество элементов, подключенных к узлу);

$x_i^j$  –  $j$ -я координата  $i$ -й точки кластера.

Алгоритм метода состоит из следующих шагов.

*Шаг 1.* Задание исходных данных: множества мест возможного размещения узлов; количества кластеров  $u$ ; оптимального множества мест размещения узлов  $w^0 = \emptyset$ ; начального множества центроидов  $w_0$ ; значения текущей итерации  $i = 0$ .

*Шаг 2.* При помощи генератора случайных чисел инициализировать начальное множество центроидов  $w_0$ .

*Шаг 3.* Для каждого центроида вычислить расстояния до каждой точки, сформировать кластеры.

*Шаг 4.* Вычислить новые центроиды как среднее всех точек кластера.

*Шаг 5.* Проверка окончания алгоритма: если  $w_i = w_{i-1}$  переход к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 6.

*Шаг 6.* Определить оптимальное решение  $w^0$  путем определения для каждого кластера точки, ближайшей к центроиду.

*Шаг 7.* Окончание работы алгоритма, получено лучшее из рассмотренных решение  $w^0$ .

Для выработки рекомендаций по практическому применению предложенных методов решения задачи реинжиниринга топологических структур СКММ необходимо выполнить их программную реализацию и провести оценку их эффективности по показателям точности и временной сложности.

#### 4.3 Анализ эффективности модификаций метода направленного перебора

Для анализа эффективности предложенных модификаций метода направленного перебора, которые включают использование различных процедур размещения  $u$  узлов на  $n$  элементах, была проведена серия компьютерных экспериментов. В процессе исследования решались задачи реинжиниринга топологических структур систем мониторинга по показателю затрат. Эксперименты проводились на персональном компьютере с процессором *Intel(R) Core(TM) i7-4770* (тактовая частота 3.40 ГГц).

Топологическая структура «существующей» СКММ формировалась путем генерации случайным образом мест размещения элементов и узлов, элементы присоединялись к узлам по минимуму стоимости.

Далее проводился реинжиниринг сгенерированной топологической структуры предложенным методом. В качестве базовой использована комбинаторная процедура, реализующая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов и, гарантирующая получение точного решения.

Для сравнения точности предложенных модификаций метода использован показатель относительной погрешности решения

$$\delta C' = 100 \cdot |AC - AC'| / AC,$$

где  $AC$  – значение показателя затрат на реинжиниринг (3.4), полученное по методу полного перебора;

$AC'$  – значение показателя затрат (3.4), полученное с использованием предложенной модификации метода.

В процессе исследования модификаций метода было решено 60 задач (по 10 задач для систем с количествами элементов  $n = 15 \div 40$  и различными количествами узлов  $u < \frac{n}{2}$ ) и получены оценки их точности и временной сложности (табл. 4.1 и 4.2).

Таблица 4.1 – Средняя относительная погрешность решения  $\delta C'$ , %

$n$	<i>COM</i>	<i>SA</i>	<i>TS</i>	<i>GA</i>	<i>k-means</i>
15	0.18	3.21	0.27	1.85	5.94
20	0.33	3.56	1.02	2.95	6.49
25	0.56	4.66	1.79	3.11	7.96
30	0.71	4.81	2.58	3.61	8.89
35	0.87	4.95	3.11	4.82	9.95
40	0.99	5.39	3.77	6.84	11.08
$\delta \bar{C}', \%$	<b>0.61</b>	<b>4.43</b>	<b>2.09</b>	<b>3.86</b>	<b>8.38</b>

По результатам исследования (табл. 4.1) получены оценки средних значений погрешностей получаемых с их помощью решений  $\delta\bar{C}'$  и определены предпочтения среди методов по показателю точности: покоординатная оптимизация, поиск с запретами, эволюционный синтез на основе генетического алгоритма, имитация отжига, кластеризация на основе *k-means*.

Для прогноза оценок погрешностей предложенных модификаций метода направленного перебора по результатам проведенных экспериментов проведена аппроксимация данных таблицы 4.1.

Функции погрешности для предложенных модификаций метода от размерности  $\delta C'(n)$  аппроксимированы полиномами с достоверностью  $R$ :

- *COM*:  $\delta C'(n) = 0.0333n - 0.3079, R = 0.99$ ;
- *SA*:  $\delta C'(n) = 0.0885n + 1.9541, R = 0.95$ ;
- *TS*:  $\delta C'(n) = 0.1403n - 1.7694, R = 0.99$ ;
- *GA*:  $\delta C'(n) = 0.0063n^2 - 0.1682n + 3.2777, R = 0.96$ ;
- *k-means*:  $\delta C'(n) = 0.2115n + 2.5691, R = 0.99$ .

Таблица 4.2 – Время решения задачи  $t$ , с

$n$	<i>COM</i>	<i>SA</i>	<i>TS</i>	<i>GA</i>	<i>k-means</i>
15	0.53	0.07	0.11	0.22	0.10
20	3.02	0.21	0.37	0.71	0.30
25	5.24	0.44	1.37	1.85	0.73
30	11.87	0.83	2.59	3.91	1.54
35	21.34	1.39	5.19	8.14	2.78
40	35.26	2.31	9.78	14.01	4.70
$\bar{t}$	<b>12.88</b>	<b>0.88</b>	<b>3.24</b>	<b>4.81</b>	<b>1.69</b>

По результатам исследования (табл. 4.2) получены оценки значений среднего времени решения задач  $\bar{t}$  и определены предпочтения среди методов по показателю временной сложности: метод имитация отжига (*Simulated*

*annealing*), кластеризация на основе *k-means*, поиск с запретами (*Tabu Search*), эволюционный синтез на основе генетического алгоритма, покоординатная оптимизация.

Для прогноза времени решения задач реинжиниринга с использованием предложенных модификаций метода направленного перебора по результатам проведенных экспериментов проведена аппроксимация данных таблицы 4.2.

Функции временной сложности для предложенных модификаций метода от размерности  $t(n)$  аппроксимированы полиномами с достоверностью  $R$  и представлены на рисунке 4.1:

– *COM*:  $t(n) = 0.0014n^3 - 0.0536n^2 + 0.9501n - 6.2088, R = 0.99$ ;

– *SA*:  $t(n) = 0.0001n^3 - 0.0041n^2 + 0.0835n - 0.5786, R = 0.99$ ;

– *TS*:  $t(n) = 0.0007n^3 - 0.0392n^2 + 0.8007n - 5.557, R = 0.99$ ;

– *GA*:  $t(n) = 0.0006n^3 - 0.0247n^2 + 0.3622n - 1.7798, R = 0.99$ ;

– *k-means*:  $t(n) = 0.0002n^3 - 0.0063n^2 + 0.098n - 0.5512, R = 0.99$ .

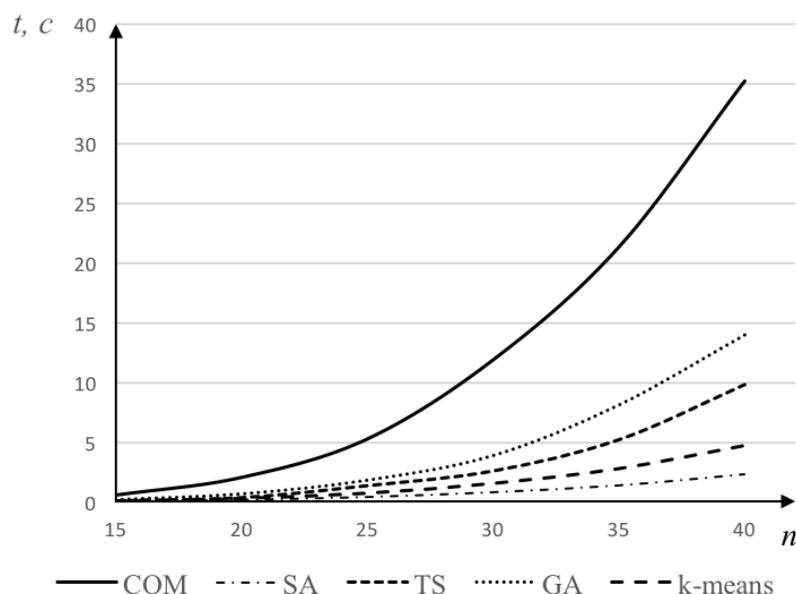


Рисунок 4.1 – Функции временной сложности модификаций метода направленного перебора

Установлено, что базовая модификация метода позволяет получать точное решение и имеет примерно на треть меньшую временную сложность по сравнению с известным методом реинжиниринга топологических структур территориально распределенных объектов [56].

#### 4.4 Метод выбора многокритериальных решений при реинжиниринге топологических структур

На первом этапе реинжиниринга желательно максимально полно представить все допустимые варианты топологических структур системы мониторинга. Исходное множество допустимых вариантов реинжиниринга топологических структур систем мониторинга формально задается условиями (2.22). В дальнейшем в зависимости от жесткости ограничений в (3.32) оно может существенно сокращаться.

Задача выбора многокритериальных проектных решений состоит в поиске среди множества допустимых в смысле (3.32) таких вариантов, которые являются лучшими в заранее определенном смысле [113]. При этом определенность может быть формализована в рамках ординалистического или кардиналистического подходов (подразделы 2.4 и 3.5).

В рамках кардиналистического подхода для многокритериальной количественной оценки качества вариантов реинжиниринга топологических структур СКММ воспользуемся аддитивной сверткой частных критериев [114–116]:

$$P(s) = \sum_{i=1}^4 \lambda_i \xi_i(s), \quad (4.7)$$

где  $\lambda_i, i = \overline{1,4}$  – коэффициенты важности частных критериев  $k_i(s)$ , выбираемые с учетом условий  $\lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1$ ;

Тогда задача выбора наилучшего компромиссного решения формально может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} s^o = \arg \max_{s \in S} \sum_{i=1}^4 \lambda_i \xi_i(s); \\ k_1(s', s) \leq k_1^*; \quad k_2(s) \leq k_2^*; \\ k_3(s) \geq k_3^*; \quad k_4(s) \geq k_4^* \end{cases} \quad (4.8)$$

где  $k_1^*$ ,  $k_2^*$ ,  $k_3^*$  и  $k_4^*$  – граничные значения показателей затрат на реинжиниринг  $k_1(s', s)$ , оперативности  $k_2(x)$ , надежности  $k_3(x)$  и живучести  $k_4(x)$ .

Анализ поведения функций полезности частных критериев оперативности, надежности и живучести  $\xi_i(u)$ ,  $i = \overline{2, 4}$  при увеличении количества узлов в системе мониторинга  $u$  (рис. 3.5), позволяет сделать вывод о том, что ограничения по оперативности  $k_2(s) \leq k_2^*$ , надежности  $k_3(s) \geq k_3^*$  и живучести  $k_4(s) \geq k_4^*$  выполняются уже для  $u = 1$  или не могут быть выполнены ни для одного варианта на всем интервале  $[1, u_{max}]$ .

С учетом этого для решения задачи (4.8) могут быть использованы все предложенные модификации метода направленного перебора с добавлением процедуры вычисления значения аддитивной свертки частных критериев  $P(s)$  (4.7).

Для определения весовых коэффициентов аддитивной свертки частных критериев воспользуемся идеей метода анализа иерархий АНР [117 – 119]. В общем случае его реализация состоит из следующих этапов:

- описание задачи в виде иерархической структуры с уровнями: цель – критерии – альтернативы;
- формирование структуры модели;
- попарные сравнения элементов каждого уровня, с присвоением количественных оценок;

- вычисление коэффициентов важности элементов каждого уровня;
- вычисление веса каждой из альтернатив и определение наилучшей.

Для решаемой задачи создана иерархическая структура модели (рис. 4.2). Для нее определяются приоритеты критериев. Сравнив важность критериев, экспертами формируется матрица парных сравнений  $Z = [z_{ij}]$ , элементы которой служат оценками относительной важности критерия  $i$  относительно критерия  $j$ . При этом если  $z_{ij} = f_k$ , то  $z_{ji} = 1/f_k$ , где  $f_k$  – оценка важности критерия  $i$  относительно критерия  $j$ .

Для матрицы  $Z = [z_{ij}]$  определим собственный вектор уровня критериев  $w = [w_i]_{i=1}^4$  и весовые коэффициенты аддитивной свертки частных критериев:

$$w_i = 4 \sqrt[4]{\prod_{j=1}^4 z_{ij}}, \quad i, j = \overline{1,4}; \quad \lambda_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^4 w_j}, \quad i, j = \overline{1,4}. \quad (4.9)$$

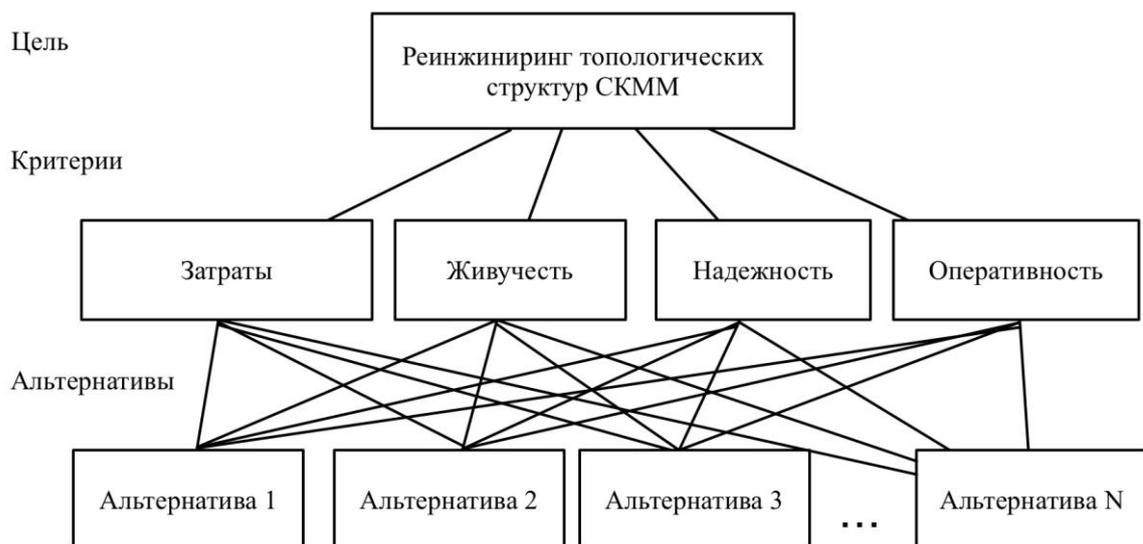


Рисунок 4.2 – Структура модели задачи оценки важности частных критериев на основе метода анализа иерархий

На последних этапах метод предполагает анализ всего множества возможных вариантов реинжиниринга топологических структур СКММ. Его

мощность в общем случае составляет:

$$N(n) = \sum_{u=1}^n C_n^u = \sum_{u=1}^n \frac{n!}{u!(n-u)!} \approx 2^n, \quad (4.10)$$

где  $n$  – количество мест возможного размещения узлов (элементов системы);

$u$  – количество узлов в системе.

Ввиду того, что ЛПР (экспертам) не под силу анализ большого количества допустимых вариантов реинжиниринга топологических структур СКММ, а количественные методы оптимизации позволяют определять численные значения функционально-стоимостных характеристик топологической структуры, предлагается реализовать последний этап метода в автоматическом режиме. С этой целью можно использовать комбинаторные методы направленного перебора или приближенные (эвристические) методы [5]. При этом не зависимо от используемого метода анализа, целесообразным является выделение подмножества эффективных (компромиссных, Парето-оптимальных) вариантов.

Традиционно в задачах выбора многокритериальных решений предполагается наличие сформированного множества допустимых решений  $S = \{s\}$ . При решении задач проектирования или реинжиниринга объектов это требует хранения огромных массивов излишних данных. Для уменьшения объема требуемой памяти и сокращения времени поиска наилучшего компромиссного решения предлагается формировать множество компромиссов  $S^K \subseteq S$  параллельно с формированием множества альтернативных решений.

Анализ зависимостей значений частных критериев  $k_1(s',s)$  (3.4),  $k_2(s)$  (3.17),  $k_3(s)$  (3.24) и  $k_4(s)$  (3.31) от количества узлов в системе  $u$  позволяет выявить границы подмножества компромиссов  $S^K$  по количеству узлов в системе  $[1, u_{max}]$ . Значение  $u_{max}$  соответствует количеству узлов в системе,

после которого значения всех частных критериев ухудшаются (рис. 3.5).

Алгоритм формирования подмножества компромиссов  $S^K$  включает следующую последовательность шагов.

1. Задать: начальное значение количества узлов  $u := 1$ ; начальное значение номера варианта решения  $i := 0$ ; множество компромиссных вариантов – пустое,  $S^K = \emptyset$ .

2. Увеличить значение счетчика  $i := i + 1$ , сформировать вариант топологической структуры  $s^i \in S$  и вычислить оценки затрат  $k_1(s', s^i)$  (3.4), оперативности  $k_2(s^i)$  (3.17), надежности  $k_3(s^i)$  (3.24), живучести  $k_4(s^i)$  (3.31).

