

На правах рукописи



КОЧЕГАРОВ Максим Викторович

**ВАРИАТИВНАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМ МОНИТОРИНГА
СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ
АППАРАТА СЦЕНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность: 2.3.5. Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и
компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Кравец Олег Яковлевич**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Ковалев Игорь Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск), профессор кафедры информатики

Орлов Сергей Павлович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет", профессор кафедры "Информатика и вычислительная техника"

Ведущая организация: **АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева» (г. Москва)**

Защита состоится «23» мая 2025 года в 12 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский просп., д. 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «28» марта 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гусев Константин Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сложные и разнообразные программные системы требуют постоянного мониторинга, так как их поведение часто проявляется в процессе выполнения, например, во взаимодействии с другими программами или окружающей средой. Методы мониторинга программного обеспечения направлены на проверку характеристик или качественных свойств программ во время их функционирования. Эти методы были разработаны в различных сообществах с учетом различных программ и целей. Например, мониторинг требований оценивает соответствие программной системы своим требованиям в процессе работы, в то время как мониторинг ресурсов или производительности собирает информацию об использовании вычислительных ресурсов контролируемой системой. Большой вклад в разработку методов мониторинга программного обеспечения внесли Андреев А.Н., Басов В.А., Ершов А.Б., Заболотный И.Г., Ковалев И.В., Кузнецов В.Е., Baresi L., Bellavista P., Eichelberger H., Mansouri-Samani M., Robinson W.N.

Одной из актуальных предметных областей задач мониторинга программного обеспечения являются интегрированные энергетические системы (IES), отличающиеся гетерогенностью входящих в их состав компонент. Соответственно, объединение мультиэнергетических систем и внедрение возобновляемых источников энергии значительно увеличат сложность и неопределенность функционирования системы. Такая ситуация создает серьезные проблемы для оптимального функционирования IES. При традиционном планировании энергосистем сценарное моделирование является важным методом учета неопределенных факторов. Аналогичные методы могут быть использованы для решения проблем, связанных с неопределенностями в источниках и нагрузках IES, таких как колебания мощности возобновляемых источников энергии и ошибки прогнозирования для нескольких нагрузок. Кроме того, распределенное хранение массивных данных и обработка данных между разнородными базами стали неизбежной тенденцией в задачах мониторинга. Благодаря интеграции различных данных и аппаратных устройств в различных базах данных формируется гетерогенная система баз данных, которая логически унифицирована и физически независима

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования продиктована необходимостью разработки вариативной архитектуры систем мониторинга программного обеспечения на основе сценарного моделирования и оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга.

Тематика диссертационной работы соответствует научному направлению ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» «Вычислительные комплексы и проблемно-ориентированные системы управления».

Целью работы является разработка вариативной архитектуры систем мониторинга программного обеспечения на основе сценарного моделирования и оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ проблем проектирования архитектур систем мониторинга программного обеспечения и управления запросами для массивных гетерогенных баз данных мониторинга.

2. Создать обобщенную ситуационную модель предметной области мониторинга программного обеспечения, обеспечивающую возможность редукции требований в зависимости от категории объекта и задач мониторинга.

3. Предложить вариативную архитектуру систем мониторинга программного обеспечения, описывающую ключевые компоненты и уровни программных решений на основе UML, обеспечивающую создание многокомпонентных архитектур для новых предметных областей.

4. Разработать алгоритм оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга на основе машинного обучения, обеспечивающий сокращение времени исполнения запросов и заданный баланс между эффективностью запроса и точностью.

5. Разработать алгоритм редукции множества сценариев для задачи сценарного моделирования системы управления мониторингом программного обеспечения, обеспечивающий рациональное множество групп сценариев операций и соответствующие вероятности сценариев.

6. Создать стохастическую модель оптимального функционирования программных систем мониторинга распределенных энергетических систем, обеспечивающую повышение средней мощности энергопотребления вместе с энергоэффективностью системы.

7. Разработать структуру программного обеспечения, реализующего механизмы встраивания процессов принятия решений в проектирование систем мониторинга специального программного обеспечения.

Объект исследования: процессы синтеза структур программных систем мониторинга распределенных гетерогенных объектов.

Предмет исследования: структура математического и программного обеспечения процессов управления мониторингом программных систем на основе ситуационной модели предметной области и вариативной архитектуры системы мониторинга.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертации задач использовались методы теории вероятностей, теории принятия решений, а также методы объектно-ориентированного программирования.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.5 «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»: п.3 «Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, языки и программные инструменты организации взаимодействия программ и программных систем»; п. 4. «Интеллектуальные системы машинного обучения, управления базами данных и знаний, инструментальные средства разработки цифровых продуктов».

Научная новизна работы. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- обобщенная ситуационная модель предметной области мониторинга программного обеспечения, отличающаяся мультивходовой структурой описания и обеспечивающая возможность редукции требований в зависимости от категории объекта и задачи мониторинга;

- вариативная архитектура системы мониторинга программного обеспечения, описывающая ключевые компоненты и уровни программных решений на основе UML, отличающаяся расширенным диапазоном вариативности и обеспечивающая создание многокомпонентных архитектур для новых предметных областей;

- алгоритм оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга на основе машинного обучения, отличающийся преобразованием на основе запроса глобального словаря данных в динамический словарь данных и обеспечивающий сокращение времени исполнения запросов и заданный баланс между эффективностью запроса и точностью;

- итерационный алгоритм редукции множества сценариев, отличающийся использованием кластеризации на основе K-средних и обеспечивающий рациональное множество групп сценариев операций и соответствующие вероятности сценариев;

- стохастическая модель оптимального функционирования программных систем мониторинга распределенных энергетических систем, отличающаяся динамическим переходом к детерминированной оптимизации при различных сценариях эксплуатации на основе метода сценарного анализа и обеспечивающая в конечном итоге повышение допустимой средней мощности энергопотребления вместе с энергоэффективностью системы.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в разработке вариативной архитектуры систем мониторинга программного обеспечения на основе сценарного моделирования и оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга.

Теоретические результаты работы могут быть использованы в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся проектированием программных систем распределенного мониторинга с гетерогенными базами данных с разнородными запросами.

Положения, выносимые на защиту

1. Обобщенная ситуационная модель предметной области мониторинга программного обеспечения обеспечивает возможность редукции требований в зависимости от категории объекта и задачи мониторинга.

2. Вариативная архитектура систем мониторинга программного обеспечения обеспечивает создание многокомпонентных архитектур для новых предметных областей.

3. Алгоритм оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга на основе машинного обучения обеспечивает сокращение времени исполнения запросов и заданный баланс между эффективностью запроса и точностью.

4. Алгоритм редукции множества сценариев для задачи сценарного моделирования системы управления мониторингом программного обеспечения

порождает рациональное множество групп сценариев операций и соответствующие вероятности сценариев.

5. Стохастическая модель оптимального функционирования программных систем мониторинга распределенных энергетических систем обеспечивает повышение допустимой средней мощности энергопотребления вместе с энергоэффективностью системы.

Результаты внедрения. Основные результаты внедрены в ООО М-Сервис (г. Воронеж) при проектировании систем мониторинга программных систем, в учебный процесс Воронежского государственного технического университета в рамках дисциплин: «Вычислительные машины, системы и сети», «Информационные сети и телекоммуникационные технологии», а также в рамках курсового и дипломного проектирования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: НТК студентов и молодых ученых «Вычислительные машины, автоматика и робототехника» (Воронеж, 2007, 2008); Региональной НТК «Автоматизация и роботизация технологических процессов» (Воронеж, 2008-2010, 2012); XXIX-th International Open Science Conference «Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2024'AS)» (Yelm, WA, USA, 2024), VII Международной НПК «Наука и технологии: перспективы развития и применения» (Петрозаводск, 2024), а также на научных семинарах кафедры автоматизированных и вычислительных систем ВГТУ (2023-2025 гг.).