3. Сравнить вариант  $s^i$  с каждым из вариантов  $s^j \in S^K, j = 1, \overline{|S^K|}$ . Если хотя бы один вариант  $s^j \succ s^i$ , исключить  $s^i$  из дальнейшего рассмотрения и перейти к шагу 4; в противном случае, добавить  $s^i$  в подмножество  $S^K$  и удалить из подмножества  $S^K$  все  $s^j$ , которые по всем показателям хуже  $s^i$ .

4. Если условия останова метода формирования множества допустимых решений  $S$  для заданного значения количества узлов  $u$  не выполняются, перейти к шагу 2, в противном случае – к шагу 5.

5. Если наилучшие значения всех показателей (3.4), (3.17), (3.24) и (3.31) для значения  $u$  хуже, чем для  $u - 1$ , перейти к пункту 6; в противном случае  $u := u + 1, i := 0$  и перейти к шагу 2.

6. Окончание работы алгоритма: выделено подмножество компромиссных решений  $S^K$ .

Для оценки относительных размеров (мощностей) подмножеств компромиссных решений при реинжиниринге топологических структур  $S^K$  была проведена серия компьютерных экспериментов, в ходе которых было решено 60 задач (по 10 задач с количеством элементов  $n = 15 \div 40$ ) (табл. 4.3).

При этом были получены оценки средних  $\delta N$  и максимальных  $\delta N_{max}$  относительных мощностей подмножеств компромиссных решений  $S^K$  в зависимости от количества элементов, входящих в состав системы  $n$ :

$$\delta N = \frac{\text{Card } S^K}{\text{Card } S} \cdot 100\% ,$$

где  $\text{Card } S^K$  и  $\text{Card } S$  – мощности подмножества компромиссов  $S^K$  и исходного множества допустимых решений  $S$  (2.22).

Данные для средних значений  $\delta N(n)$  относительных мощностей подмножеств компромиссных решений  $S^K$  аппроксимируются с достоверностью  $R = 0.96$  функцией  $\delta N(n) = 56.786 \times e^{-0.21n}$ .

Таблица 4.3 – Относительные мощности подмножеств компромиссных вариантов  $S^K$  в множествах допустимых вариантов  $S$ , %

$n$	15	20	25	30	35	40
$\delta N$	2.7	0.89	0.19	0.11	0.07	0.009
$\delta N_{max}$	3.4	1.86	0.25	0.15	0.09	0.012

Для сокращения времени решения задачи предлагается формировать подмножество компромиссов  $S^K$  параллельно с генерацией допустимых вариантов реинжиниринга топологических структур. Оценки выигрыша времени при таком способе формирования подмножества компромиссов  $S^K$  приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Среднее относительное сокращение времени формирования множества компромиссов, %

$n$	15	20	25	30	35	40
$\delta t$	2.4	4.8	11.6	18.7	25.1	36.2

Данные таблицы 4.4 для среднего относительного сокращение времени формирования подмножества компромиссов  $S^K$  за счет распараллеливания процесса аппроксимируются с достоверностью  $R = 0.99$  функцией

$$\delta t(n) = 0.0299 \cdot n^2 - 0.2918 \cdot n - 0.325.$$

Предложенный метод выбора многокритериальных решений позволяет решать множество задач реинжиниринга топологических структур систем мониторинга по одному, двум или трем критериям с различными наборами ограничений.

#### Выводы по разделу 4

Для решения задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга предложены модификации метода направленного перебора вариантов по количеству узлов в системе. В качестве базовой предложена модификация, использующая направленный перебор всевозможных вариантов размещения узлов, а в качестве альтернативных – построенные на основе методов покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза, кластеризации на основе *k-means*.

Получены оценки их точности и временной сложности. При этом базовая модификация метода позволяет получать точное решение и имеет на треть меньшую временную сложность по сравнению с известным методом. Результаты экспериментальных исследований позволили установить их существенное различие по показателям точности и временной сложности. Это позволит выбирать наиболее подходящую модификацию метода при решении практических задач, исходя из требуемой точности и имеющихся вычислительных и временных ресурсов.

Предложенный метод сочетает достоинства экспертной оценки важности частных критериев путем анализа иерархии и направленного перебора вариантов по количеству узлов в системе.

Практическое применение метода позволит сократить время решения задачи за счет параллельного с генерацией вариантов формирования подмножества Парето-оптимальных решений. При необходимости решения

задач большой размерности предлагается использовать модификации метода, реализующие размещения узлов на основе методов покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза, кластеризации на основе *k-means*.

Основные результаты этого раздела опубликованы в [5 – 7, 15, 16].

## РАЗДЕЛ 5

ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РЕИНЖИНИРИНГА  
ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

## 5.1 Состав и функции программно-методического комплекса

Все предложенные математические модели (раздел 3) и модификации метода направленного перебора (раздел 4) реализованы программно в составе разработанного автором программно-методического комплекса (ПМК) *Reengineering-TS*. ПМК *Reengineering-TS* составляет основу программного обеспечения АРМ для систем автоматизации проектных и исследовательских работ по реинжинирингу топологических структур СКММ.

ПМК *Reengineering-TS* является Windows-приложением, реализованным на языке программирования C++ с использованием объектно-ориентированной методологии программирования [120 – 124] и современных подходов к решению аналогичных задач [125 – 129]. Использование объектно-ориентированной методологии приводит к уменьшению сложности программного обеспечения, повышению надежности, упрощению модификации отдельных компонентов без изменения остальных его компонентов, возможности повторного использования отдельных компонентов.

Структурные компоненты ПМК группируются в модули в соответствии с их назначением и выполняемыми функциями (рис. 5.1). Структура программного средства ПМК *Reengineering-TS* включает следующие модули:

- модуль ввода/вывода данных;
- модуль графического интерфейса;
- модуль параметрической идентификации математических моделей;
- модуль оптимизации топологических структур;
- модуль моделирования;
- модуль формирования множества компромиссов.

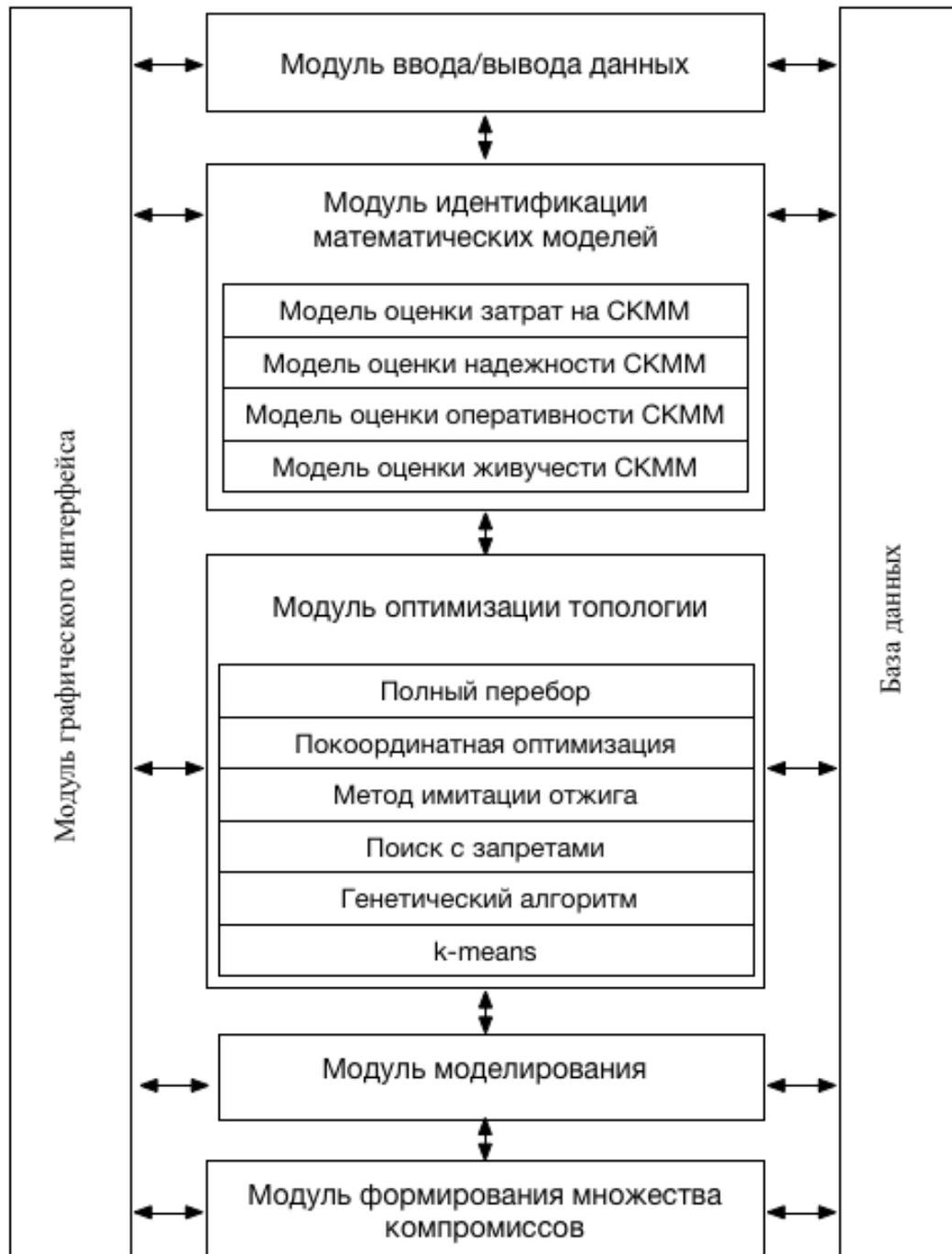


Рисунок 5.1 – Структура программного средства ПМК реинжиниринга топологических структур СКММ *Reengineering-TS*

**Модуль графического интерфейса** реализует взаимодействие пользователя с основными функциями программного продукта и предоставляет следующие интерфейсы:

- панель инструментов;
- ввод/вывод данных;
- выбор режима ввода данных;
- вывод графиков критериев и целевых функций;
- выбор режима реинжиниринга;
- выбор метода реинжиниринга;
- выбор критерия реинжиниринга и ввод параметров критерия.

Интерфейс главного экрана приложения представлен на рисунке 5.2.

**Модуль ввода/вывода данных** реализует следующие функции:

- ввод данных (загрузка данных из файла (рис. 5.3)), автогенерация (рис. 5.4), ввод с клавиатуры («ручной ввод» (рис. 5.5));
- проверка корректности полученных данных;
- редактирование топологии существующей СКММ для интерактивного режима реинжиниринга;
- отображение введенных данных;
- отображение результатов расчетов;
- сохранение результатов расчетов (результаты расчета, лог расчета, значения критериев и целевой функции).

Для корректной загрузки данных из файла необходимо чтобы файл был в формате *.txt* и содержал ключевые слова *Elements* (координаты элементов системы), *Connections* (матрица связей существующей системы), *Additional* (координаты новых элементов, которые ранее не входили в состав системы). *Connections* и *Additional* являются опциональными параметрами. Пример файла с исходными данными представлен на рисунке 5.6.

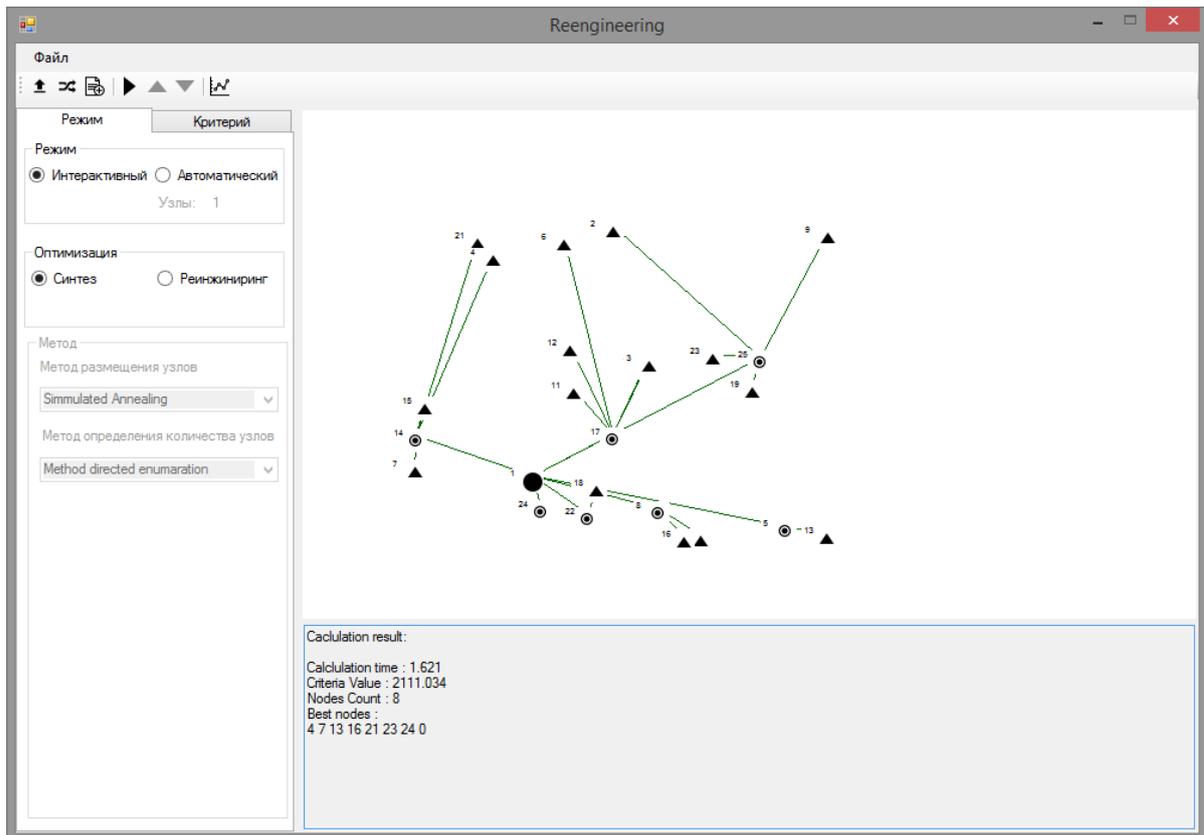


Рисунок 5.2 – Интерфейс главного экрана приложения

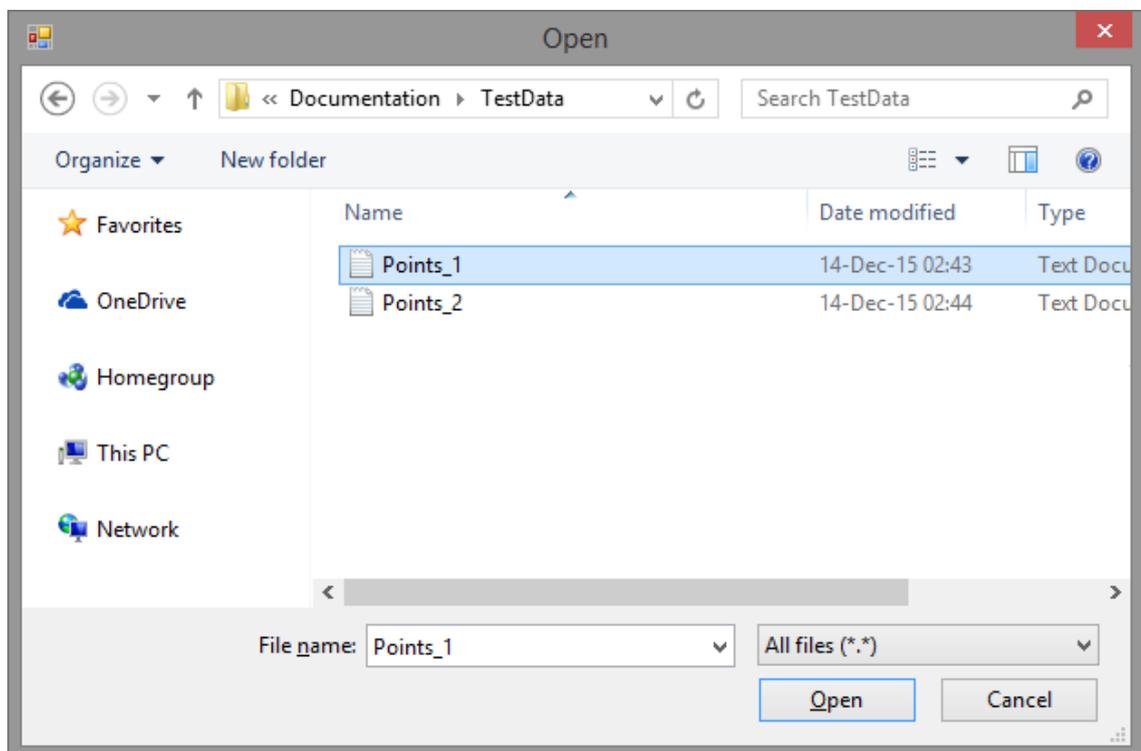


Рисунок 5.3 – Интерфейс загрузки данных из файла

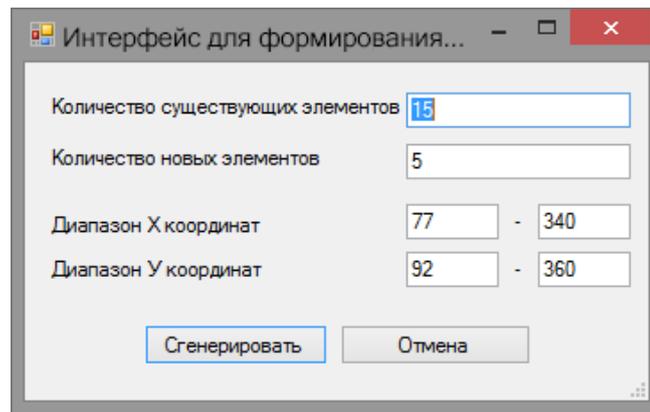


Рисунок 5.4 – Интерфейс для формирования исходных данных с использованием генератора случайных чисел