Достоверность результатов обусловлена корректным использованием теоретических методов исследования и подтверждена результатами сравнительного анализа данных вычислительных и натурных экспериментов.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 13 научных работ, в том числе 7 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (из них одно – в журнале WoS и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ). В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [9] - обобщенная ситуационная модель предметной области мониторинга программного обеспечения, обеспечивающая возможность редукции требований в зависимости от категории объекта и задач мониторинга; [6, 11] - вариативная архитектура систем мониторинга программного обеспечения, описывающая ключевые компоненты и уровни программных решений на основе UML; [1, 5] - алгоритм редукции множества сценариев для задачи сценарного моделирования системы управления мониторингом программного обеспечения, обеспечивающий рациональное множество групп сценариев операций и соответствующие вероятности сценариев; [3] - стохастическая модель оптимального функционирования программных систем мониторинга распределенных энергетических систем, обеспечивающая повышение средней мощности энергопотребления вместе с энергоэффективностью системы; [2] - алгоритм оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга на основе машинного обучения, обеспечивающий сокращение

времени исполнения запросов и заданный баланс между эффективностью запроса и точностью; [4] - информационное и программное обеспечение для экспериментальной оценки качества разработанных методов и алгоритмов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 193 наименований. Работа изложена на 157 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы его цель и задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации и внедрении работы.



Рис. 1. Дизайн исследования

В первой главе исследуются особенности разработки вариативной архитектуры систем мониторинга программного обеспечения на основе сце-

нарного моделирования и оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга. Отмечено, что повысить эффективность такой разработки можно путем применения обобщенной ситуационной модели предметной области мониторинга программного обеспечения, вариативной архитектуры систем мониторинга программного обеспечения как инструмента разработки, сценарного моделирования системы управления мониторингом программного обеспечения, создания алгоритмов управления запросами к массивным гетерогенным данным системы мониторинга на основе машинного обучения. Результат анализа потребовал формализации данных задач, а также алгоритмизации их решения с учетом особенностей, отраженных на рис. 1. Сформулирована цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке ситуационной модели предметной области мониторинга программного обеспечения.

Структура обобщенной ситуационной модели предметной области мониторинга программного обеспечения, отличающейся мультивходовой структурой описания и обеспечивающей возможность редукции требований в зависимости от категории объекта и задачи мониторинга, представлена в табл. 1 и на рис. 2 и, детализация входов доступна в табл. 2.1-2.5 диссертации.

Модель предметной области собирает информацию о следующих сущностях: архитектурный стиль отслеживаемой системы (ARC); степень интрузивности подхода (ITR); исходные данные подхода (INP); выходные данные подхода (OUT); инструментальная поддержка подхода (TSU); степень вариативности подхода (VAR); валидация подхода (VAL); доступность инструментов подхода (AVT).

Таблица 1

Структура обобщенной ситуационной модели предметной области мониторинга программного обеспечения

Модель предметной области программных систем мониторинга (1/5): поддержка жизненного цикла и определение области применения	
Цель (PUR)	какова цель подхода к мониторингу?
Элемент модели предметной области (ID)	Определение/пример
Поддержка жизненного цикла (LCS)	каким этапам разработки отслеживаемой системы способствует использование подхода к мониторингу
Поддерживаемые этапы (SPH)	этапы процесса мониторинга, поддерживаемые подходом
Модель предметной области (2/5): сбор информации о мониторинге, агрегирование, фильтрация/проверка	
• Сбор информации мониторинга (COL)	как собирать информацию мониторинга, такую как события или данные о событиях? Включает процесс инструментирования
* Генерация зонда (ZG)	как пишутся зонды (например, запись на языке программирования по сравнению с декларативным определением+генерацией)
* Когда собирается информация о мониторинге (TC)	

* Когда происходит фильтрация/проверка (TFI)	
Модель предметной области (3/5): определение ограничений/условий и обоснование	
* Как определяются условия/ограничения (CCD)	
* Триггер (TRI)	как запускается оценка условий/ограничений
* Язык (LNG)	как определяются условия/ограничения
* Рассуждения (RES)	какой механизм используется для проверки условий/ограничений
* Где происходит фильтрация/проверка (LFI)	где запускается механизм рассуждения (логически)
Модель предметной области (4/5): информация о сборе данных, контекст приложения, целевой язык	
Собранная информация (CIN)	какая (типы) информация собирается с помощью подхода
* Объекты/данные	элементы данных, связанные с событиями, например, значения датчиков, параметры
Контекст приложений (ACO)	категории поддерживаемых мониторируемых систем
Целевой язык (TLA)	языки отслеживаемых систем, которые можно отслеживать
Модель предметной области (5/5): целевая платформа, архитектурный стиль, интрузивность, входные данные, выходные данные, поддержка инструментов, вариативность, валидация, доступность	
Целевая платформа (TPL)	системы, которые можно инструментировать/отслеживать
Архитектурный стиль контролируемой системы (ARC)	какой тип архитектуры является целью подхода к мониторингу?
Интрузивность (ITR)	влияние решения для мониторинга на контролируемую систему (потенциальные накладные расходы на производительность)
Входные данные (INP)	что является основой для применения решения мониторинга к системе, например, спецификации требований, соглашения об уровне обслуживания, модели и т.д.
Выходные данные (OUT)	каковы выходные данные решения для мониторинга, например, нарушения, информация о состоянии системы и т.д.
Инструментальная поддержка (TSU)	интерфейс для пользователя решения для мониторинга, например, инструмент конечного пользователя или инструмент командной строки
Изменчивость (VAR)	(повторная) настройка решения для мониторинга помимо первоначальной настройки и конфигурирования
Валидация (VAL)	оценка решения для мониторинга, например, на примерах, эмпирическая, формальная и т.д.
Доступность любых инструментов (AVT)	доступны ли какие-либо инструменты для загрузки? Как они предоставляются? Поддерживаются ли они по-прежнему?

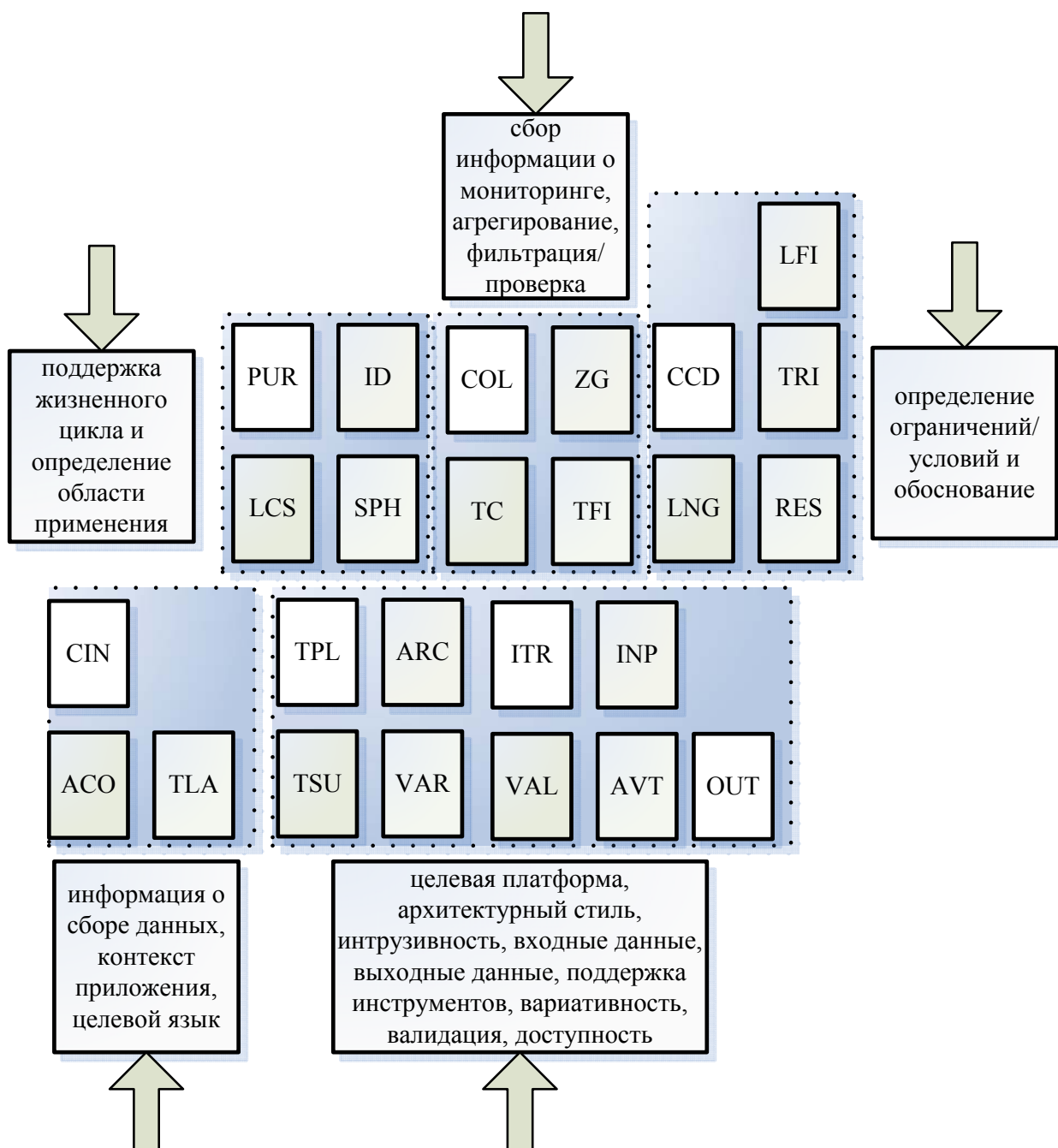


Рис. 2. Обобщенная ситуационная модель предметной области мониторинга программного обеспечения

Таким образом, представлена обобщенная ситуационная модель предметной области мониторинга программного обеспечения, отличающаяся мультивходовой структурой описания и обеспечивающая возможность редукции требований в зависимости от категории объекта и задачи мониторинга.

Третья глава посвящена исследованию и разработке вариативной архитектуры системы мониторинга программного обеспечения, описывающая ключевые компоненты и уровни программных решений на основе UML, отличающаяся расширенным диапазоном вариативности.

Основываясь на выводах и идеях, полученных в ходе разработки и

оценки модели предметной области, разработана вариативная архитектура для решений мониторинга программного обеспечения. Цель состоит в том, чтобы показать, что различные подходы к мониторингу демонстрируют значительное концептуальное совпадение, даже несмотря на то, что эта область настолько разнообразна, что ни одна отдельная функция не является частью каждой системы мониторинга. Таким образом, представляем вариативную архитектуру, поддерживающую концептуальное определение новых архитектур. Существующие архитектуры весьма разнообразны с точки зрения поддерживаемой функциональности. Следовательно, в предлагаемой архитектуре единственным общим компонентом является определение мониторинга. И даже для этого область реализации варьируется в зависимости от других частей архитектуры. Все остальные компоненты являются опциональными. Вариативная архитектура призвана дать обзор возможностей и строительных блоков инструментов мониторинга, а также взаимодействий между их частями. Для описания архитектуры используем UML (Unified Modeling Language). Архитектуре присущ большой диапазон вариативности. Поскольку UML не предоставляет конкретных механизмов описания изменчивости и поскольку мы не хотели перегружать графическое представление архитектуры, будем описывать аспекты изменчивости текстуально. Вариативная архитектура (рис. 3) может быть лучше всего понята в терминах трех компонентов: левый компонент описывает установку мониторинга. Средний компонент предназначен для выполнения мониторинга и состоит из нескольких уровней. Наконец, правый компонент содержит вспомогательные функции, например, для сохранения отслеживаемой информации.

Основная часть вариативной архитектуры мониторинга представлена вторым компонентом, который отвечает за выполнение фактического мониторинга. Он состоит из трех уровней: самый нижний уровень (уровень сбора мониторинговой информации) отвечает за сбор информации. Средний слой (слой распределения и обработки) отвечает за транспортировку и анализ информации. Верхний уровень (прикладной уровень) содержит функции визуализации и/или другие специфические для приложения возможности, которые часто рассматриваются как выходящие за рамки основного подхода к мониторингу. Зонды являются источником для любого типа сбора информации, и они существуют во многих различных видах и аспектах.

Агрегирование может потребоваться для преобразования информации в адекватную форму либо потому, что передача всей информации для дальнейшей обработки повлияет на производительность системы мониторинга/мониторинга, либо потому, что требуемая пропускная способность превысит (физические) ограничения на обработку и транспортировку. Например, можно узнать, сколько памяти используется во время определенного вызова (метода), включая все зависимые вызовы. Единственный способ избежать чрезмерных накладных расходов - это собрать все отдельные выделения памяти до завершения вызова и выполнить раннюю агрегацию, чтобы сложить их. Компонент фильтрации отвечает за выполнение отбора данных.