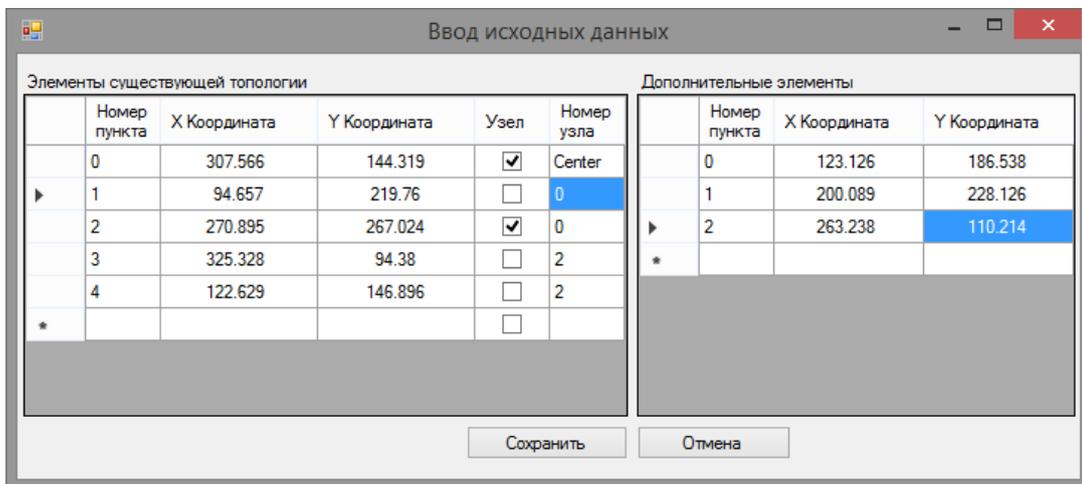


Рисунок 5.5 – Интерфейс для ввода исходных данных с клавиатуры

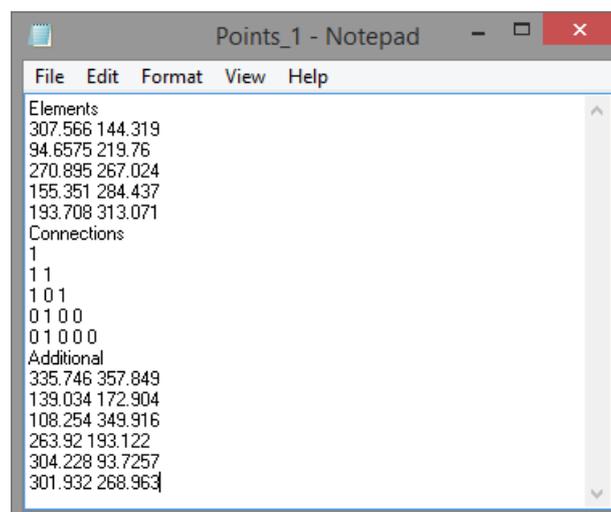


Рисунок 5.6 – Пример файла с исходной топологической структурой СКММ

Заданная топологическая структура СКММ отображается в форме редактирования топологии со следующими условными обозначениями:

- – центр (центральный узел);
- ⊙ – узел;
- ▲ – элемент;
- – связи между элементами, узлами и центром.

В процессе решения задачи реинжиниринга топологической структуры СКММ программный комплекс дает возможность накапливать результаты расчетов на каждом шаге, что позволяет получить статистику расчетов.

После проведения расчетов по выбранному критерию приложение дает возможность рассчитать функции полезности частных критериев (3.33). Задавая значения параметров ФПЧК (3.33), пользователь имеет возможность подбирать ее форму (выпуклая, линейная, вогнутая) и вид. Интерфейс для вывода графиков зависимости частного критерия от количества узлов и соответствующей ФПЧК представлен на рисунке 5.7.

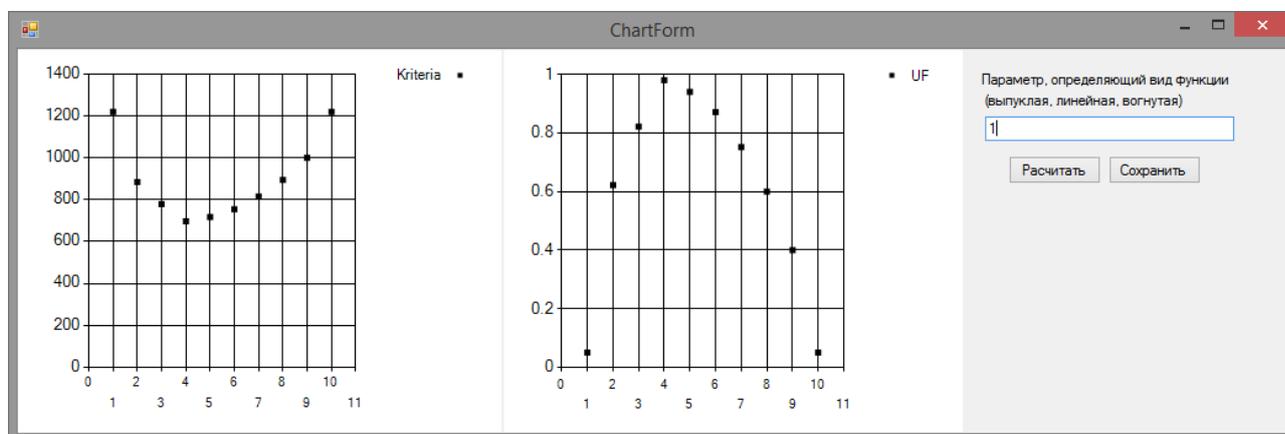


Рисунок 5.7 – Интерфейс отображения графиков частного критерия и ФПЧК

**Модуль идентификации математических моделей** реализует функции задания значений параметров критериев оптимизации (затраты, оперативность, надежность, живучесть) и расчета их значений для заданной топологической структуры системы мониторинга.

Форма окна для выбора критерия оптимизации и задания параметров представлена на рисунке 5.8.

**Модуль оптимизации сети** реализует функции решения задачи определения количества и мест размещения узлов системы на основании заданных исходных данных по одному из выбранных методов (полного перебора, покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционному, *k-means*).

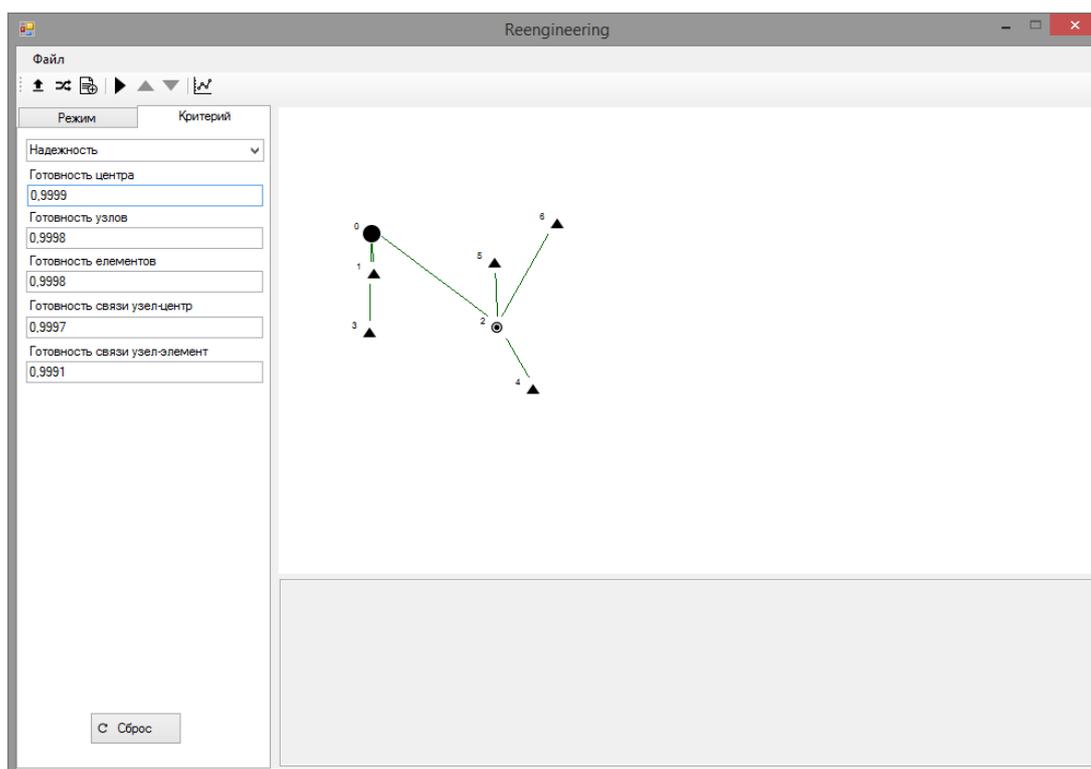


Рисунок 5.8 – Интерфейс задания параметров частных критериев

**Модуль моделирования** реализует процесс моделирования (реинжиниринга, синтеза) путем объединения и использования данных, предоставляемых другими модулями. Вычисление может производиться в интерактивном, автоматическом и пошаговом режимах.

Интерфейс выбора метода и режима реинжиниринга представлен на рисунке 5.9.

**Модуль формирования множества компромиссов** реализует функцию формирования множества Парето-оптимальных решений по характеристикам вариантов, полученных с помощью модуля моделирования. Полученный

результат сохраняется в файл формата *.csv* (*Comma-Separated Values*), что позволяет проектировщику использовать его для дальнейшего принятия решения.

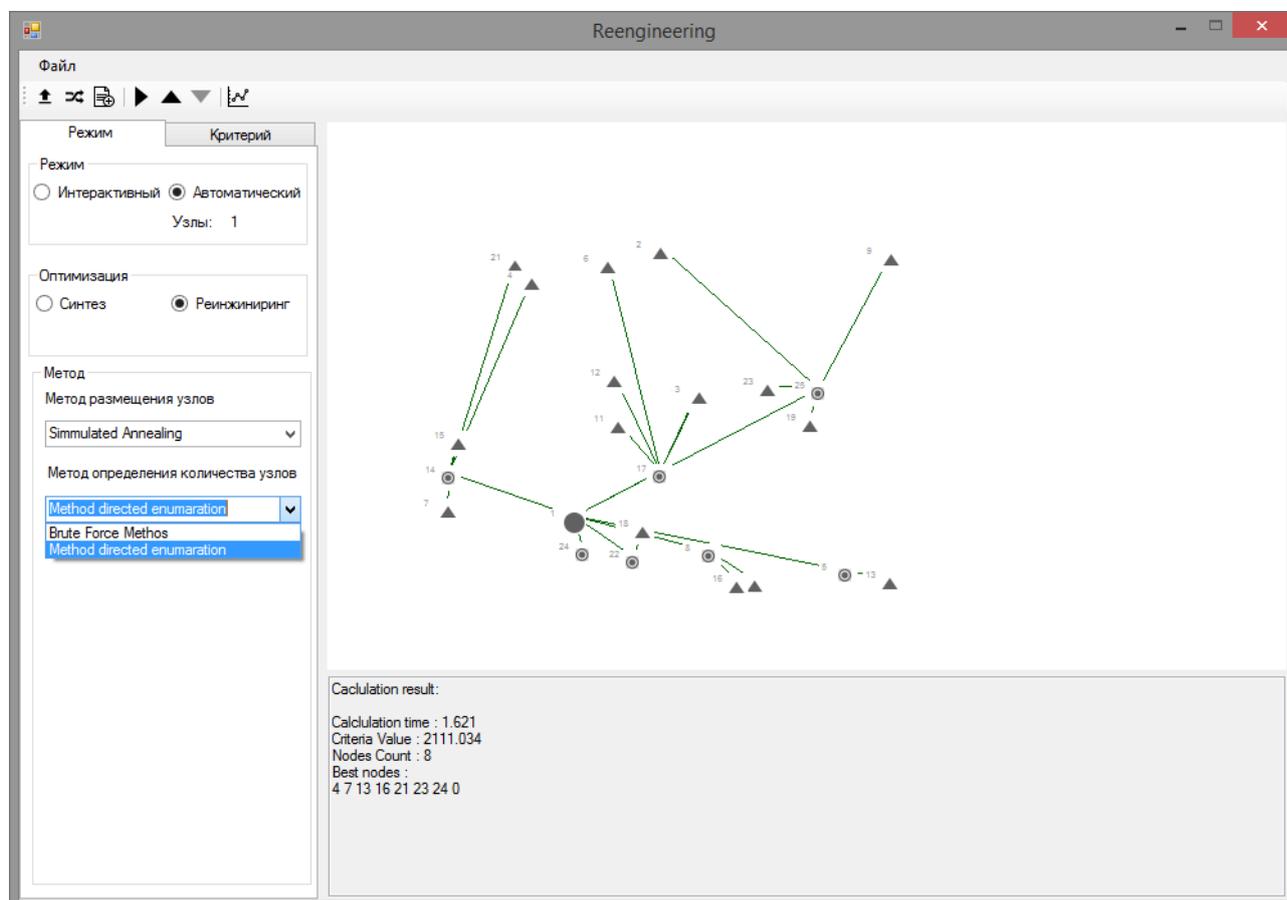


Рисунок 5.9 – Интерфейс выбора метода и режима реинжиниринга

При моделировании программного комплекса как объектно-ориентированной системы использованы диаграммы классов, которые отображают набор классов, интерфейсов и коопераций, а также связи между ними. Применение данного типа диаграмм необходимо для визуализации и документирования структурных моделей, конструирования исполняемых систем посредством прямого и обратного проектирования [130 – 132].

Каждая диаграмма представляет отдельный аспект системы, при этом в совокупности они предоставляют пользователю полную информацию, необходимую для статического представления системы.

Для представления разработанного программно-методического комплекса, как объекта проектирования, разработаны диаграмма классов каждого модуля и их описание.

В соответствии с принципами построения диаграмм классов, каждый класс содержит три компонента: имя класса, поля (атрибуты), методы.

**Модуль графического интерфейса** состоит из следующих классов:

- *MainForm()* – интерфейс главного экрана программного комплекса, посредством которого осуществляется доступ ко всем остальным интерфейсам;
- *DataInputView()* – интерфейс ввода исходной топологии с клавиатуры;
- *GeneratePointsForm()* – интерфейс ввода данных для формирования исходной топологии с использованием генератора случайных чисел;
- *ChartForm()* – интерфейс отображения графиков расчета критерия и целевой функции;
- *TopologyDrawer()* – класс отвечает за отображение топологий (исходной и полученной в результате расчетов) и редактирование (в интерактивном режиме).

Диаграмма классов модуля графического интерфейса представлена на рисунке 5.10.

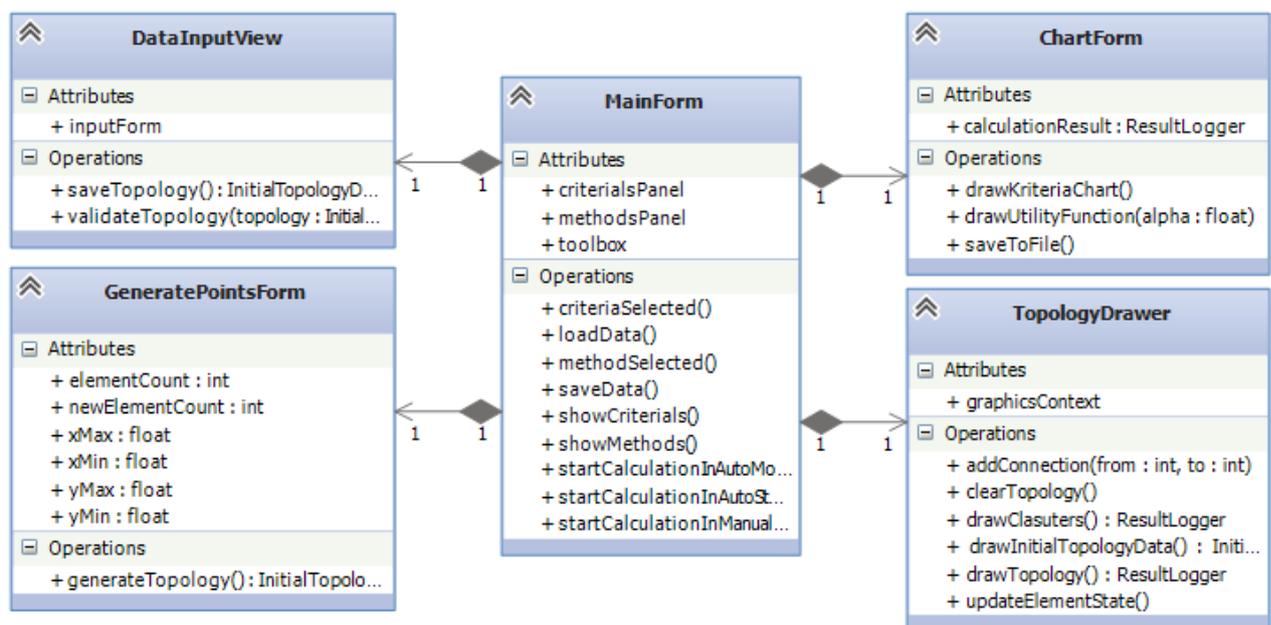


Рисунок 5.10 – Диаграмма классов модуля графического интерфейса

**Модуль ввода/вывода данных** реализуется с использованием следующих классов:

- *PointsParsing()* – класс отвечает за загрузку и валидацию данных из файла;
- *DataGenerator()* – класс отвечает за формирование топологии с использованием генератора случайных чисел в заданном диапазоне координат и с заданным количеством элементов.
- *DataIntupViewHandler()* – класс отвечает за обработку и проверку данных, полученных путем ввода топологии с клавиатуры *DataIntupView()*;
- *TopologyDrawerHendler()* – класс отвечает за обработку топологии, редактируемой в графическом интерфейсе *TopologyDrawer()*;
- *InitialTopologyData()* – класс хранит информацию о текущем состоянии топологии.