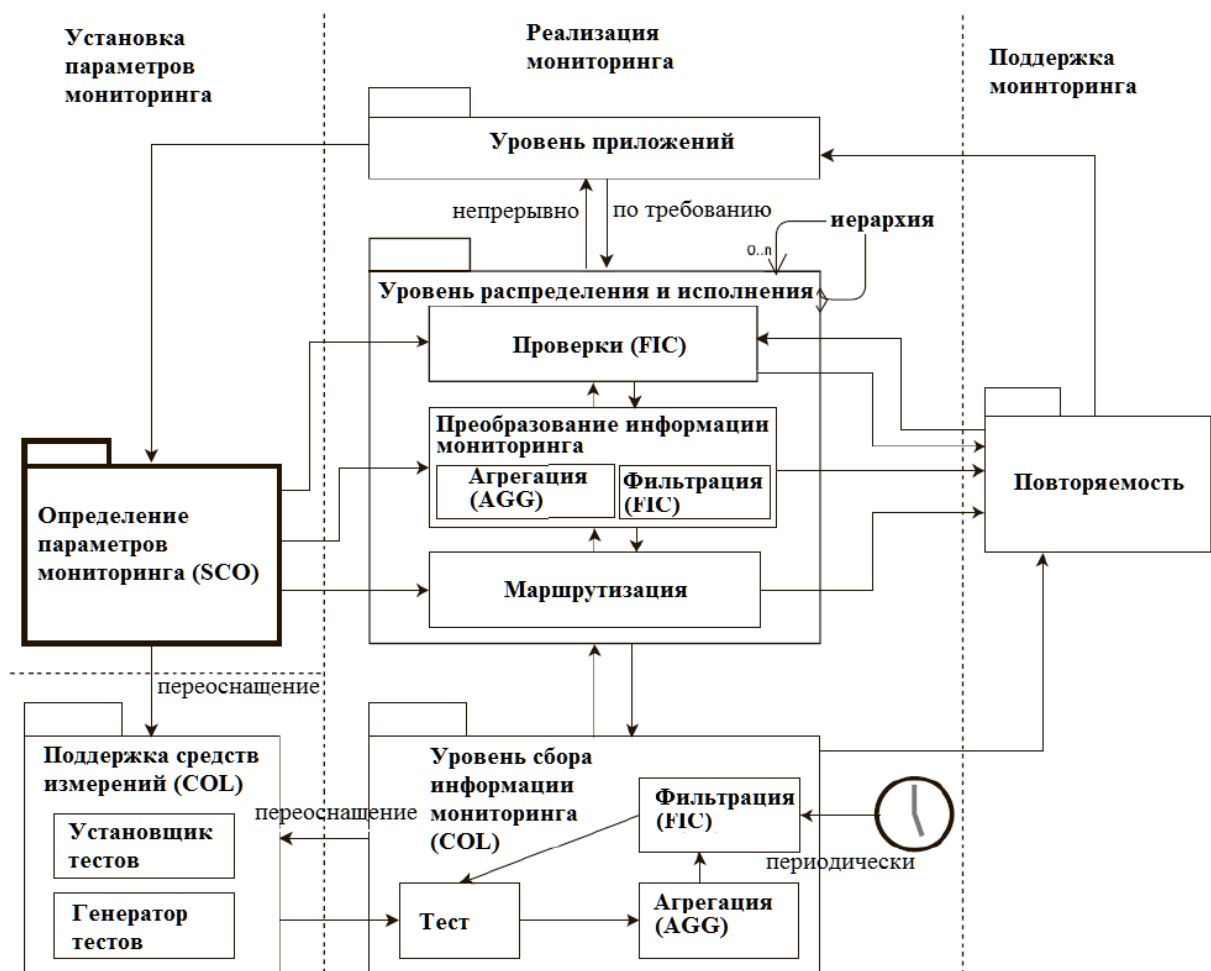


Рис. 3. Вариативная архитектура систем мониторинга - структура программного обеспечения, реализующего механизмы встраивания процессов принятия решений в проектирование систем мониторинга специального программного обеспечения

Фильтрация может происходить одним из двух способов: либо путем отбрасывания всей информации, которая на самом деле не требуется, либо путем сбора информации только тогда, когда она необходима в первую очередь. Последнее иллюстрируется обратной связью между фильтрацией и зондами на уровне сбора мониторинговой информации. Как описано в модели предметной области, сбор информации может происходить периодически, непрерывно или по требованию. В случае периодического сбора информация передается компонентом фильтра в определенные временные моменты, проиллюстрированные значком часов на рис. 3 при непрерывном сборе информации фильтрация не происходит, так как вся полученная информация просто передается дальше, как только она становится доступной. Наконец, сбор по требованию представлен стрелкой вниз, которая входит в слой сбора информации. В этом случае фильтрующий компонент передает информацию сразу после получения запроса. Вариативная архитектура обеспечивает два уровня фильтрации: в рамках сбора информации, что означает, что информация может быть отброшена на этапе сбора и во время анализа, который может произойти на другом узле сети.

В диссертации представлены результаты проектирования архитектуры

системы мониторинга на основе разработанной вариативной архитектуры для систем мониторинга SPASS-meter (с интеграцией EASy-Producer и без нее, как это используется в решении QualiMaster), ReMinds, ECoWare и Kieker.

Таким образом, предложена эталонная архитектура систем мониторинга программного обеспечения, описывающая ключевые компоненты и уровни программных решений на основе UML, обеспечивающая создание многокомпонентных архитектур для новых предметных областей.

В главе 4 проанализированы особенности математического и программного обеспечения подсистем мониторинга интегрированных энергетических систем как основы стохастической оптимизации и прогнозирования на основе сценарного моделирования.

Обработка запросов в БД, напрямую влияет на эффективность работы системы. Обработка запросов к массивной гетерогенной базе данных мониторинга более сложна. Запрос в глобальном режиме должен быть разбит на фрагменты запросов, которые могут выполняться на каждом сайте. После того, как соответствующие операции с этими фрагментами запроса будут выполнены на сайте, результаты должны быть возвращены в режим глобального запроса и обобщены результаты выполнения всех фрагментов в качестве окончательного вывода системы.

Для достижения требуемого пользователями эффекта процесс исполнения запроса в гетерогенной системе баз массивной данных обычно делится на четыре уровня структуры: декомпозиция запроса, локализация данных, глобальная оптимизация и локальная оптимизация, как показано на рис. 6.

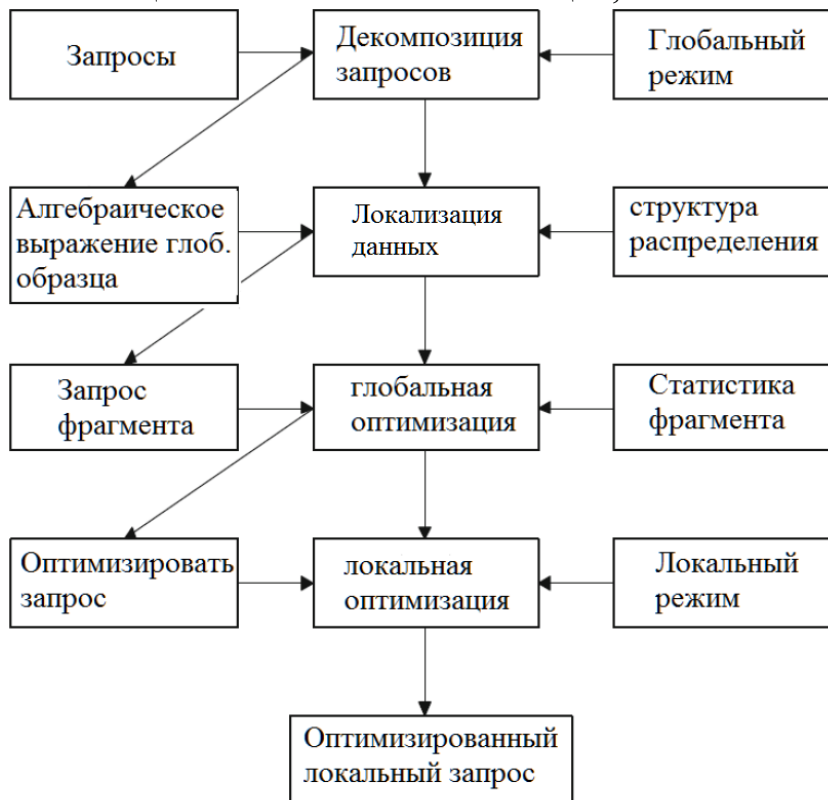


Рис. 6. Иерархия структур

Наиболее важной проблемой при обработке запросов является иерархия. Иерархия запросов относится к разложению запросов MySQL на наборы подзапросов на основе режима оболочки. В системе интеграции нескольких данных пользовательский запрос записывает инструкцию запроса. Для декомпозиции запроса необходимо преобразовать запрос MySQL в соответствии с конкретной ситуацией. На основе результатов иерархического разделения массивных разнородных данных мониторинга по запросам, эти данные классифицируются, и результаты классификации используются в качестве базы данных для результатов оптимизации запросов.

Пусть в гетерогенной базе данных физической сети имеется N запросов к информации A : $a_1, a_2, \dots, a_n, a_n$ - очередь слов-кандидатов на расширение может быть выражена следующим образом U : ua_1, ua_2, \dots, ua_n ; $G(u_n, f_i)$ - частота употребления слов u_n в документе f_i ; $g(u_n, Y)$ - частота употребления слов u_n в блоке Y ; $g(u_n)$ - частота лексического элемента в документе u_n в блоке Cs ; $co-occu(u_n, u_m)$ - частота совместного употребления лексических единиц u_n и u_m ; fl_i - длина файла i -го файла f_i в гетерогенной базе данных; $avgfl$ - средняя длина файла в гетерогенной базе данных.

Вероятность одноязычной модели вычисляется методом сглаживания Дирихле в машинном обучении. Параметр α , используемый при сглаживании Дирихле, устанавливается в соответствии с каждым набором оценочных данных, и α задается как средняя длина документа для этого набора тестовых данных. Формула расчета приведена ниже. Здесь do/n используется для моделирования вероятности P появления слова u_n в блоке:

$$\text{Unigram - fwature}(t) = \sum_{f_i \in F} \frac{g(t, u_n) + \alpha \frac{do}{n}}{fl + \alpha} \quad (1)$$

Этот метод в основном рассчитывает вероятности двух унарных языковых моделей, вычисляет вероятности использования унарного языка для каждого документа обратной связи, а затем суммирует эти значения вероятности. Рассмотрим все документы обратной связи в целом и рассчитаем вероятность использования унитарной модели в целом.