Диаграмма классов модуля ввода/вывода данных представлена на рисунке 5.11.

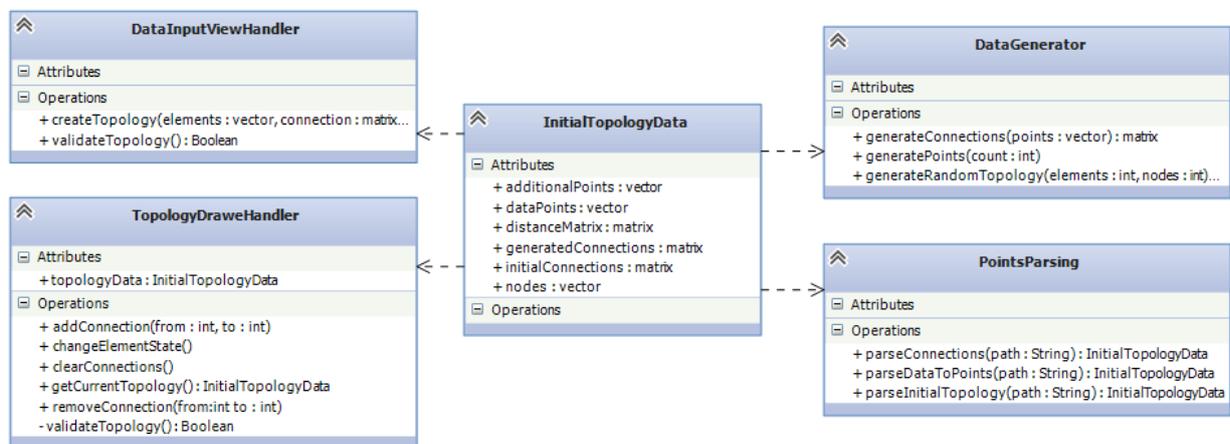


Рисунок 5.11 – Диаграмма классов модуля ввода/вывода данных

**Модуль идентификации математических моделей** состоит из следующих классов:

- *CriterialsCalculator()* – класс отвечает за программную реализацию критериев реинжиниринга топологических структур СКММ;
- *CriteriaComponents()* – класс отвечает за хранение данных по каждому

критерию и его компонентам.

Диаграмма классов модуля идентификации математических моделей представлена на рисунке 5.11.

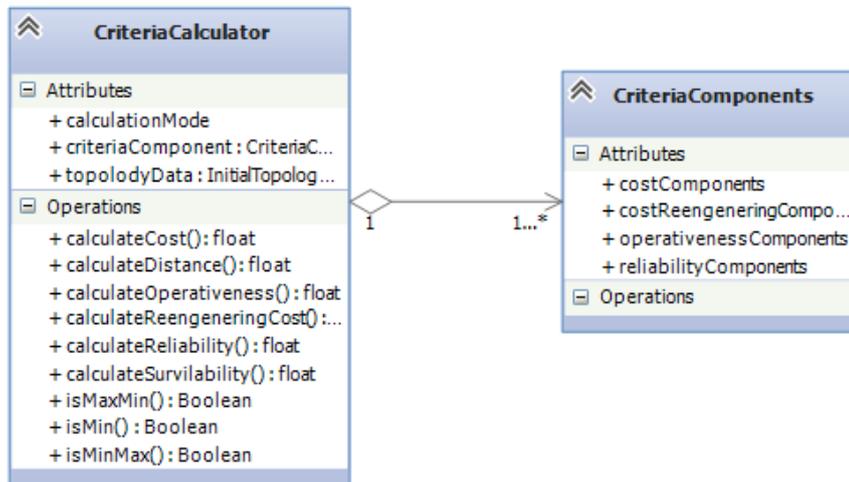


Рисунок 5.11 – Диаграмма классов модуля идентификации математических моделей

**Модуль оптимизации топологии** состоит из следующих основных классов:

- *BaseParentMethod()* – класс-родитель, содержащий базовые параметры и функции методов;
- *BaseCoordinateDescentMethod()* – класс, реализующий метод направленного перебора;
- *BruteForceMethod()* – класс, реализующий метод полного перебора;
- *SimmulatedAnnealing()* – класс, реализующий метод имитации отжига (*Simmulated Annealing*);
- *TabuSearchMethod()* – класс, реализующий метод поиска с запретами (*Tabu Search*);
- *BaseGA()* – класс, реализующий метод эволюционного синтеза на основе генетического алгоритма (*GA*);
- *MethodsHandler()* – класс реализует настройку выбранного метода для решения задачи.

Диаграмма классов модуля представлена на рисунке 5.12.

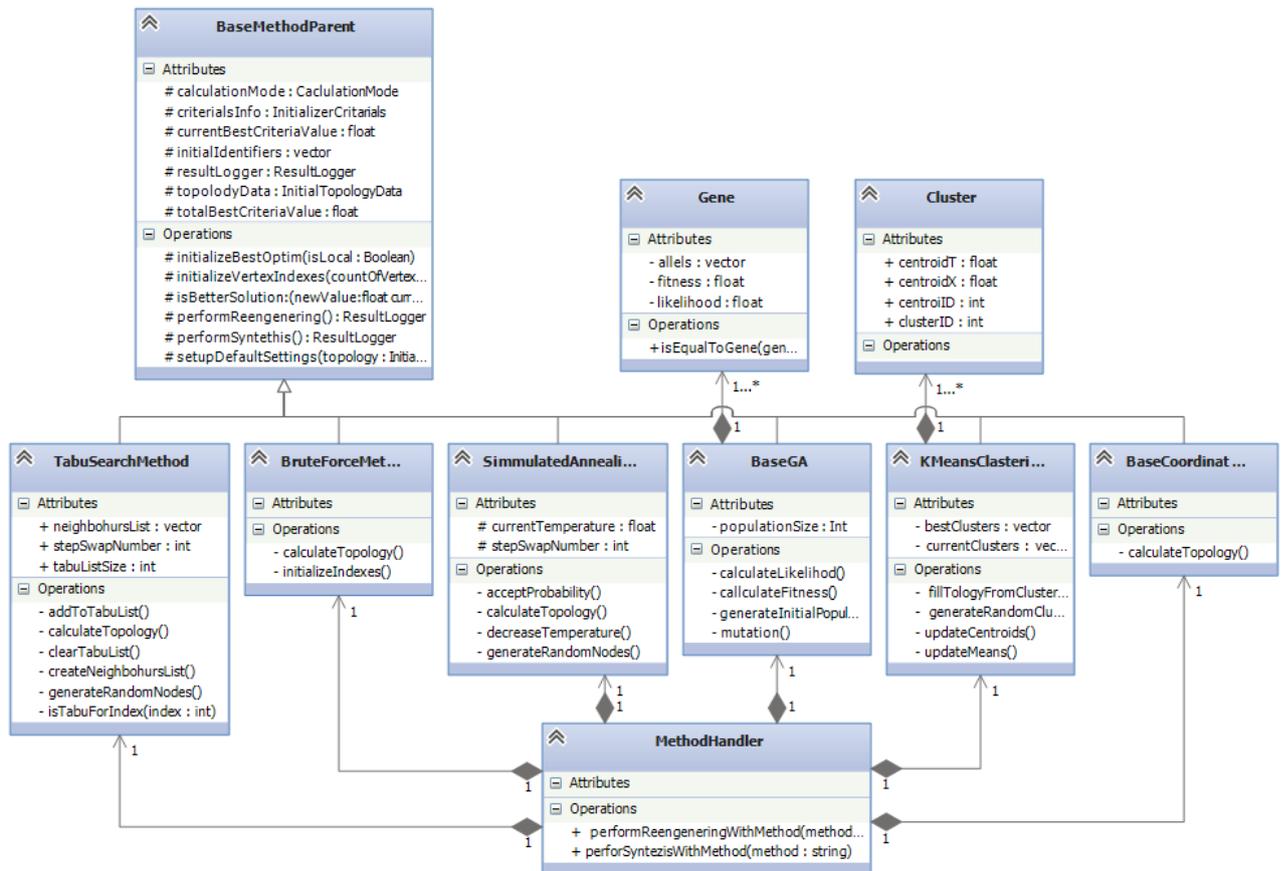


Рисунок 5.12 – Диаграмма классов модуля оптимизации топологии

**Модуль моделирования включает следующие классы:**

– *ReengeneeringFacade()* – класс, обеспечивающий фасад (единственную точку входа) для проведения реинжиниринга на базе выбранных методов и критериев.

– *ResultLogger()* – класс отвечает за сохранение результатов моделирования и текущего состояния.

Диаграмма классов модуля моделирования представлена на рисунке 5.13.

**Модуль формирования множества компромиссов** включает следующие классы:

– *ParetoAreaDetecion()* – класс реализует формирование множества компромиссных решений;

– *MultyCriteriaModel()* – класс хранит состояние многокритериальной модели и сформированное множество компромиссов.

Диаграмма классов модуля формирования подмножества компромиссов представлена на рисунке 5.14.



Рисунок 5.13 – Диаграмма классов модуля моделирования

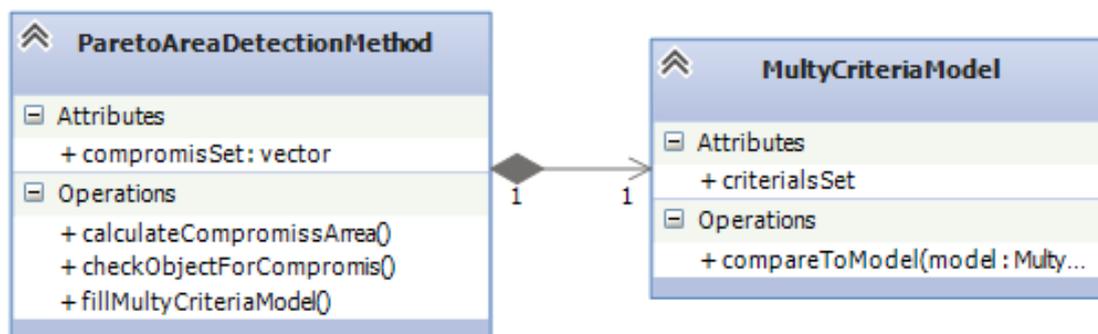


Рисунок 5.14 – Диаграмма классов модуля формирования подмножества компромиссов

Написание программных кодов и формирование *UML* диаграмм классов осуществлялось с использованием *IDE – Microsoft Visual Studio 2013*. Применение выбранного инструментального средства и языка программирования *C++* обеспечит высокую гибкость и масштабируемость разработанного программного комплекса.

Технические требования использования программного комплекса *Reengineering-TS*:

- техническое устройство с установленной операционной системой *Windows XP* и выше, а так же пакетом *Visual C++ Redistributable Packages*;
- процессор с частотой 1 ГГц и выше;
- оперативное запоминающее устройство 1 ГБ и больше;
- видеокарта с поддержкой *DirectX 9* и разрешающей способностью экрана не менее  $1024 \times 768$ .

## 5.2 Реинжиниринг топологических структур в автоматическом режиме

Работоспособность разработанного ПМК продемонстрирована в процессе решения тестовых задач реинжиниринга систем мониторинга.

Возможности разработанного ПМК *Reengineering-TS* автоматическом режиме рассмотрим на примере решения задачи реинжиниринга топологической структуры СКММ.

Объектом реинжиниринга является трехуровневая централизованная СКММ с радиально-узловой структурой. Каждый ее элемент  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  связан с центром через один из узлов. Центр и узлы СКММ могут размещаться только на базе одного из элементов.

Исходными данными задачи являются:

- множество элементов исходного варианта системы  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n'}$  (табл. 5.1);
- множество новых элементов системы мониторинга, которые отсутствуют в исходной топологической структуре (табл. 5.2);
- существующий вариант топологической структуры системы, задаваемый местами расположения элементов, узлов, центра (центр расположен на базе элемента  $i = 1$ ), а также связями между элементами, узлами и центром  $[s'_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  (табл. 5.3);

- затраты на реинжиниринг компонентов топологической структуры;
- показатели производительности компонентов системы;
- показатели надежности компонентов системы.

Таблица 5.1 – Координаты размещения элементов исходного варианта системы

Номер элемента	Координаты		Номер элемента	Координаты	
	X	Y		X	Y
1	215.15	252.32	6	87.313	248.025
2	270.799	319.957	7	108.181	163.556
3	274.162	231.602	8	263.439	216.472
4	120.871	116.626	9	158.861	373.592
5	110.71	246.447	10	295.102	274.385

Таблица 5.2 – Координаты размещения новых элементов

Номер элемента	Координаты	
	X	Y
11	165.44	336.11
12	214.648	303.518
13	224.657	279.513
14	270.719	285.925
15	236.72	219.073

Для выбора лучшего варианта реинжиниринга топологической структуры СКММ по критерию минимума дополнительных затрат (3.4) необходимо задать параметры целевой функции задачи (табл. 5.4).

Таблица 5.3 – Матрица связей элементов существующей системы

Элементы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1														
2	1	0													
3	1	0	1												
4	0	0	0	0											
5	1	0	0	1	1										
6	0	0	0	0	1	0									
7	0	0	0	0	1	0	0								
8	0	0	1	0	0	0	0	0							
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0						
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 5.4 – Затраты на реинжиниринг компонентов системы

Показатель	Значение, у.е.
Затраты на создание нового узла	20000.0
Затраты на модернизацию узла	1000.0
Затраты на демонтаж узла	100.0
Реализация ресурсов узла	100.0
Затраты на создание связи узел-центр	1000.0
Затраты на модернизацию связи узел-центр	500.0
Затраты на демонтаж связи узел-центр	50.0
Реализация ресурсов связи узел-центр	50.0
Затраты на создание связи узел-элемент	1000.0
Затраты на модернизацию связи узел-элемент	500.0
Затраты на демонтаж связи узел-элемент	50.0
Реализация ресурсов связи узел-элемент	50.0

Для проведения реинжиниринга топологической структуры в автоматическом режиме необходимо выполнить следующую последовательность шагов.

1. Задать исходные параметры топологической структуры СКММ (места размещения элементов и связи между ними (опционально)).

2. На панели «Режим» в группе кнопок «Режим» выбрать пункт «Автоматический», в группе кнопок «Оптимизация» выбрать пункт «Реинжиниринг».

3. На панели «Режим» выбрать метод, который будет применяться для расчета.

4. На панели «Критерий» выбрать необходимый критерий и задать его параметры (если необходимо).

5. На панели инструментов выбрать соответствующий вариант автоматического решения (автоматический, пошаговый автоматический).

Управление процессом реинжиниринга осуществляется при помощи кнопок, расположенных на панели инструментов:

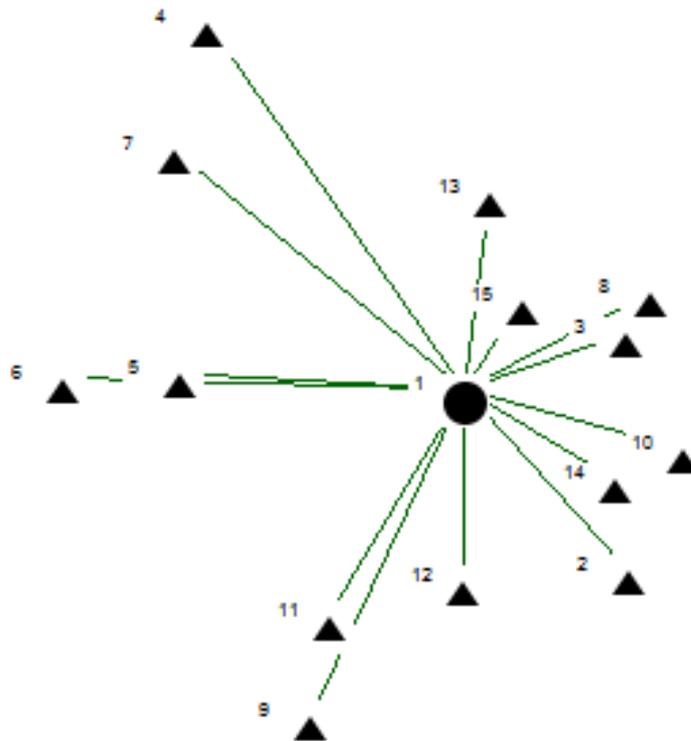
- ▶ – выбор оптимального варианта;
- ▲ – пошаговый реинжиниринг (синтез) (увеличение количества узлов);
- ▼ – пошаговый реинжиниринг (синтез) (уменьшение количества узлов).