Вес $BM25$ - это известная формула в области поиска информации. Она используется для выражения важности слова в документах с псевдообратной информацией. Чем больше значение $BM25$, тем важнее это слово в данном документе. Это значение косвенно зависит от исходного элемента запроса. Для данного расширительного слова-кандидата формула веса $BM25$ выглядит следующим образом:

$$BM25 - fwature(t) = \frac{(h_i + 1)g}{h_i(1 - j) + j \frac{fl}{avgfl} \log \frac{n - do + 0.5}{do + 0.5}} \quad (2)$$

$h_i \in [1.0, 2.0]$ и j обычно устанавливаются равными 0,75. Вес $BM25$ аналогичен вычислению в предыдущей унарной языковой модели. Существует два варианта вычисления характеристик веса $BM25$, то есть вычислить вес слова $BM25$ в каждом документе с псевдообратной информацией, а затем

сложить эти веса вместе; или взять все документы с псевдообратной информацией в целом и затем вычислить вес BM25.

В исследовании основными характеристиками глобального блока данных являются одноязычная модель слова-кандидата для расширения во всем корпусе и значение gdo во всем блоке. Формула расчета такова:

$$g \cdot do(a_i) = g(u_n, Y) \cdot \log \frac{\text{Corpus - Size}}{g(u_n)} \quad (3)$$

Исходный запрос, отправленный пользователем, состоит из нескольких ключевых слов, поэтому здесь суммируется сходство между расширительными словами и каждым ключевым словом. Обе статистики должны вычислять совпадение между расширительным словом w и исходным термином запроса a , используя следующую статистику о совпадении между словами:

$$MI - fwature(t) = \sum_{w \in a} MI(a, w) \quad (4)$$

$$\beta - fwature(t) = \sum_{w \in a} \frac{n(c_{11}c_{22})^2}{(c_{11} \cdot c_{12})(c_{11} + c_{21})(c_{12} + c_{22})(c_{21} + c_{22})} \quad (5)$$

где (a, w) - слово запроса a и расширительное слово w ; c_{11} - совместное использование слова запроса a и расширительного слова w ; c_{12} - частота, с которой появляется только слово запроса a без расширительного слова w ; c_{21} - частота, с которой слово запроса a не появляется, а появляется только расширительное слово w ; c_{22} - не появляющееся слово запроса a , и частоту появления расширительного слова w .

Далее глобальный словарь данных преобразуется в динамический словарь. Динамический словарь данных похож на глобальный словарь данных, но отличается от него. Он может принимать команды запроса в качестве входных данных и может использовать динамические поля данных для описания динамического состояния глобальных сайтов и реляционных таблиц разнородных баз данных.

Проведено тестирование метода моделирования массивной гетерогенной сети передачи данных системы управления мониторингом. Экспериментальная платформа основана на версии Nadoop-1.0.4, использована версия HBase-0.94.8, версия JDK - jdk-6u45-linux-i586. Используем созданный метод и два других метода для запроса тестового набора данных.

Таблица 2

Тестовый набор данных

Набор данных	Dataset A	Dataset B
Размер набора данных	2048	10240
Выражение маршрута	1315	6560
Массив суффиксов	14887	74380
Удаление избыточных элементов данных	9311	44540

Сокращение времени поиска и времени выполнения является важным показателем эффективности работы с массивными гетерогенными данными. С помощью этого индекса можно напрямую оценить эффективность использования метода оптимизации запросов. Результаты моделирования показали,

что время бинарного поиска и время выполнения у разработанного алгоритма по сравнению с известными прототипами лучше на 18% и 24%, и несколько лучше (5.6%) в сравнении с алгоритмом, основанным на искусственном интеллекте.

Таким образом, предложен алгоритм оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга на основе машинного обучения, обеспечивающий сокращение времени исполнения запросов и заданный баланс между эффективностью запроса и точностью.

Проблемы, связанные с неопределенностью источников данных мониторинга и нагрузок в интегрированных энергетических системах (IES), становятся все более очевидными в связи с объединением крупномасштабных возобновляемых источников энергии и мультиэнергетических нагрузок и наличия множества сценариев поведения системы. Они создают большие проблемы для оптимального функционирования IES. В качестве объекта исследования рассматривается распределенная IES в промышленном парке, и предлагается стохастическая оптимальная модель функционирования, основанная на многосценарном моделировании, для учета неопределенностей прогнозирования, возникающих в случае распределенной выработки электроэнергии и мультиэнергетических нагрузок. В частности, анализ сценариев для стохастической оптимизации применяется для устранения этих неопределенностей прогнозирования в рамках подхода, состоящего из двух частей: генерация операционных сценариев на основе выборки из латинского гиперкуба (LHS) и сведение множества сценариев к меньшему числу более общих сценариев на основе K-средних.

После этого на основе типичных сценариев работы предлагается стохастическая оптимальная модель работы распределенной IES на перспективу с учетом общей операционной экономии в качестве цели принятия решений. Кроме того, учитываются общая энергоэффективность и новые мощности по потреблению энергии. Таким образом, может быть гарантирована безопасная и экономичная эксплуатация IES даже при негативном влиянии факторов неопределенности. Обоснованность и рациональность предложенной модели подтверждаются анализом примеров.

Далее рассмотрены особенности моделирования с использованием нескольких сценариев с учетом неопределенности.

Распределенная IES расположена на стороне нагрузки энергетической сети, и может быть реализован широкий спектр энергоснабжения, включая охлаждение, отопление, электричество и газ. Энергетический центр в основном состоит из оборудования для производства энергии малого и среднего масштаба, устройств хранения энергии, а также оборудования для передачи и преобразования энергии. Типичное оборудование для производства энергии включает в себя СНР, фотоэлектрические установки (PV) и ветряные турбины (WT). Устройства накопления энергии можно разделить на устройства накопления электроэнергии (ES) и устройства накопления тепла (HS).

К компонентам, обеспечивающим передачу и преобразование энергии, относятся газовые котлы (GB), электрические охладители (EC), абсорбцион-

ные охладители (AC) и теплообменники (EX). Типичная топология показана на рис. 7. Основываясь на топологии, показанной на рис. 7, взаимосвязь между потреблением и выработкой энергии может быть описана с помощью следующей модели энергетического узла

$$\begin{bmatrix} P_{o,ele} \\ Q_{o,cl} \\ Q_{bl,cl} \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} (1-\sigma)\varepsilon\eta_t & (1-\sigma)\nu\eta_{gt}^e & (1-\sigma) \\ 0 & [\nu\eta_{gt}^h\eta_{rec} + (1-\nu)\eta_{gb}] \alpha\eta_{ac} / (1-\lambda) & 0 \\ 0 & [\nu\eta_{gt}^h\eta_{rec} + (1-\nu)\eta_{gb}] (1-\alpha)\eta_{ex} / (1-\lambda) & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ P_{es} \\ P_{hs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{ig} \\ P_{dg} \end{bmatrix} \quad (6)$$

где $P_{o,ele}$, $Q_{o,cl}$ и $Q_{o,hl}$ - выходная мощность энергетического узла в виде электроэнергии, охлаждения и обогрева соответственно; η_t - КПД трансформатора; ε - рабочее состояние IES, где $\varepsilon=1$ представляет энергосистему - подключенный режим работы, а $\varepsilon=0$ представляет изолированный режим работы; η_{gt}^e , η_{gt}^h , η_{rec} , η_{gb} , и η_{ac} представляют собой электрический КПД, тепловой КПД, КПД рекуперации тепла, КПД GB и КПД EX соответственно; ν - отношение мощности газовой турбины к общему потреблению газа; α - коэффициент распределения тепла переменного и переменного тока; и λ - коэффициент охлаждения, σ - коэффициент распределения электроэнергии; P_{es} и P_{hs} соответственно представляют собой мощность, выделяемую или запасаемую устройствами накопления электрической и тепловой энергии.

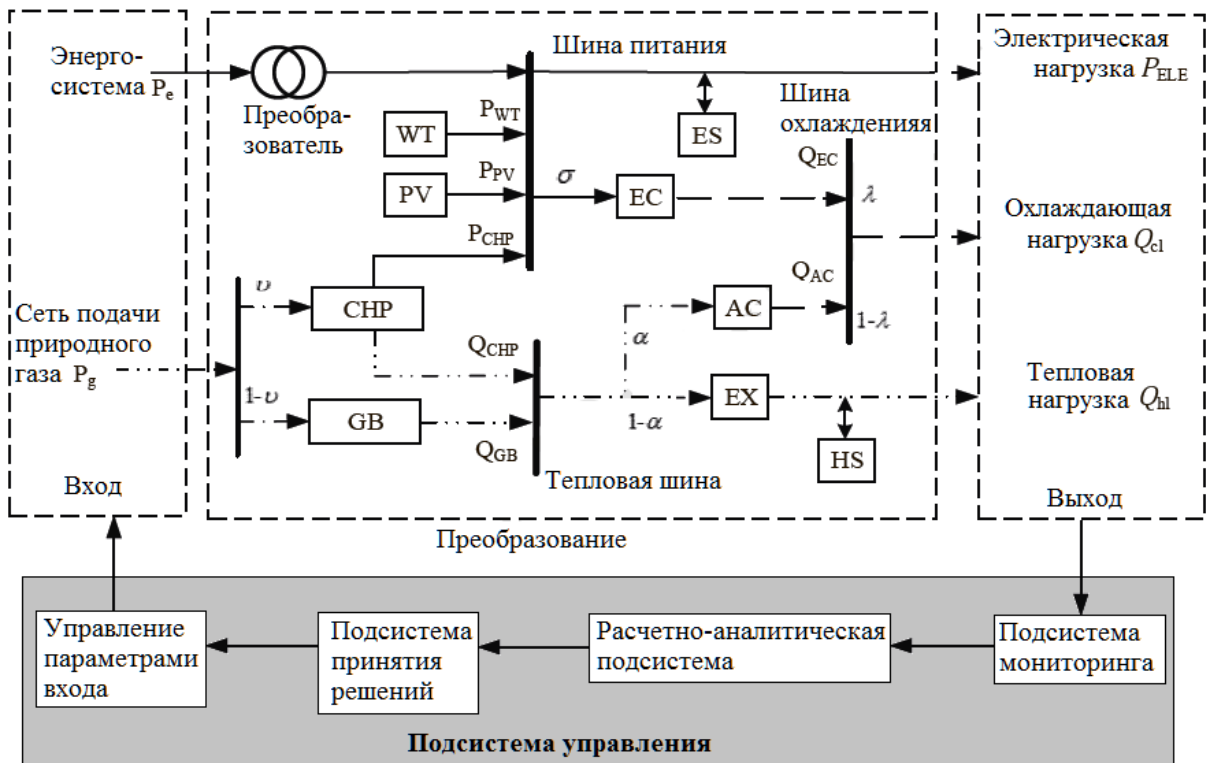


Рис. 7. Типичная структура распределенной IES

В работе представлено моделирование типичных сценариев работы,

включая базовые сценарии и случайные сценарии, в основном для распределенной IES в промышленном парке.

Предполагается, что прогнозируемые данные по вышеуказанным переменным на день вперед известны, и базовый сценарий S_c может быть сформирован путем суммирования прогнозируемой мощности возобновляемого источника энергии и энергетической нагрузки в виде уравнения (7):

$$S_c = [S_{source,1}, \dots, S_{source,k}, S_{load,1}^h, \dots, S_{load,l}^h, S_{load,1}^e, \dots, S_{load,n}^e] \quad (7)$$

где k , l и n - номера типов распределенных источников энергии, типов тепловой нагрузки и типов электрической нагрузки, соответственно, в базовых сценариях; $S_{source,k}$ - набор данных временных рядов для k -го типа распределенного источника энергии; $S_{load,l}^h$ - набор временных рядов данных о потребностях в тепловой нагрузке в l -й категории; и $S_{load,n}^e$ - это набор временных рядов данных о потребностях в электрической нагрузке в n -й категории.

Учитывая неопределенность в отношении возобновляемых источников энергии (фотоэлектрическая генерация и WTS) и множество энергетических нагрузок, случайные сценарии построены на основе базовых сценариев. Метод многомерной и стратифицированной выборки LHS используется для извлечения сценариев в соответствии с распределениями вероятностей источников и нагрузок. С помощью этой рандомизированной обработки неопределенности моделируются различные сценарии работы с неопределенностью в разное время. Можно гарантировать, что все области выборки будут охвачены выбранными точками.

Можно считать, что выходные данные фотоэлектрической генерации приблизительно соответствуют бета-распределению, а их плотность вероятности может быть выражена так:

$$\begin{cases} f(S) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (S')^{\alpha-1} (1 - S')^{\beta-1} \\ S' = \frac{S}{S_{max}} \end{cases} \quad (8)$$

где S_{max} - максимальная интенсивность солнечного излучения за весь рассматриваемый период времени, а α и β - параметры формы бета-распределения. Плотность вероятности скорости ветра и мощность ветроэнергетической системы могут быть выражены уравнениями (9) и (10):

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (9)$$

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, 0 \leq v \leq v_i; v_0 \leq v \\ P_r \frac{v - v_i}{v_r - v_i}, v_i \leq v \leq v_r \\ P_r, v_r \leq v \leq v_0 \end{cases} \quad (10)$$

где k и c - параметры формы и масштаба распределения Вейбулла соответственно; v - фактическая скорость ветра; P_r - номинальная мощность WT; v_i , v_r

и v_0 - начальная, номинальная и конечная скорости ветра соответственно.

Соответствующая функция плотности вероятности может быть выражена следующим образом:

$$f(P_{\text{load}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{P_{\text{load}}}} \exp\left[-\frac{(P - \mu_{P_{\text{load}}})^2}{2\sigma_{P_{\text{load}}}^2}\right] \quad (11)$$

где P_{load} - это тепловая или электрическая нагрузка, а $\mu_{P_{\text{load}}}$ и $\sigma_{P_{\text{load}}}$ - ожидаемое значение и стандартное отклонение нагрузки соответственно.

Затем, основываясь на приведенных выше распределениях вероятностей источников и нагрузок, можно получить случайный начальный набор сценариев с помощью LHS и корреляционного анализа для генерации комбинаций базовых сценариев.

В процессе генерации случайных сценариев корреляция между случайными переменными (мощность фотоэлектрической системы, мощность энергии ветра и тепловая нагрузка на электроэнергию) учитывается после выборки латинского гиперкуба. Метод декомпозиции Холецкого используется для изменения исходной матрицы данных выборки, сформированной LHS, таким образом, чтобы случайные величины в матрице данных выборки удовлетворяли заданной матрице коэффициентов ранговой корреляции, которая получена из исторических данных выборки.

Количество сценариев является важным параметром, который следует учитывать при создании исходных сценариев и сценариев загрузки. Рассмотрение слишком большого количества сценариев приведет к усложнению процесса решения модели, а рассмотрение слишком малого количества сценариев снизит точность модели. Следовательно, необходимо сгенерировать достаточное количество сценариев, а затем соответствующим образом сократить их, чтобы получить приблизительно репрезентативное подмножество исходных сценариев. Алгоритмы кластеризации, такие как K-means (K-средних), являются эффективным средством сокращения набора сценариев, включая фотоэлектрические источники и тепловые/электрические нагрузки. Алгоритм кластеризации с использованием K-средних делится на 3 этапа:

1. Сначала задается количество кластеров K . Затем случайным образом выбираются K групп подсценариев из исходного набора сценариев S в качестве начальных центров кластеров.