После завершения автоматического формирования оптимального варианта реинжиниринга на экран выводится сообщение о завершении расчетов, полученная в результате решения топологическая структура СКММ, значение критерия.

Результаты реинжиниринга топологической структуры СКММ по критерию минимума дополнительных затрат в пошаговом режиме представлены в таблицах 5.5 – 5.6, а соответствующие им топологические структуры представлены на рисунках 5.15 – 5.19.

Таблица 5.5 – Результаты решения задачи в пошаговом режиме

Количество узлов $u$	Затраты, у.е.
1	650867.3
2	463561.5
3	392171.8
<b>4</b>	<b>376549.1</b>
5	384309.2

Рисунок 5.15 – Топологическая структура системы для  $u=1$

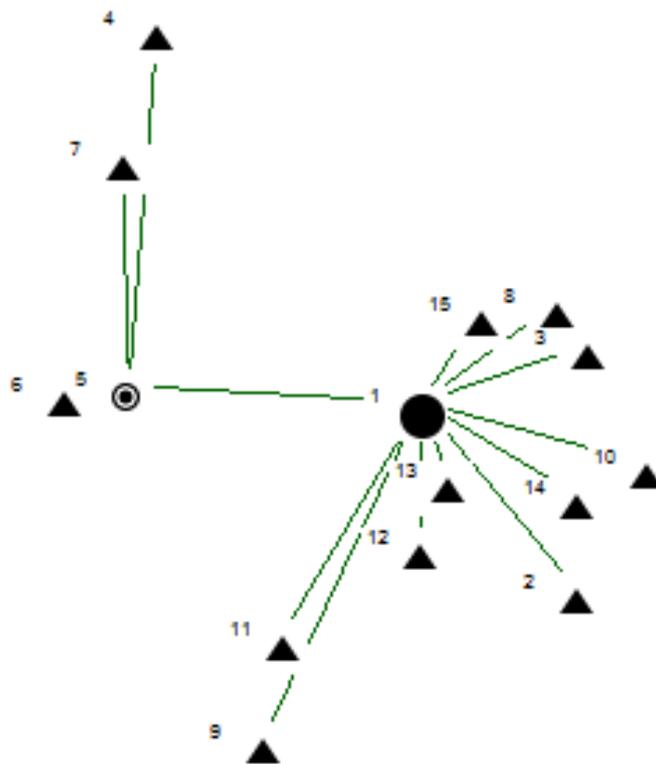


Рисунок 5.16 – Топологическая структура системы для  $u=2$

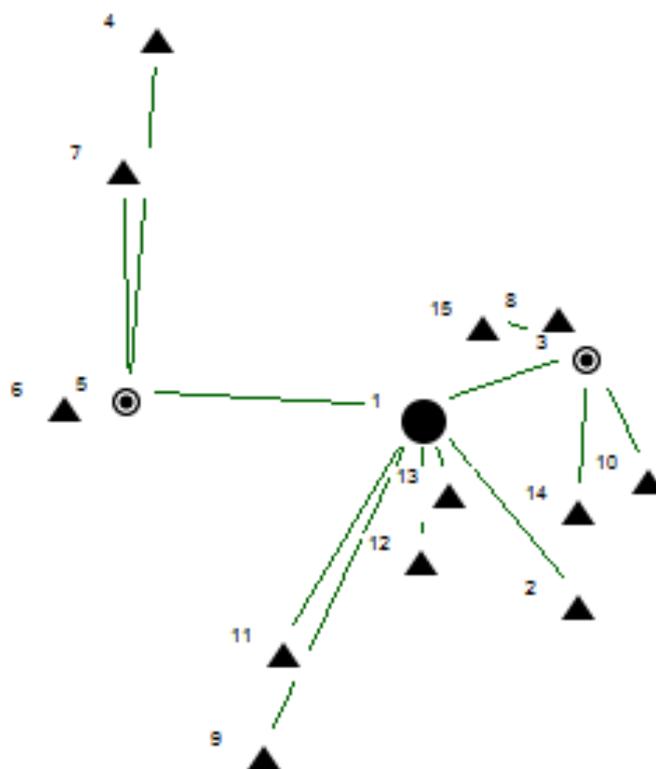


Рисунок 5.17 – Топологическая структура системы для  $u=3$

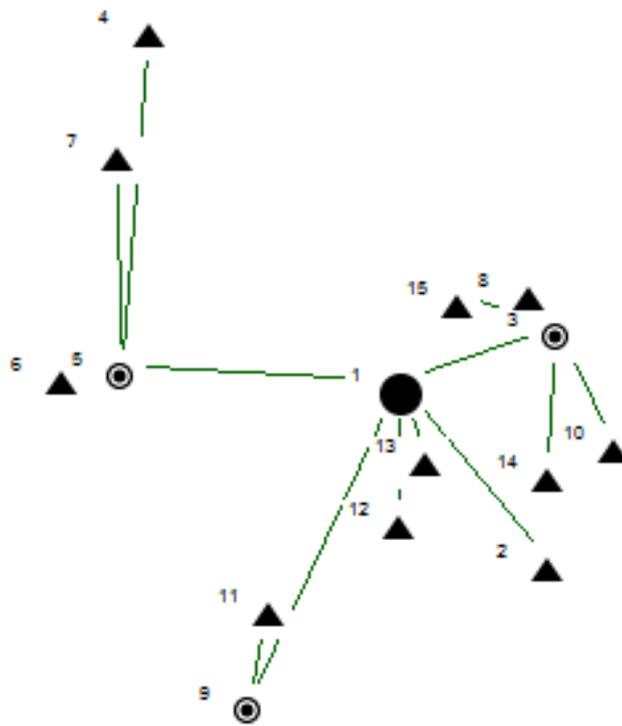


Рисунок 5.18 – Топологическая структура, полученная в результате оптимизации по критерию минимума затрат

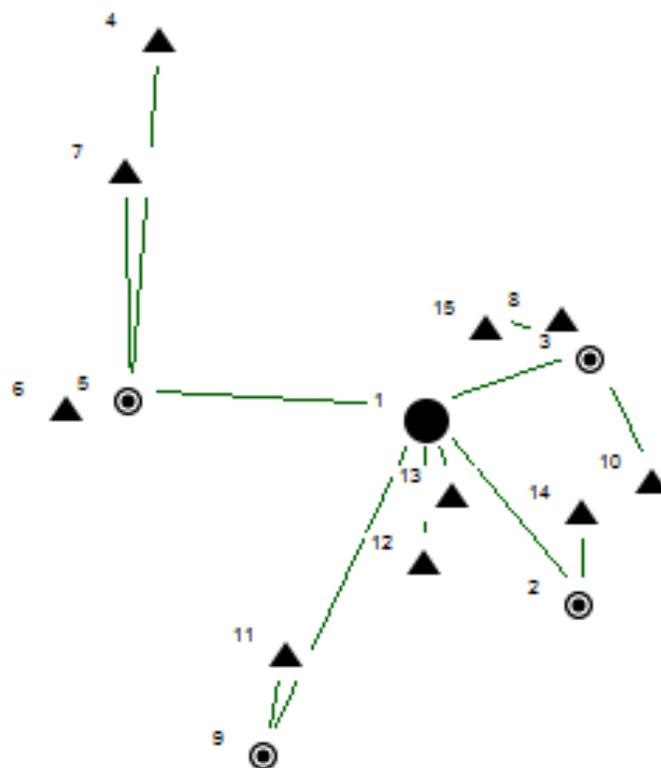


Рисунок 5.19 – Топологическая структура системы для  $u=5$

Таблица 5.6 – Характеристики решения задачи реинжиниринга по критерию минимума дополнительных затрат в автоматическом режиме

Критерий, у.е.	Количество элементов	Количество узлов	Время решения, с
376549.1	15	4	0.106

Для реинжиниринга топологической структуры СКММ по критерию оперативности (3.17) необходимо задать параметры критерия в соответствии с исходными данными задачи (табл. 5.7). Результаты решения задачи представлены в таблице 5.8, а графическое представление оптимальной топологической структуры системы мониторинга, полученной в процессе реинжиниринга – на рисунке 5.20.

Таблица 5.7 – Параметры элементов, узлов, центра и связей системы

Показатель	Значение
Время генерации запроса в центре, с	1.0
Объем запроса центр-узел, байт	1.0
Объем ответа от элемента, байт	30720.0
Скорость обработки запроса в узле, байт/с	102400.0
Скорость обработки ответа в элементе, байт/с	51200.0
Время получения информации в элементе, с	1.0
Пропускная способность канала узел-центр, байт /с	102400.0
Пропускная способность канала узел-элемент, байт/с	51200.0

Таблица 5.8 – Результаты решения задачи по критерию оперативности

Значение критерия, с	Количество элементов	Количество узлов	Время решения, с
2.6	15	1	0.152

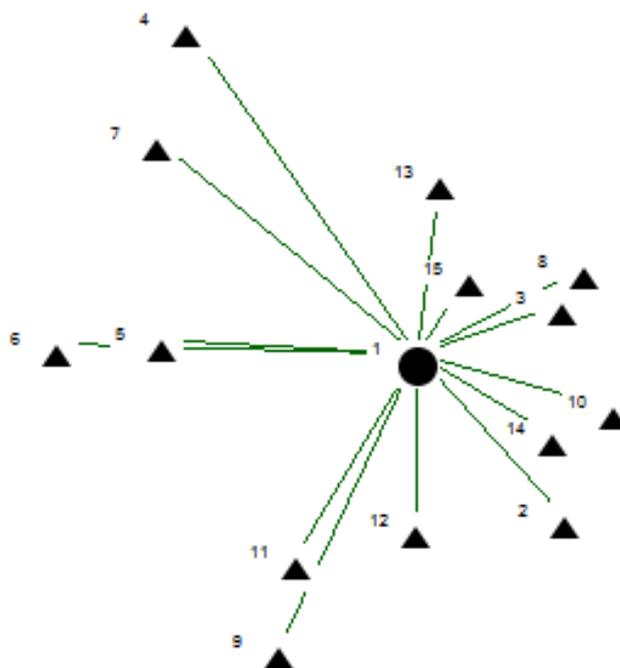


Рисунок 5.20 – Топологическая структура, полученная в результате оптимизации по критерию оперативности

Для реинжиниринга топологической структуры СКММ по критерию надежности (3.18) необходимо задать параметры критерия в соответствии с исходными данными задачи (табл. 5.9). Полученная топологическая структура представлена на рисунке 5.21, а соответствующие ей результаты решения – в таблице 5.10.

Таблица 5.9 – Показатели надежности элементов, узлов, центра и связей между ними в топологической структуре СКММ

Показатель	Значение
Коэффициент готовности центра	0.9999
Коэффициент готовности узлов	0.9998
Коэффициент готовности элементов	0.9998
Коэффициент готовности связи узел-центр	0.9997
Коэффициент готовности связи узел-элемент	0.9991

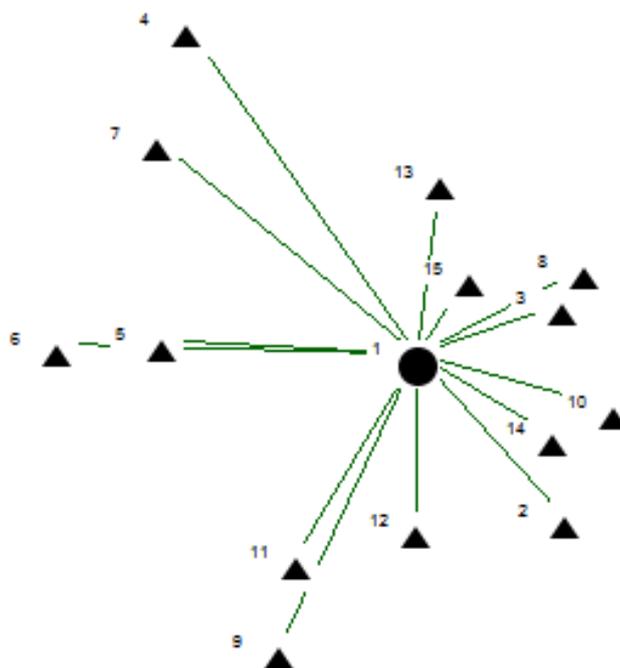


Рисунок 5.21 – Топологическая структура, полученная в результате оптимизации по критерию надежности

Таблица 5.10 – Результат решения задачи по критерию надежности

Значение критерия	Количество элементов	Количество узлов	Время решения, с
0.9846	15	1	0.037

Характеристики решения задачи реинжиниринга по критерию живучести приведены в таблице 5.11, а полученная топологическая структура системы представлена на рисунке 5.22.

Таблица 5.11 – Результаты решения задачи по критерию живучести

Значение критерия	Количество элементов	Количество узлов	Время решения, с
0.933	15	1	0.128

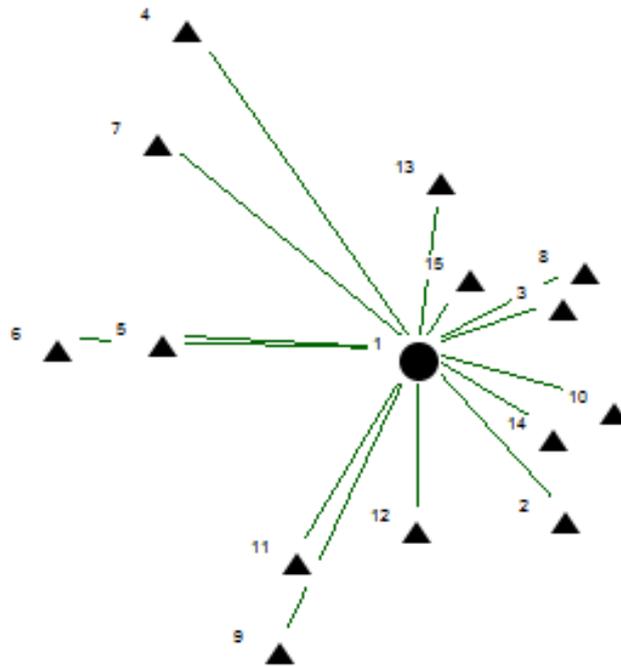


Рисунок 5. 22 – Топологическая структура, полученная в результате оптимизации по критерию живучести

Для решения задачи по множеству частных критериев кроме введенных ранее данных необходимо задать значения весовых коэффициентов частных критериев  $\lambda_i$ , где  $\lambda_i, i = \overline{1,4}$ .

Результаты решения многокритериальных задач для различных значений коэффициентов важности частных критериев затрат, оперативности, надежности и живучести представлены в таблице 5.12 и на рисунках 5.23, 5.24.

Таблица 5.12 – Характеристики многокритериальных решений

Коэффициенты важности частных критериев	Затраты, у.е.	Оперативность, с	Надежность	Живучесть
$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0.25$	545990.0	2.600	0.9846	0.93
$\lambda_1 = 0.55, \lambda_2 = 0.15,$ $\lambda_3 = 0.15, \lambda_4 = 0.15$	392171.8	8.002	0.9836	0.53

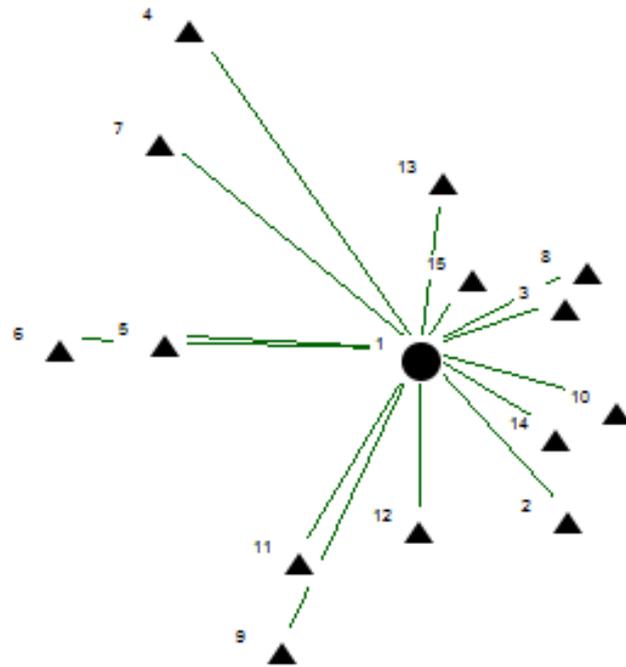


Рисунок 5. 23 – Топологическая структура, полученная в результате оптимизации по четырем частным критериям для  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0.25$

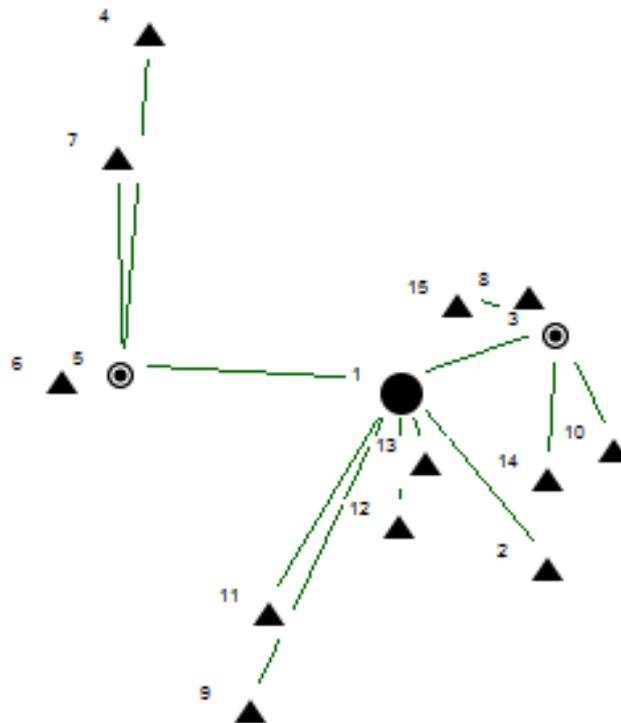


Рисунок 5. 24 – Топологическая структура, полученная в результате оптимизации по четырем критериям для  $\lambda_1 = 0.55, \lambda_2 = 0.15, \lambda_3 = 0.15, \lambda_4 = 0.15$

Из полученных результатов (табл. 5.12, рис. 5.23, 5.24) видно, что увеличение веса критерия затрат привело к уменьшению количества узлов в системе, к перераспределению элементов между узлами и, в конечном счете, к снижению размера затрат на реинжиниринг ее топологической структуры.

### 5.3 Реинжиниринг топологических структур в интерактивном режиме

Для учета знаний и опыта пользователей (проектировщиков) в разработанном ПМК *Reengineering-TS* реализован интерактивный режим его работы, предполагающий генерацию вариантов пользователем и их последовательную автоматическую оценку.

Ниже рассмотрен пример решения задачи реинжиниринга топологической структуры системы мониторинга с использованием ПМК *Reengineering-TS* в интерактивном режиме.

Объектом реинжиниринга является трехуровневая централизованная СКММ с радиально-узловой структурой.

Входными данными задачи являются:

– существующий вариант топологической структуры системы, задаваемый местами расположения элементов  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , узлов, центра (центр системы расположен на базе элемента  $i = 1$ ), а также связями между элементами, узлами и центром  $[s'_{ij}]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ;

– затраты на реинжиниринг компонентов топологической структуры системы.

Необходимо сформировать наилучший вариант топологической структуры СКММ  $s^0 \in S$  по показателю затрат.

Для формирования варианта реинжиниринга топологической структуры системы необходимо последовательно выполнить следующие операции.

1. Задать исходные параметры топологической структуры СКММ (загрузить из файла (рис. 5.4), сгенерировать с использованием генератора

случайных чисел (рис. 5.6) или заполнить форму в интерфейсе ввода исходных данных с клавиатуры, представленную на рисунке 5.7).

2. На панели «Режим» в группе кнопок «Режим» выбрать пункт «Интерактивный», в группе кнопок «Оптимизация» выбрать пункт «Реинжиниринг».

3. На панели «Критерий» выбрать необходимый критерий и задать его параметры (если необходимо).

4. Для каждого варианта решения изменять места расположения узлов и связи между элементами, узлами и центром. Для размещения узла на базе элемента необходимо выполнить нажатие левой клавиши манипулятора-мыши (для отмены выполнить то же действие). Для связи элемента с узлом или центром необходимо провести указатель мыши, нажав левую кнопку между необходимыми элементами. Соединить все элементы в необходимую топологическую структуру.

5. На панели инструментов выбрать:  – расчет оптимального варианта.

Исходные данные решаемой задачи представлены в таблицах 5.13 и 5.14;

Таблица 5.13 – Координаты мест размещения элементов существующей топологической структуры

Номер элемента	Координаты		Номер элемента	Координаты	
	X	Y		X	Y
1	184.213	187.053	9	242.105	241.777
2	187.656	324.136	10	210.531	99.5081
3	336.051	123.782	11	110.646	98.1259
4	116.135	325.878	12	164.212	312.236
5	337.592	307.255	13	237.057	272.128
6	144.853	273.715	14	268.11	285.369
7	147.975	337.877	15	87.233	318.959
8	218.549	127.831	–	–	–

Таблица 5.14 – Матрица связей элементов существующей топологической структуры

Элементы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1														
2	0	0													
3	0	0	0												
4	0	0	0	0											
5	0	0	0	0	0										
6	0	0	0	0	0	0									
7	0	0	0	0	0	0	0								
8	1	0	1	0	0	0	0	0							
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0					
11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0				
12	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1			
13	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1		
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Графически исходный вариант топологической структуры системы представлен на рисунке 5.25.

Характеристики полученного варианта реинжиниринга топологической структуры системы представлены в таблице 5.15. Топологическая структура СКММ после проведения реинжиниринга в интерактивном режиме пользователем представлена на рисунке 5.26.

Таблица 5.15 – Характеристики вариантов топологических структур системы мониторинга до и после проведения реинжиниринга

Топологическая структура	Оперативность, с	Надежность	Живучесть
Топологическая структура исходной системы	10.2	0.9831	0.53
Топологическая структура системы после проведения реинжиниринга	8.01	0.9836	0.6

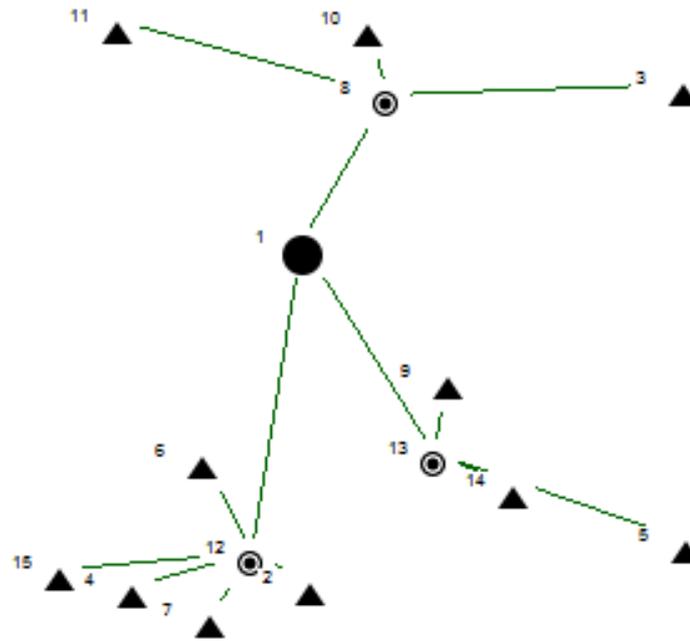


Рисунок 5. 25 – Исходная топологическая структура системы

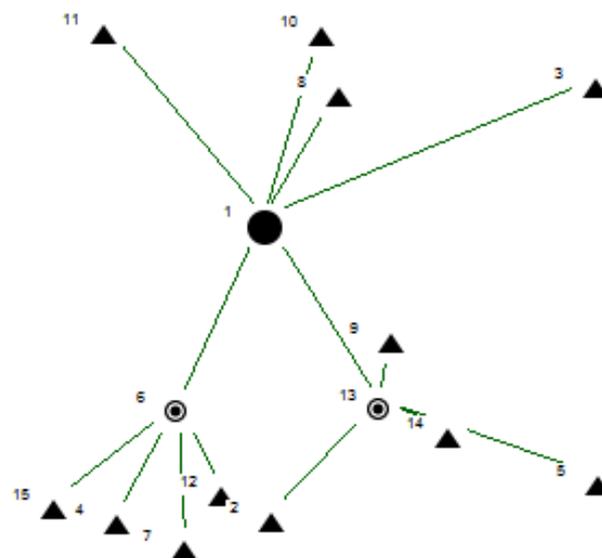


Рисунок 5.26 – Топологическая структура системы после проведения реинжиниринга

Затраты на проведение предложенного варианта реинжиниринга составляют 432812.4 у.е.

На практике рекомендуется чередовать автоматический и интерактивный режимы оптимизации топологических структур систем мониторинга, что позволит за счет использования знаний и опыта проектировщиков учитывать трудноформализуемые факторы.

#### Выводы по разделу 5

Для повышения качества получаемых проектных решений по реинжинирингу топологических структур систем крупномасштабного мониторинга, снижения времени проектирования был разработан программно-методический комплекс *Reengineering-TS*. Он составляет основу АРМ системы автоматизации проектных и исследовательских работ по реинжинирингу топологических структур систем мониторинга.

Программно-методический комплекс является *Windows*-приложением, реализован с использованием объектно-ориентированной методологии программирования, современных технологий программирования и проектирования программных систем, что обеспечивает его гибкость и масштабируемость.

В нем программно реализованы расчеты соотношений математических моделей реинжиниринга по показателям минимума затрат, оперативности, надежности и живучести. Для решения задач реинжиниринга запрограммированы методы направленного и усеченного перебора, использующие для оптимизации размещения узлов методы полного перебора, по координатной оптимизации, эволюционного синтеза на основе генетического алгоритма, имитации отжига, поиска с запретами и кластеризации.

Пользователям предоставляется возможность проведения реинжиниринга в интерактивном и автоматическом режимах, что позволяет учитывать знания и опыт проектировщиков.

Технология работы и возможности ПМК продемонстрированы на примерах решения задач реинжиниринга топологических структур систем мониторинга по критериям минимума дополнительных затрат, оперативности, надежности и живучести в автоматическом и интерактивном режимах.

Приведенные примеры решения задач реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга подтверждают работоспособность и эффективность разработанных математических моделей, методов, алгоритмов и программного обеспечения.

С помощью разработанного программно-методического комплекса получены экспериментальные результаты, представленные в работах [6, 7, 15, 16].

## ВЫВОДЫ

В диссертационной работе получено новое решение научно-технической задачи повышения эффективности средств автоматизации реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга путем разработки математических моделей, методов и программного обеспечения для решения задач структурного анализа и синтеза.

1. В работе выполнен анализ современного состояния проблемы оптимизации систем крупномасштабного мониторинга как территориально распределенных объектов, в результате которого установлено: топология таких систем во многом определяет их структурные, параметрические, технологические и стоимостные характеристики; с вычислительной точки зрения основную трудность составляют задачи оптимизации их структуры и топологии; в процессе их реинжиниринга целесообразно использовать интерактивные итерационные технологии оптимизации; для решения задач реинжиниринга необходима разработка множества методов, различающихся по показателям сложности и точности; выбор метода для решения конкретной задачи должен осуществляться исходя из ее размерности, требований по точности ее решения и характеристик используемых вычислительных средств.

2. На основе декомпозиции проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга получила дальнейшее развитие ее системологическая модель в части учета топологических особенностей проблемно связанных задач, что позволяет корректно формировать исходные данные задач в логических схемах процессов их оптимизации. На ее основе сформулирована постановка общей задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга по показателям затрат, оперативности, надежности и живучести.

3. Получила дальнейшее развитие путем формализации система частных критериев затрат (в направлении учета возможности модернизации и

повторного использования имеющегося оборудования), оперативности, надежности и живучести для задач реинжиниринга централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга с однотипными элементами и связями в виде явных зависимостей от переменных, описывающих их топологические структуры. Это позволяет производить одновременную оценку эффективности вариантов построения систем по множеству показателей и осуществлять многофакторный выбор эффективного варианта.

4. На основе предложенной формализации частных критериев впервые разработана математическая модель общей многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга по показателям затрат, оперативности, надежности и живучести, частными случаями которой являются математические модели задач по одному, двум или трем критериям. Ее использование позволит получать более эффективные проектные решения, учитывающие множество функционально-стоимостных характеристик и ограничений.

5. В рамках кардиналистического подхода получил дальнейшее развитие метод направленного перебора вариантов, позволяющий определять эффективные решения многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга, в части учета показателей оперативности, надежности и живучести. Его временная сложность на треть ниже, чем у базового метода, что позволяет с высокой точностью решать задачи большей размерности.

6. Разработаны модификации метода направленного перебора для решения задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга, использующие схемы размещения узлов на основе покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционного синтеза и кластеризации, имеющие

существенно меньшие временные сложности, чем комбинаторные методы; получены оценки их точности и временной сложности. Полученные оценки позволяют на основе информации об имеющихся вычислительных ресурсах и размерности задачи прогнозировать время и точность ее решения и, таким образом, производить выбор наиболее эффективного метода решения задачи.

7. Разработанные математические модели и методы решения задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга расширяют методологическую основу систем автоматизации проектирования, планирования развития и реинжиниринга территориально распределенных объектов различного назначения. Предложенный метод и его модификации реализованы в созданном программно-методическом комплексе *Reengineering-TS*. Они апробированы, показали свою работоспособность и эффективность на примерах решения тестовых задач реинжиниринга систем мониторинга по одному или множеству показателей.

8. Практическое значение результатов подтверждается их внедрением. Результаты диссертационной работы внедрены: в госбюджетные научно-исследовательские работы, выполняемые в рамках тематических планов научно-исследовательских работ Харьковского национального университета радиоэлектроники; в Главном центре специального контроля Государственного космического агентства Украины; в Украинском научно-исследовательском институте экологических проблем; в учебном процессе на кафедрах системотехники и технологии и автоматизации производства радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств Харьковского национального университета радиоэлектроники.

9. Практическое использование полученных результатов позволяет за счет выбора (исходя из имеющихся вычислительных ресурсов и размерности решаемой задачи) наиболее эффективного метода сократить затраты на реинжиниринг и максимизировать функциональные характеристики топологической структуры системы. Применение разработанных модификаций метода реинжиниринга топологических структур при решении серии

контрольных задач с количествами элементов от 15 до 40 позволило сократить время поиска решения на 79,95–99,99 % со средней погрешностью от 0,61 до 8,38 % в зависимости от размерности решаемой задачи.

10. Разработанные математические модели, методы и программное обеспечение без существенных изменений могут быть использованы при решении задач синтеза, планирования развития и реинжиниринга структур корпоративных информационно-вычислительных сетей, транспорта, связи, производства и сбыта продукции, управления, других территориально распределенных объектов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бескорвайный В. В. Разработка системологической модели проблемы структурно-топологического реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга / В. В. Бескорвайный, К. Е. Подоляка // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №3(75). – С. 37 – 42.
2. Бескорвайный В. В. Разработка модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В. В. Бескорвайный, К. Е. Подоляка // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №4(76). – С. 49 – 55.
3. Бескорвайный В. В. Формалізація часткових критеріїв ефективності проектів реінжинірингу систем великомасштабного моніторингу / В.В. Бескорвайний, К.Є. Подоляка // Моделювання процесів в економіці та управлінні проектами з використанням нових інформаційних технологій: монографія / за заг. ред. В.О. Тимофєєва, І.В. Чумаченко. – Х.: ХНУРЕ, 2015. – С. 181–190.
4. Beskorovainyi V. Reengineering the topological structure of large-scale monitoring systems / V. Beskorovainyi, K. Podoliaka // ECONTechMOD. – 2015. – Vol. 4 (3). – P. 13–18.
5. Бескорвайный В. В. Метод реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В. В. Бескорвайный, К. Е. Подоляка // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Т. 14. – № 3. – С. 204–209.
6. Бескорвайный В. В. Модификации метода направленного перебора для реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескорвайный, К.Е. Подоляка // Радиоэлектроника и информатика. – 2015. – № 3 (70). – С. 55–62.
7. Бескорвайный В. В. Выбор многокритериальных решений при реинжиниринге топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескорвайный, К.Е. Подоляка // Системи обробки інформації. – 2016. – № 5(142). – С. 80–86.

8. Бескорвайный В. В. Реинжиниринг распределённых баз данных в глобальных системах мониторинга / В. В. Бескорвайный, К. Е. Подоляка // Математичне моделювання та інформаційні технології: тези доп. XI Всеукраїнська науково-технічна конференція, 21 – 23 листопада 2012 р. – Одеса: ОДАХ, 2012. – С. 17.

9. Подоляка К. Е. Реинжиниринг структур систем глобального мониторинга / К. Е. Подоляка // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 18-й международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 14 – 16 апреля 2014 г.: сборник материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2014. – С. 13–15.

10. Подоляка К. Е. Проблема реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / К. Е. Подоляка // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 19-й международный молодежный форум «радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 20 – 22 апреля 2015 г.: сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – С. 88–89.