2. Далее, распределения различных типов наборов сценариев характеризуются путем вычисления евклидовых расстояний между каждым вектором подсценария и центрами кластеров, и затем центры кластеров соответствующим образом обновляются. Таким образом, подсценарии постоянно перераспределяются с целью минимизации евклидова расстояния между каждым подсценарием и центром кластера в одном и том же наборе сценариев.

3. Наконец, все сценарии разделены на несколько категорий, и для представления каждой категории выбирается центр кластера. Кроме того, рассчитывается вероятность появления каждой категории сценариев.

В заключение, кластеризация с использованием K -средних значений может сократить количество выборок различных случайных величин, позволяя получить только K репрезентативных сценариев. Впоследствии эти выборки будут объединены для получения смоделированных сценариев в разное время. Затем выполняется процесс вторичного сокращения для комбинированного набора сценариев, чтобы получить $C=U \times T$ групп сценариев операций (где U обозначает количество моделируемых сценариев для каждого временного шага после вторичного сокращения) и соответствующие вероятности сценариев, которые формируют набор S_d типичных сценариев операций, который будет использоваться при генерации оптимальной стратегии работы. Наконец, получается набор типичных сценариев работы S_d , учитывающих как характеристики временных рядов переходных процессов, так и неопределенности со стороны источника и нагрузки:

$$[S_d \quad \rho_d] = \begin{bmatrix} P_{1,1}^1 & P_{1,2}^1 & \dots & P_{i,j}^1 & \dots & P_{Q,W-1}^1 & P_{Q,W}^1 & \rho_d^1 \\ P_{1,1}^2 & P_{1,2}^2 & \dots & P_{i,j}^2 & \dots & P_{Q,W-1}^2 & P_{Q,W}^2 & \rho_d^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1,1}^k & P_{1,2}^k & \dots & P_{i,j}^k & \dots & P_{Q,W-1}^k & P_{Q,W}^k & \rho_d^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1,1}^C & P_{1,2}^C & \dots & P_{i,j}^C & \dots & P_{Q,W-1}^C & P_{Q,W}^C & \rho_d^C \end{bmatrix} \quad (12)$$

где C - количество окончательно сформированных сценариев, $P_{i,j}^k$ - значение j -й переменной, относящейся к i -й категории случайных величин, и ρ_d^k - вероятность, соответствующая k -му сценарию.

Итак, разработан алгоритм редукции множества сценариев для задачи сценарного моделирования системы управления мониторингом программного обеспечения, обеспечивающий рациональное множество групп сценариев операций и соответствующие вероятности сценариев.

На основе построенного набора типичных сценариев работы строится стохастическая модель оптимизации для распределенных IES. Целью принятия решения является минимизация суммы ожидаемых экономических затрат для каждого сценария. Переменными для принятия решения являются стратегии вывода для настраиваемых блоков в IES во время цикла оптимизации.

Кроме того, учитывается общая энергоэффективность и новая пиковая мощность энергопотребления IES. Задача оптимизации сформулирована таким образом, чтобы максимально повысить новую мощность энергопотребления и энергоэффективность системы, обеспечивая при этом безопасную и экономичную эксплуатацию IES.

Целевая функция оптимизационной модели представляет собой сумму значений математического ожидания общих экономических затрат в каждом типичном операционном сценарии. Эти затраты включают в себя затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования C_m , затраты на подключение электроэнергии к электросети C_e , затраты на потребление природного газа C_g и сокращение затрат C_1 на использование энергии ветра и фо-

тоэлектрической энергии. Кроме того, общая энергоэффективность IES является важным показателем функционирования системы, который следует учитывать. Поэтому для повышения рациональности модели предлагается комплексный показатель оценки энергоэффективности, который используется в качестве еще одной цели оптимизации, помимо показателей экономических затрат. В то время как две категории подцелевых функций, соответственно соответствующие индексу экономических затрат (C_m , C_e , C_g и C_l) IES и индексу энергоэффективности η , имеют разные измерения, поэтому трудно напрямую сложить две категории подцелевых функций путем линейной суперпозиции, чтобы сформировать полную целевую функцию для решения. Таким образом, мы решили использовать принцип нечеткости для преобразования индекса энергоэффективности в нечеткий показатель экономических затрат \tilde{f}_{eef} , который имеет ту же размерность, что и другие показатели экономических затрат, чтобы преобразовать многокритериальную задачу в задачу оптимизации с одним критерием.

Конечная целевая функция имеет вид:

$$\min \text{Cost} = C_m + C_e + C_g + C_l + \tilde{f}_{\text{eef}} \quad (13)$$

где затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования C_m могут быть рассчитаны следующим образом:

$$C_m = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{S_t} p_s \left(\sum_{k=1}^K P_{s,t,k} c_{o,k} \right) \Delta t \quad (14)$$

где T - продолжительность цикла оптимизации, S_t - смоделированный сценарий, установленный в момент времени t , p_s - соответствующая вероятность, K - количество блоков в энергетическом узле, $P_{s,t,k}$ - выходная мощность k -го блока в момент времени t в соответствии с s -м сценарием, $c_{o,k}$ - удельные эксплуатационные расходы, а Δt - размер временного шага оптимизации.

Процесс построения и решения этой модели представлен на рис. 5.

Ограничивающие условия модели включают в себя балансовые ограничения на энергоснабжение, входные и выходные ограничения на энергетическом узле, ограничения на эксплуатацию оборудования, ограничения на снижение мощности ветровой и фотоэлектрической энергии, а также ограничения на хранение энергии.

Построение и решение представленной стохастической оптимизационной, в основном реализовано с использованием MATLAB. Процесс решения представляет собой процесс оптимизации нелинейной многомерной функции со сложными ограничениями, который может быть единообразно выражен следующим образом:

$$\begin{cases} \min F(x_u) \\ f_k(x_u) = 0 \\ g_k(x_u) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Таким образом, создана стохастическая модель оптимального функционирования программных систем мониторинга распределенных энергетических систем, обеспечивающая повышение средней мощности

энергопотребления вместе с энергоэффективностью системы.