11. Подоляка К. Е. Формализация метазадачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / К. Е. Подоляка // Праці студентської наукової конференції фізико-технічного факультету Донецького національного університету: зб. наук. праць. – Вінниця: ДонНУ, 2015. – С. 65.

12. Бескорвайный В. В. Системологическая модель проблемы реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга / В. В. Бескорвайный, К. Е. Подоляка // XIII Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии в экономике и управлении предприятиями, программами и проектами», Одесса, 14 – 18 сентября 2015 г. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2015. – С. 15–16.

13. Beskorovainyi V. V Mathematical model of multicriteria optimization for project of reengineering large-scale monitoring systems / V. V Beskorovainyi,

К. Е. Podoliaka // Международная научно-практическая конференция «Математическое моделирование процессов в экономике и управлении проектами и программами (ММП-2015)», Коблево, 14 – 20 сентября 2015 г. Труды. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – С. 17–21.

14. Бескорвайный В. В. Математическая модель для проектов реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга / В. В. Бескорвайный, К. Е. Подоляка // Управление проектами: состояние и перспективы: тез. докладов. XI Международная научно-практическая конференция, Харьков, 15–18 сентября 2015 г. – Николаев: НУК. – С. 11 – 13

15. Бескорвайный В.В. Формирование множества эффективных вариантов реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга / В.В. Бескорвайный, К.Е. Подоляка // Информационные системы и технологии: тез. докладов. 4-я Международная научно-техническая конференция, Харьков, 21-27 сентября 2015 г. – Х.: НТМТ – С. 36–37.

16. Подоляка К. Е. Метод реинжиниринга топологической структуры систем крупномасштабного мониторинга / К. Е Подоляка // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 20-й международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков, 19 – 21 апреля 2016 г.: сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2016. – С. 122–123.

17. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление / [Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Бобронников В. Т. и др.]; под ред. В. В. Малышева. – М.: МАИ, 2000. – 568 с.

18. Западня К.О. Обоснование и выбор системы космического мониторинга территориально распределенной производственной системы / К. О. Западня // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 2. – С. 145–148.

19. Греков Л. Д. Геораспределенные производственные системы. Часть 2. Размещение на земной поверхности, оптимизация магистральных систем, космический мониторинг / Л. Д. Греков, В. М. Илюшко, О. Е. Федорович. – К.: Издательство Сергея Пантюка, 2014. – 206 с.

20. Мединцев С. Ю. Системы мониторинга лесных ресурсов: состояние и пути развития / С. Ю. Мединцев, А.А. Орехов, Д.А. Кочкарь // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – № 6. – С. 70–74.

21. Кочкарь Д. А. Проектирование инфраструктуры наземной системы мониторинга лесных пожаров / Д. А. Кочкарь, А. В. Порубянский, А. А. Орехов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – № 6. – С.197–201.

22. Кочкарь Д. А. Оптимальное размещение вышек наблюдения наземных систем видео-мониторинга лесных пожаров / Д. А. Кочкарь, С. Ю. Мединцев, А. А. Орехов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2010. – № 7. – С.311–314.

23. Шестопалов И. П., Харин Е. П. О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // *Сборник докладов III международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений»*. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. – 2004. – С. 16–21.

24. Старостенко В.І. Розвиток сейсмологічної мережі на території України для цілей сейсмічного захисту / В.І. Старостенко, О.В. Кендзера, Ю.В. Лісовий, Ю.В. Семенова // *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*. – 2011. – № 19. – С. 144–150.

25. Барбашев С. В. АСКРО АЭС и система раннего предупреждения о радиационных авариях / С. В. Барбашев, В. И. Витько, Г. Д. Коваленко // *Ядерна енергетика та довкілля*. – 2015. – № 1. – С. 11-21.

26. Структура и организация радиационного мониторинга на территории Украины / [Васильченко В. В., Витько В. И., Коваленко Г. Д., Рудя К. Г.]. – Х.: Украинский научный центр охраны вод, 1996. – 31с.

27. Барбашев С.В. Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки: принципы построения и методы реализации / С.В. Барбашев, Б. С. Пристер // *Ядерна та радіаційна безпека*. – 2013. – № 1. – С. 41–47.

28. Барбашев С. В. Радиационный мониторинг в Украине: состояние, проблемы и пути решения [монография] / С.В. Барбашев, В.И. Витько,

Г.Д. Коваленко; под ред. д-ра техн. наук С. В. Барбашева. — Одесса: Астропринт, 2011. — 80 с.

29. Нефедов Л.И. Модель планирования оценки контролируемых показателей в территориально-распределенной системе мониторинга транспорта газа / Л. И. Нефедов, М. В. Шевченко, О. В. Васильченко // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». — 2009. — № 43. — С. 120–125».

30. Потрясаев С. А. Содержательное и формальное описание проблемы структурно-функционального синтеза и управления развитием информационной системы наземно-космического мониторинга / С. А. Потрясаев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов // Труды СПИИРАН. — 2013. — № 28(0). — С. 82–106.

31. Melles S. J. Optimizing the spatial pattern of networks for monitoring radioactive releases / G. B. Heuvelink, C. J. Twenhöfel, A. Van Dijk, P. H. Baume, U. Stöhlker // Computers & Geosciences. — 2011, № 43(3). — P. 280–288.

32. Доронина Ю. В. Реинжиниринг мониторинговых информационных систем циклического типа / Ю. В. Доронина // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 1 (2). — С. 12–14.

33. Трегубов А. М. Особенности проектирования систем мониторинга и управления энергосбережением / А. М. Трегубов, С. П. Ковалёв // Вестник Новосибирского государственного университета. — 2012.— № 10(3). — С. 80–91.

34. Water quality monitoring network design / [N. B. Harmanciogammalu, N. B. Fistikoglu, O. Ozkul and other]; ed. N. B. Harmanciogammalu. — Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1999. — 290 p.

35. Ahmed M. Remote monitoring with hierarchical network architectures for large-scale wind power farms / M. Ahmed // Journal of Electrical Engineering & Technology. — 2015. — № 10(3). — P. 1319–1327.

36. Hu J. Topology optimization for urban traffic sensor network / J. Hu, J. Song, M. Zhang, X. Kang // Tsinghua Science & Technology. — 2008. — № 13(2). — P. 229–236.

37. Абрамов Ю. А. Аэрокосмический мониторинг / Абрамов Ю. А., Тютюник В. В., Шевченко Р. И. – Х: Изд-во АГЗУ, 2006 . – 172 с.
38. Хаммер М. Реинжиниринг корпорации: манифест революции в бизнесе / М. Хаммер, Д. Чампи; пер. с англ. – СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 1997. – 332 с.
39. Davenport T.H. Process Innovation: Reengineering Work Through Information Technology / T.H. Davenport. – Boston: Harvard Business School Press, 1993. – 352 p.
40. Morris D. Reengineering Your Business / D. Morris, J. Brandon. – London: McGraw Hill, 1993. – 247 p.
41. Manganelli R. The Reengineering Handbook: A Step-By-Step Guide to Business Transformation / R. Manganelli, M. Klein. – New York: Amacom, 1996. – 318 p.
42. Hess T. State of the Art des Business Process Redesign: Darstellung und Vergleich Bestehender Methoden / T. Hess, L. Brecht; Wiesbaden: Springer. – Verlag, 2013. – 117 p.
43. A Reengineering Process Framework / [Bergey J., W. Hefley, W. Lamia, D. Smith] . – Pittsburgh: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University. – 1995. – 13p.
44. Comella-Dorda S. A survey of legacy system modernization approaches / S. Comella-Dorda, K. Wallnau, R. C. Seacord, J. Robert // Carnegie-Mellon univ pittsburgh pa Software engineering inst. – 2000. – № CMU/SEI-2000-TN-003.– P.1–17.
45. Балашов Е. П. Эволюционный синтез систем / Е. П. Балашов. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
46. Ахтырченко К. В. Методы и технологии реинжиниринга ИС / К. В. Ахтырченко, Т. П. Сорокваша // Труды Института системного программирования. – 2003. – № 4. – С. – 116–128.
47. Цвиркун А. Д. Управление развитием крупномасштабных систем в новых условиях / А. Д. Цвиркун // Проблемы управления. – 2003. – № 1. – С. –

34–43.

48. Цвиркун А. Д. Основы синтеза структуры сложных систем / Цвиркун А. Д. – М.: Наука, 1982. – 200 с.

49. Цвиркун А.Д. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем / А. Д. Цвиркун, В. К. Акинфиев. – М.: Наука, 1993. – 157 с.

50. Social modeling for requirements engineering / [Yu E., Giorgini P., Maiden N., Mylopoulos J.]. – London: The MIT Press, 2011. – 717 p.

51. Греков Л.Д. Архитектурные решения в реинжиниринге управляющих систем территориально-распределенных компаний / Л.Д. Греков, К.О. Западня, Е.В. Коновалова // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 1. – С. 109–112.

52. Нефедов Л.И. Структурная модель информационной технологии автоматизированного синтеза системы управления качеством добычи, переработки и транспорта газа / Л.И. Нефедов, М.В. Шевченко, О.Н. Кудырко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2014. – №1(10). – С. 289–296.

53. Петров В.В. Основные направления создания автоматизированных систем мониторинга воздушного, наземного и надводного пространства в реальном времени / В.В. Петров, В. И. Кожевниченко, А. Н. Буточнов, Е. М. Науменко, В. Б. Осташевский // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – № 12(2). – С. 151–164.

54. Бескорвайный В. В. Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных систем / В. В. Бескорвайный // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2002. – № 120. – С. 29–37.

55. Odom K. R. Assessment and Redesign of the Synoptic water quality monitoring network in the Great Smoky Mountains National Park: Ph.D. Dissertation: 08.2003 / Odom K. R. – Knoxville, 2003. – 268 p.

56. Бескорвайный В. В. Метод структурно-топологической оптимизации для реинжиниринга территориально распределенных объектов /

В. В. Бескорвайный // Системи обробки інформації. – 2004. – № 4. – С. 26–33.

57. Зайченко Е. Ю. Инструментальный комплекс алгоритмов и программ оптимального проектирования сетей с технологией MPLS / Е. Ю. Зайченко, Ю. П. Зайченко, А. Н. Лавринчук // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2010. – № 52. – С. 64–70.

58. Зайченко Е. Ю. Нахождение максимального потока и анализ показателей живучести сети при отказах / Е. Ю. Зайченко, Ю. П. Зайченко // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 6. – С. 102–113.

59. Нефедов Л. И. Модель структурно-топологического синтеза системы мониторинга качества добычи газа / Л. И. Нефедов, М. В. Шевченко, О. Н. Кудырко // Науковий журнал «ScienceRise». – 2014. – №2(2). – С. 61–67.

60. Dell’Olmo P. A multiperiod maximal covering location model for the optimal location of intersection safety cameras on an urban traffic network / P. Dell’Olmo, N. Ricciardi, A. Sgalambro // Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2014. – № 108. – P. 106–117.

61. Астраков С. Н. Построение эффективных моделей покрытия при мониторинге протяженных объектов / С. Н. Астраков, А. И. Ерзин // Вычислительные технологии. – 2012. – № 17(1). – С. 26–34.

62. Антонова Г. М. Разработка автоматизированной региональной системы аэрокосмического мониторинга / Г. М. Антонова, В. А. Бовкун // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 8. – С. 166–173.

63. Stützle T. G. Local search algorithms for combinatorial problems: analysis, improvements, and new applications / T. G. Stützle. – Sankt Augustin: Infix, 1999. – 203 p.

64. Бескорвайный В.В. Эвристическая процедура для методов оптимизации топологии систем с радиально-узловыми структурами / В. В. Бескорвайный, Е. В. Соболева // Системи обробки інформації. – 2008. – № 7. – С. 22–27.

65. Dianfeng L. Multiobjective Network Optimization for Soil Monitoring of the Loess Hilly Region in China / L. Dianfeng, L. Yaolin, W. Mingze, Z. Xiang //

Discrete Dynamics in Nature and Society. – 2014. – № 17. – 11p.

66. Harris P. Geographically weighted methods and their use in network re-designs for environmental monitoring / P. Harris, A. Clarke, S. Juggins, C. Brunson, M. Charlton // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. – 2014. – № 28(7) . – P. 1869–1887.

67. Christodoulos A. Recent Advances in Global Optimization / A. Christodoulos, M. Pardalos. – Princeton: Princeton University Press, 2014. – 648 p.

68. Han L. Z. Optimal placement of sensors for monitoring systems on suspension bridges using genetic algorithms / L. Z. Han, J. Q. Zhang, Y. Yang // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – № 530. – P. 320–331.

69. Wang K. Optimization of air pollutant monitoring stations with constraints using genetic algorithm / K. Wang, H. Zhao, Y. Ding, T. Li, L. Hou, F. Sun // Journal of High Speed Networks. – 2015. – № 21(2). – P. 141–153.

70. Kolda T. G. Optimization by direct search: New perspectives on some classical and modern methods / T. G. Kolda, R. M. Lewis, V. Torczon // SIAM review . – 2003. – № 45(3). – P. 385–482.

71. Бескоровайный В. В. Модификация метода направленного перебора для оптимизации топологии систем с регулярным распределением элементов / В. В. Бескоровайный, Е. В. Соболева // Системи обробки інформації. – 2013. – № 1. – С. 12–16.

72. Pasandideh S. H. R. Genetic application in a facility location problem with random demand within queuing framework / S. H. R. Pasandideh, S. T. A. Niaki // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2012. – № 23(3). – P. 651–659.

73. Zhang Z. Multi-satellite control resource scheduling based on ant colony optimization // Z. Zhang, N. Zhang, Z. Feng // Expert Systems with Applications. – 2014. – № 41 (6). – P. 2816–2823.

74. Hentenryck P. V. Constraint-based local search / P. V. Hentenryck, L. Michel. – London: The MIT Press, 2009. – 448 p.

75. Lourenço H. R. Iterated local search / H. R. Lourenço, O. C. Martin,

T. Stützle. – Massachusetts: Springer US, 2003. – 448 p.

76. Kramer O. Iterated Local Search. In A Brief Introduction to Continuous / O. Kramer // Springer International Publishing . – 2014. – № 1. – P. 45–54.

77. Hansen P. Variable neighborhood search: Principles and applications / P. Hansen, N. Mladenović // European journal of operational research. – 2001. – № 130(3). – P. 449–467.

78. Toksarı M. D. Solving the unconstrained optimization problem by a variable neighborhood search / M. D. Toksarı, E. Güner // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 2007.– № 328(2). – P. 1178–1187.

79. Бескоровайный В.В. Алгоритмы оптимизации топологии ИВС на множестве радиально-узловых структур / В.В. Бескоровайный, З.А. Имангулова // Радиоэлектроника и информатика. – 2000. – № 2. – С. 100–104.

80. Бескоровайный В. В. Метод предварительной оценки стоимости территориально распределенных объектов / В. В. Бескоровайный // Радиоэлектроника и информатика. – 2003. – № 2. – С. 104–107.

81. Бескоровайный В. В. Оптимизация количества и местоположения распределительных центров транспортно-складской системы / В. В. Бескоровайный, З. А. Имангулова, А. И. Петрова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3 (59). – С. 24–28.

82. Kanungo T. An Efficient k-Means Clustering Algorithm: Analysis and Implementation / T. Kanungo, D. N Mount, N. S. Netanyahu, C. D. Piatko, R. Silvermann, A.Y. Wu // Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2002. – № 24(7). – P. 881–892.

83. Xu R. Survey of clustering algorithms / R. Xu, D. Wunsch // IEEE Trans Neural Netw. – 2005. – № 16(3). – P. 645–678.

84. Xu Y. Fast Scalable k-means++ Algorithm with MapReduce / Y. Xu, W. Qu, Z. Li, Y. Wu // Springer International Publishing. – 2014. – № 1. – P. 15–28.

85. Martí R. Multi-start methods for combinatorial optimization / R. Martí, M. G. C. Resende, C. C. Ribeiro // European Journal of Operational Research. – 2013. – T. 226, № 1. – P. 1–8.

86. Osman I.H. *Meta-Heuristics: Theory & Applications* / I.H. Osman, J.P. Kelly. – Massachusetts: Springer US, 1996. – 690 p.
87. Glover F. A. *Handbook of metaheuristics* / F. A. Glover, G. A. Kochenberger. – Massachusetts: Springer Science & Business Media, 2010. – 648 p.
88. Ли К. *Основы САПР(CAD/CAM/CAE)* / К. Ли. – СПб: Питер, 2004. – 560 с.
89. Скворцов А. В. *Технология построения и анализа топологических структур для ГИС и САПР* / А. В. Скворцов, Д. С. Сарычев // *Вестник Томского государственного университета*. – 2002. – № 275. – Р. 60–63.
90. Бескоровайный В. В. *Оценка времени доступа к информационным ресурсам распределенных баз данных при решении задач синтеза их физических структур* / В. В. Бескоровайный, О. С. Ульянова // *Системы управління, навігації та зв'язку*. – 2010. – № 3(15). – С. 210–214.
91. Балашова Т. И. *Повышение надежности и отказоустойчивости сети передачи данных динамической перестройкой ее топологии* / Т. И. Балашова // *Системы управления и информационные технологии*. – 2015. – Т.61, №3. – С. 52–55.
92. Chakrabarti A. *Reliability constrained routing in QoS networks* / A. Chakrabarti, G. Manimaran // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2005. – № 13(3). – С. 662– 675.
93. Chawathe Y. *RMX: Reliable multicast for heterogeneous networks* / Y. Chawathe, S. McCanne, E. Brewer // *Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*. – 2000. – № 2. – Р. 795– 804.
94. O'Connor P. *Practical reliability engineering* / P. O'Connor, A. Kleyner. – Chichester : John Wiley & Sons, 2011. – 512 p.
95. Акимова Г. П. *Методология оценки надежности иерархических информационных систем* / Г. П. Акимова, А. В. Соловьев // *Труды ИСА РАН*. – 2006. – № 23. – С. 18–47.