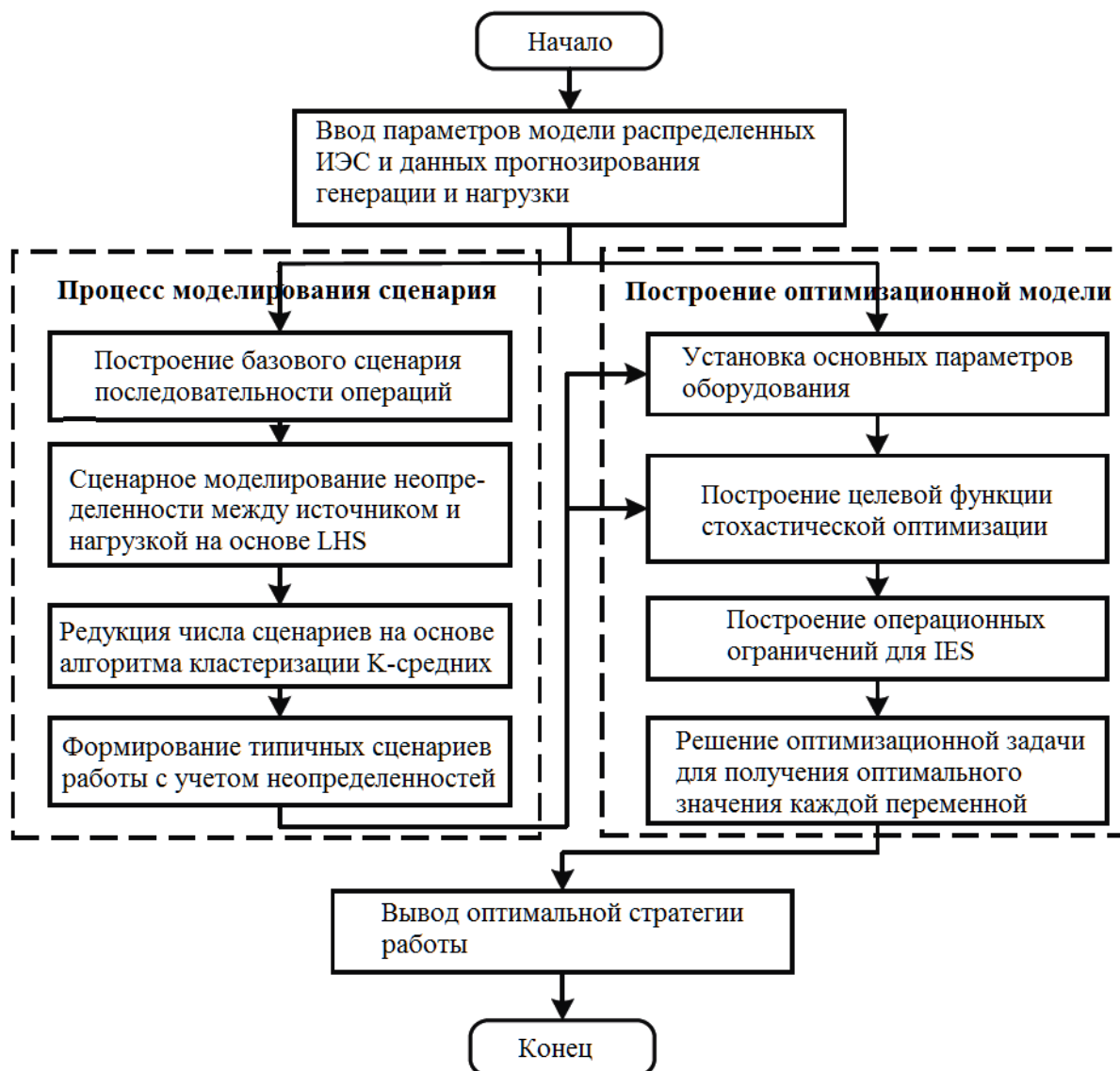


Рис. 5. Процесс построения модели и ее решения

Заключение

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Предложена обобщенная ситуационная модель предметной области мониторинга программного обеспечения с мультивходовой структурой описания, позволяющая осуществить редукцию требований к программному обеспечению в зависимости от категории объекта и задачи мониторинга.

2. Предложена вариативная архитектура системы мониторинга программного обеспечения с описыванием ключевых компонентов и уровней программных решений на UML, расширенным диапазоном вариативности и обеспечивающая создание многокомпонентных архитектур для новых предметных областей.

3. Разработан алгоритм оптимизации запросов для массивных гетерогенных баз данных мониторинга на основе машинного обучения, использующий преобразование на основе запроса глобального словаря данных в

динамический словарь данных и обеспечивающий сокращение времени исполнения запросов и заданный баланс между эффективностью запроса и точностью. Время бинарного поиска и время выполнения у разработанного алгоритма по сравнению с известными прототипами лучше на 18% и 24%, и несколько лучше (5.6%) в сравнении с алгоритмом, основанным на искусственном интеллекте.

4. Разработан итерационный алгоритм редукции множества сценариев с кластеризацией на основе K-средних, порождающий рациональное множество групп сценариев операций и соответствующие вероятности сценариев.

5. Предложена стохастическая модель оптимального функционирования программных систем мониторинга распределенных энергетических систем с динамическим переходом к детерминированной оптимизации при различных сценариях эксплуатации на основе метода сценарного анализа и обеспечивающая в конечном итоге повышение средней мощности энергопотребления вместе с энергоэффективностью системы.

6. Разработана структура программного обеспечения, реализующего механизмы встраивания процессов принятия решений в проектирование систем мониторинга специального программного обеспечения.

7. Элементы программного обеспечения зарегистрированы в ФИПС.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. Результаты исследования рекомендуются к применению в задачах мониторинга программного обеспечения систем с массивными гетерогенными данными для повышения скорости обработки данных.

2. Дальнейшая разработка темы будет направлена на практическую реализацию теоретических и алгоритмических результатов, интеграцию в наиболее распространенные распределенные системы. Развитие результатов будет направлено на улучшение модифицируемости и реконфигурируемости программных систем.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах: Публикации в изданиях списка ВАК

1. Кочегаров М.В., Корнеев А.М. Алгоритмизация работы программной системы мониторинга для сетей критической инфраструктуры// Системы управления и информационные технологии, №4(94), 2023. С. 68-73.

2. Божко Л.М., Атласов И.В., Мутина Е.И., Сорокин С.А., Кочегаров М.В. Моделирование вероятностных баз данных на основе информационной диссоциации запросов и коэффициента распространения// Системы управления и информационные технологии, №2(96), 2024. С. 15-20.

3. Кочегаров М.В., Божко Л.М., Ермаков С.Г. Стохастическая модель оптимального функционирования распределенной интегрированной энергетической системы, основанная на многосценарном моделировании результатов мониторинга// Системы управления и информационные технологии, №3(97), 2024. С. 16-24.

4. Камиль В.А.К., Кочегаров М.В., Мутин Д.И. Аналитическое моделирование многокластерной системы специального назначения на основе нескольких сценариев мониторинга// Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024;12(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1713>.

5. Кочегаров М.В., Божко Л.М., Питолин А.В. Оценка эффективности модели мно-

гокластерной системы специального назначения на основе нескольких сценариев мониторинга// Системы управления и информационные технологии, №4(98), 2024. С. 14-19

Публикации в изданиях, индексируемых в WoS

6. Kravets O.Ja., Aksenov I.A., Redkin Yu.V., Rahman P.A., Kochegarov M.V., Gorshkov A.V., Sorokin S.A. Modeling of neural network monitoring agent to predict traffic spikes and agent training// International Journal on Information Technologies and Security, vol.16, no.3, 2024, pp. 49-56. DOI: <https://doi.org/10.59035/VDTR2117>. WoS: 001296276500005.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

7. Программа интерактивного управления очередью системы мониторинга/ Е.В. Сидоренко, М.В. Кочегаров, В.А.К. Камиль, К.А.Ж. Амоа. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025612449 от 23.01.2025. М.: ФИПС, 2025.

Статьи и материалы конференций

8. Кочегаров М.В. Удаленный мониторинг локализованной беспроводной сети с использованием технологий искусственного интеллекта// Информационные технологии моделирования и управления, №4(134), 2023. – С. 302-311.

9. Kochegarov M.V., Kravets O.Ja. Software monitoring – basic approaches and terminology// Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2024'AS): Proceedings of the XXIX-th International Open Science Conference. - Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2024. Pp. 164-170.

10. Кочегаров М.В. Анализ мониторинга ресурсов и требований систем мониторинга программного обеспечения// Информационные технологии моделирования и управления, №1(135), 2024. – С. 61-67.

11. Кочегаров М.В., Кравец О.Я. Разработка эталонной архитектуры системы управления мониторингом средств программного обеспечения // Наука и технологии: перспективы развития и применения: сб. статей VII Междунар. НПК. - Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2024. - С. 14-22.

12. Кочегаров М.В., Кравец О.Я. Мониторинг сетевого трафика и поведения устройств в сетях критической инфраструктуры// Экономика и менеджмент систем управления, №3(53), 2024. – С. 89-98.

13. Кочегаров М.В. Оценка качества эталонной архитектуры системы управления мониторингом средств программного обеспечения// Информационные технологии моделирования и управления. №4(138), 2024, с. 270-277.

Подписано в печать 21.03.2025.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ №146.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14