96. Gertsbakh I. B. Models of network reliability: analysis, combinatorics, and Monte Carlo / I. B. Gertsbakh, Y. Shpungin.– Chicago: CRC Press, 2009. – 217 p.

97. Levinson D. Network Reliability in Practice: Selected Papers from the Fourth International Symposium on Transportation Network Reliability / Levinson D., Liu H. X., Bell M.– Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2011. – 268 p.

98. Beichelt F. Reliability and maintenance: networks and systems / F. Beichelt, P. Tittmann.– Chicago: CRC Press, 2009. – 344 p.

99. Фишберн П. Теория полезности // Исследование операций: В 2 т. Т.1: Методологические основы и математические методы / Под ред. Дж. Моудера, С.Элмаграби: пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – С. 448 – 480.

100. Бескорвайный В. В. Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных объектов / В. В. Бескорвайный // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – №. 3. – С. 94 – 96.

101. Овезгельдыев О. А. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации / О.А. Овезгельдыев, Э. Г. Петров, К. Э. Петров. – К.: Наукова думка, 2002. – 161 с.

102. Бескорвайный В. В. Идентификация частной полезности многофакторных альтернатив с помощью S-образных функций / В. В. Бескорвайный, Е. В. Соболева // Бионика интеллекта. – 2010. – №. 1(72) – С. 50 – 54.

103. Петров Э. Г. Формирование функций полезности частных критериев в задачах многокритериального оценивания / Э. Г. Петров, В.В. Бескорвайный, В.П. Пискалова // Радиоэлектроника и информатика. – 1997. – №. 1. – С. 71 – 73.

104. Петров Э. Г. Алгоритм топологической оптимизации централизованных сетей передачи данных / Э. Г. Петров, А. Б. Болотов, С. В. Шабанов // Механизация и автоматизация управления. – 1980. – № 4. – С. 50 – 55.

105. Петров Э. Г. Алгоритм структурно–топологической оптимизации централизованных сетевых систем / Э. Г. Петров, А. Б. Болотов, В. В. Бескорвайный // Механизация и автоматизация управления. – 1986. – № 1. – С. 28 – 31.

106. Петров Э. Г. Территориально распределенные системы обслуживания / Э. Г. Петров, Пискалкова В. П., Бескорвайный В. В. – К.: Техника, 1992. – 208 с.

107. Eglese R. W. Simulated annealing: a tool for operational research / R. W. Eglese // European journal of operational research. – 1990. – Т. 46, №. 3. – P. 271–281.

108. Du D. Z. Handbook of combinatorial optimization / D. Z. Du, P. M. Pardalos. – New York: Springer Science & Business Media, 2013. – 3409 p.

109. Mahapatra R. P. Comparative Analysis of Nearest Neighbor Query Processing Techniques / R. P. Mahapatra, P. S. Chakraborty // Procedia Computer Science.– 2015. – №. 57. – P. 1289–1298.

110. Napala M. Review: Kd – tree Traversal Algorithms for Ray Tracing / M. Napala, V. Havran // Computer Graphics Forum.– 2011. – №. 30(1). – P. 199–213.

111. Beasley J. E. A genetic algorithm for the set covering problem / J. E. Beasley, P. C. Chu // European Journal of Operational Research. –1996. – № 96 (2). – P. 392–404.

112. Likas A. The global k-means clustering algorithm / A. Likas, N. Vlassis, J. J. Verbeek // Pattern recognition. – 2003. – Т. 36, №. 2. – P. 451–461.

113. Чеботарева Д. В. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи / Д. В. Чеботарева, В. М. Безрук. – Х.: Компания СМИТ. – 2013. –148 с.

114. Модели и методы управления устойчивым развитием социально-экономических систем: монография / Е.В. Губаренко, А.О. Овезгельдыев, Э.Г. Петров; под. общ. ред. Э.Г. Петрова. – Херсон: Гринь Д.С., 2013. – 252 с.

115. Методы и модели принятия решений в условиях

многокритериальности и неопределенности: монография / Э.Г. Петров, Н.А. Брынза, Л.В. Колесник, О.А. Писклакова; под. общ. ред. Э.Г. Петрова. – Херсон: Гринь Д.С., 2014. – 192 с.

116. Введение в нормативную теорию принятия решений. Методы и модели: монография / В.В. Крючковский, Э.Г. Петров, Н.А. Соколова, В.Е. Ходаков; под. общ. ред. Э.Г. Петрова. – Херсон: Гринь Д.С., 2013. – 284 с.

117. Xu L. Introduction to multi-criteria decision making and the evidential reasoning approach / L. Xu, J.B. Yangn // Manchester School of Management, 2001. – P. 163-187.

118. Hwang C.L. Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey / C.L. Hwang, K. Yoon. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2012. – 270 p.

119. Саати Т. Теория принятия решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

120. Stroustrup B. Programming: Principles and Practice Using C++ / B. Stroustrup . – [3d edition]. – Upper Saddle River: Addison-Wesley Professional, 2014. – 1278 p.

121. Meyers S. Effective STL: 50 Specific Ways to Improve Your Use of the Standard Template Library / S. Meyers. – Boston: Pearson Education, 2014. – 279 p.

122. McConnell S. Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction / S. McConnell. – [2nd edition]. – Redmond: Microsoft Press, 2004. – 914 p.

123. McLaughlin B. Head First Object-Oriented Analysis and Design. A Brain Friendly Guide to OOA&D / B. McLaughlin, G. Pollice, D. West. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2006. – 636 p.

124. Object-Oriented Analysis and Design with Applications / [G. Booch, R. Maksimchuk, M. Engle & other.]; edited by G. Booch.– [3rd edition]. – Boston: Addison-Wesley Professional, 2007. – 691 p.

125. Zeigler B. P. Object-oriented simulation with hierarchical, modular models: intelligent agents and endomorphic systems / B. P. Zeigler. – San Diego:

Academic press, 2014. – 414 p.

126. Pattern-Oriented Software Architecture, Patterns for Concurrent and Networked Objects / [C.D. Schmidt, M. Stal, H. Rohnert, F. Buschmann]; edited by C.D. Schmidt.– Chichester: John Wiley & Sons, 2013. – 450 p.

127. Soman S. A. Computational methods for large sparse power systems analysis: an object oriented approach / S. A. Soman, S. A. Khaparde, S. Pandit. – Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2012. – 335 p.

128. Bernus P. Handbook on architectures of information systems / P. Bernus, K. Mertins, G. J. Schmidt. – Dordrecht :Springer Science & Business Media, 2013. – 834 p.

129. Professional Application Lifecycle Management with Visual Studio 2013 / [M. Gousset, M. Hinshelwood, B.A. Randell & other]; edited by M. Gousset. – Indianapolis: John Wiley & Sons, 2014. – 696 p.

130. Larman C. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development / C. Larman.– [3rd edition]. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. – 736 p.

131. Dennis A. Systems analysis and design: An object-oriented approach with UML / A. Dennis, B.H. Wixom, D. Tegarden.– [5th edition]. – Chichester: John Wiley & Sons, 2015. – 544 p.

132. Booch G. The Unified Modeling Language: Users Guide / G.Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson.– [2nd edition]. – Upper Saddle River: Addison-Wesley Professional, 2005. – 496 p.

## Приложение А

Акты внедрения результатов диссертационной работы

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Перший проректор Харківського  
національного університету  
радіоелектроніки



проф. Ключник І.І.

2016 р.

### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук молодшого наукового співробітника кафедри системотехніки Подоляки К.Є. «Математичні моделі та методи реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу» у держбюджетних науково-дослідних роботах, що виконуються згідно з тематичним планом Харківського національного університету радіоелектроніки, що фінансуються за рахунок Міністерства освіти і науки України

Ми, що нижче підписалися, заступник начальника наукового інформаційно-аналітичного відділу Хоменко Н.Ю., директор центру інформатизації органів управління Пісклакова В.П., завідувач кафедри системотехніки Гребеннік І.В., науковий керівник здобувача, професор кафедри системотехніки Безкоровайний В.В., склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Подоляки К.Є. упроваджені у держбюджетні науково-дослідні роботи за темами № 254 «Розробка моделей, методів та інструментальних засобів структурно-топологічної і параметричної оптимізації територіально розподілених систем», розділ 2 «Структурний синтез територіально розподілених об'єктів в умовах неповної визначеності даних» (№ ДР 0111U002624) та № 293 «Розробка методології і математичних моделей соціально-економічних систем при реалізації концепції їх стійкого розвитку», розділ 3 «Розробка математичних моделей і методів реінжинірингу топологічних структур територіально розподілених об'єктів» (№ ДР 0115U001522).

Здобувач брала участь у виконанні робіт за вказаними темами як виконавець. Нею були розроблені математичні моделі, методи та програмне забезпечення для підтримки прийняття рішень при реінжиніринзі топологічних структур систем великомасштабного моніторингу за множиною функціонально-вартісних показників.

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

Отримані здобувачем результати включені до звітів із названих науково-дослідних робіт, а створений Подолякою К.Є. програмно-методичний комплекс «Система автоматизації проектувальних і дослідницьких робіт з реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу» внесено до переліку найважливіших розробок Харківського національного університету радіоелектроніки.

Практичне застосування отриманих результатів дозволить скоротити обчислювальні витрати на розв'язання задач реінжинірингу, витрати на реалізацію топологічних структур об'єктів та покращити їх функціональні характеристики.

Заступник начальника наукового  
інформаційно-аналітичного відділу

Хоменко Н.Ю.

Директор центру  
інформатизації органів управління,  
к.т.н., доц.

Пісклакова В.П.

Завідувач кафедри  
системотехніки, д.т.н., проф.

Гребеннік І.В.

Професор кафедри системотехніки,  
д.т.н., проф.

Безкоровайний В.В.

Згідно з оригіналом  
Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Начальник Головного центру  
спеціального контролю

Толчонов І.В.  
2016 р.



### АКТ

#### про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Подольки Ксенії Євгенівни

Комісія у складі заступника начальника Головного центру (начальника центру застосування засобів спеціального контролю та науково-дослідної випробувальної роботи) Шапка В.М., завідувача автоматизованого пункту сейсмічного контролю №5 «Харків», к.т.н., доц. Кошеля А.В., начальника відділу науково-дослідного, випробувального Головного центру спеціального контролю, к.ф.-м.н. Лящука О.І., наукового керівника здобувача, професора кафедри системотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки Безкоровайного В.В. виконала перевірку і склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Подольки К.Є. «Математичні моделі і методи реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу», а саме:

– запропонована формалізація часткових критеріїв витрат (з урахуванням можливості модернізації і повторного використання наявного обладнання), оперативності, надійності та живучості для задач реінжинірингу централізованих трирівневих систем великомасштабного моніторингу у вигляді явних залежностей від змінних, що описують їх топологічні структури;

– математичні моделі багатокритеріальної задачі реінжинірингу топологічних структур централізованих трирівневих систем великомасштабного моніторингу за показниками витрат, оперативності, надійності і живучості;

– метод спрямованого перебору варіантів, що дозволяє визначати ефективні рішення задачі реінжинірингу топологічних структур централізованих трирівневих систем великомасштабного моніторингу, в

Згідно з оригіналом  
Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

частині обліку показників витрат, оперативності, надійності і живучості використані у Головному центрі спеціального контролю Державного космічного агентства України для розв'язання перспективних задач реінжинірингу та планування розвитку мережі пунктів сейсмічного контролю.

Використання розроблених моделей і методів дозволяє підвищити обґрунтованість проектних рішень, скоротити витрати на розвиток мережі пунктів контролю.

Акт складено для подання до спеціалізованої вченої ради, він не є підставою для фінансових розрахунків.

**Голова комісії**

Заступник начальника Головного центру  
(начальник центру застосування засобів  
спеціального контролю та науково-дослідної  
випробувальної роботи)



Шапка В.М.

**Члени комісії:**

Завідувач автоматизованого пункту  
сейсмічного контролю №5 «Харків»,  
к.т.н., доц.



Кошель А.В.

Начальник відділу науково-дослідного,  
Випробувального Головного центру  
спеціального контролю  
к.ф.-м.н.



Лящук О.І.

Професор кафедри системотехніки  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки,  
д.т.н., проф.



Безкоровайний В.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

заступник директора з наукової роботи та моніторингу наукових досліджень, д.т.н.

\_\_\_\_\_ О.О. Дмитрієва

" 18 " \_\_\_\_\_ 2016 р.



### АКТ

**про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Подоляки Ксенії Євгенівни**

Комісія у складі провідного наукового співробітника, к.т.н., с.н.с. Варламова Є.М., провідного наукового співробітника, к.т.н., с.н.с. Квасова В.А., наукового керівника здобувача, професора кафедри системотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки Безкорвайного В.В. виконала перевірку і склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Подоляки К.Є. «Математичні моделі і методи реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу», в частині синтезу систем моніторингу навколишнього природного середовища з урахуванням їх оптимізації за критеріями: витрат, оперативності, надійності і живучості використовуються при виконанні в НДУ «УКРНДІЕП» роботи за темою «Розроблення проекту рекомендацій щодо розподілення територій України на зони та агломерації та порядку їх перегляду згідно з вимогами Директиви 2008/50/ЕС» для розв'язання задач розробки структури управління якістю атмосферного повітря.

Акт складено для подання до спеціалізованої вченої ради, він не є підставою для фінансових розрахунків.

**Голова комісії**

Провідний науковий співробітник,  
к.т.н., с.н.с.

Варламов Є.М.

**Члени комісії:**

Провідний науковий співробітник,  
к.т.н., с.н.с.

Квасов В.А.

Професор кафедри системотехніки  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки,  
д.т.н., проф.

Безкорвайний В.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор Харківського  
національного університету  
радіоелектроніки



проф. Ключник І.І.

«                    » 2016 р.

**АКТ**

про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук молодшого наукового співробітника кафедри системотехніки Подоляки К.Є. «Математичні моделі і методи реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу» у навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки

Комісія у складі начальника навчального відділу Свид І.В., завідувача кафедри системотехніки проф. Гребенніка І.В., наукового керівника здобувача, професора кафедри системотехніки Безкоровайного В.В. виконала перевірку і склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Подоляки К.Є. впроваджені у навчальний процес на кафедрі системотехніки.

Математична модель, модифікація методу спрямованого перебору та розроблене програмне забезпечення для розв'язання задачі реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу за критерієм витрат використовуються у лабораторному практикумі з дисципліни «Технології проектування і реінжинірингу великомасштабних об'єктів» для магістрантів спеціальностей 8.05010102 – інформаційні технології проектування та 8.05010103 – системне проектування.

Вони включені до складу «Методичних вказівок до лабораторних робіт із дисципліни «Технології проектування і реінжинірингу великомасштабних об'єктів» для магістрантів спеціальності 8.05010102 – інформаційні технології проектування / Уклад. В.В.Безкоровайний, З.А.Імангулова, К.Є.Подоляка – Харків: ХНУРЕ, 2015. – 44 с.

Начальник навчального відділу

Свид І.В.

Завідувач кафедри  
системотехніки, д.т.н., проф.

Гребеннік І.В.

Професор кафедри системотехніки,  
д.т.н., проф.

Безкоровайний В.В.

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор Харківського  
національного університету  
радіоелектроніки

проф. Ключник І.І.

2016 р.



**АКТ**

про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук молодшого наукового співробітника кафедри системотехніки Подоляки К.Є. «Математичні моделі і методи реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу» у навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки

Комісія у складі начальника навчального відділу Свид І.В., завідувача кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів (ТАВР) проф. Невлюдова І.Ш., наукового керівника здобувача, професора кафедри ТАВР (за сумісництвом) Безкоровайного В.В. виконала перевірку і склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Подоляки К.Є. впроваджені у навчальний процес на кафедрі ТАВР.

Модифікація методу спрямованого перебору на базі генетичного алгоритму реалізована у розробленому програмному забезпеченні для лабораторної роботи «Оптимізація топологічної структури» лабораторного практикуму з дисципліни «Основи теорії еволюційного моделювання» для магістрантів спеціальності 8.05020102 – комп'ютеризовані та робототехнічні системи.

Начальник навчального відділу

Свид І.В.

Завідувач кафедри ТАВР,  
д.т.н., проф.

Невлюдов І.Ш.

Професор кафедри ТАВР,  
д.т.н., проф.

Безкоровайний В.В.

Згідно з оригіналом  
Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник