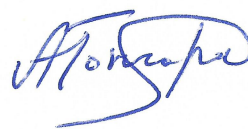


На правах рукописи



ГОНЧАРОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ
СЕРТИФИКАЦИИ ПРОДУКЦИОННЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность: 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (в промышленности)»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»).

Научный руководитель: Семенов Николай Александрович,
доктор технических наук, профессор,
заместитель заведующего кафедрой
Информационных систем ФГБОУ ВО
«ТвГТУ»

Официальные оппоненты: Гатчин Юрий Арменакович,
доктор технических наук, профессор
факультета безопасности информационных
технологий Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский
национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и
оптики»

Сидоркина Ирина Геннадиевна,
доктор технических наук, профессор, декан
факультета Информатики и вычислительной
техники Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Поволжский
государственный технологический
университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится «18» октября 2019 г. в 13 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.262.06 при ФГБОУ ВО «ТвГТУ»
по адресу: 170026, Г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ТвГТУ»
и на сайте www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 212.262.06

Доктор физико-математических наук,
профессор

_____ С.М. Дзюба

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Развитие промышленных предприятий в настоящее время невозможно без применения автоматизированных систем управления производственными и технологическими процессами (АСУ ТП).

Встраиваемое программное обеспечение (ПО) АСУ ТП, помимо выполнения целевых функций, должно противостоять следующим угрозам обрабатываемой информации: неправомерный доступ, уничтожение, модифицирование, блокирование, копирование, распространение и иные неправомерные действия.

Примером программного обеспечения АСУ ТП являются системы обнаружения вторжений (СОВ).

Аккумуляирование эмпирических знаний о принимаемых при управлении технологическими процессами решениях привело к использованию в составе встраиваемого ПО АСУ ТП продукционных экспертных информационных систем (ИС) промышленного назначения.

При сертификации встраиваемого ПО АСУ ТП на первый план выступают сроки проведения всех необходимых проверок. Важность сосредоточения на уменьшении продолжительности сертификационных испытаний обусловлена невозможностью снижения конкурентоспособности предприятия.

Промышленность России представлена множеством отраслей и предприятий. Сложившееся обвальное нарастание массы самой разнообразной информации о технологиях промышленности, знаний и метазнаний о промышленных процессах наделяет современные экспертные ИС большим количеством продукционных правил.

Авторы В.А. Валетов, А.А. Орлова, С.Д. Третьяков и др. в своих исследованиях рассматривают недостаток продукционных экспертных ИС – низкая эффективность процесса логического вывода. Данный недостаток связан с тем, что значительная часть времени затрачивается на непроизводительную проверку применимости продукционных правил. Логично предположить, что значительное количество продукционных правил в современных экспертных ИС ещё более увеличивает время на логический вывод.

Представленные требования к встраиваемому ПО АСУ ТП показывают важность и актуальность проблемы повышения эффективности процесса логического вывода в продукционных экспертных ИС.

Целью исследования является повышение эффективности процесса логического вывода в продукционных экспертных ИС при сертификации встраиваемого ПО АСУ ТП.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные **задачи исследования**:

1. Формирование особенностей сертификации продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП.
2. Анализ применяемых в настоящее время методов повышения скорости вычислительных операций в продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП.
3. Разработка алгоритмов решения задачи повышения скорости вычислительных операций в продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП с использованием аспектно-ориентированного (АО) подхода.

4. Использование метода анализа иерархий (МАИ) для обоснования выбора алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов в зависимости от количества продукционных правил в базе знаний экспертной ИС.

5. Описание изменений модели экспертной ИС в части интерпретации продукционных правил, базирующихся на применении АО-подхода, при сертификации встраиваемого ПО АСУ ТП.

6. Разработка прототипа подсистемы интерпретации продукционных правил экспертной ИС с применением АО-подхода.

Объект исследования. Методы и средства обработки информации в экспертных ИС при сертификации встраиваемого ПО АСУ ТП.

Предмет исследования. Процесс логического вывода продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы:

- методы теории множеств
- методы системного анализа
- методы математической статистики
- методы разработки программного обеспечения ЭВМ.

Вместе с тем среди используемых методов, следует отметить аспектно-ориентированный подход, который для повышения скорости вычислительных операций в продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП ранее не применялся.

Теоретическая основа исследования. Теоретическую основу диссертационной работы составляют труды отечественных и зарубежных ученых и исследователей:

– в области искусственного интеллекта: Е. Alpaydin, М. Sasikumar, R. Chandrasekar, S. Muthu Raman, S. Ramani, А.Б. Барский, А.Л. Каткова, А.П. Частиков, В.Б. Новосельцев, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, В.Ф. Хорошевский, Г. Райли, Д. Джарратано, Д. Рутковская, Д.Л. Белов, Д.Ф. Люгер, Е.Б. Кисель, Е.И. Горожанина, Ж.-Л. Лорьер, И.Б. Фоминых, И.М. Братко, К.Р. Червинская, Л. Рутковский, Л.А. Гладков, М. Пилиньский, М.Б. Беркинблит, М.Д. Шапот, Н. Нильсон, Н.А. Семенов и др.

– в области системного анализа, теории множеств и математической статистики: E.W. Dijkstra, G. Kiczales, М.М. Aksit, T. Elrad, А.А. Воронов, А.А. Денисов, А.А. Орлова, А.Б. Хуторецкий, А.В. Антонов, А.Н. Катулев, А.П. Афанасьев, Б.А. Гладких, Б.В. Палюх, В.А. Валетов, В.Н. Волкова, Д.М. Жилин, К.Н. Лебедев, Н.А. Северцев, Н.Г. Зайцев, Н.М. Капустин, С.Д. Третьяков, С.М. Дзюба и др.

– в области разработки программного обеспечения ЭВМ и сертификации: A. Theedom, E. Gamma, H. Yang, J. Vlissides, M. Yener, R. Helm, R. Johnson, R. Pawlak, А.А. Демирский, А.А. Дудыкин, А.В. Барабанов, А.В. Шестаков, А.Г. Сергеев, А.Н. Паньков, А.С. Марков, А.Ф. Кулаков, Б.И. Герасимов, Б.М. Позднеев, В.А. Колпаков, В.В. Домарев, В.В. Липаев, В.И. Колчков, В.Л. Цирлов, В.М. Панорядов, Г.Г. Панкова, Д.А. Скрипник, Д.Н. Шевцов, Е.Б. Герасимова, Е.Н. Николенко, И.М. Лифиц, М.Я. Марусина, О.В. Новикова, С.А. Воложанина, С.А. Матяш, С.Д. Поляков, С.Л. Котов и др.

Кроме того, в работе были использованы Государственные стандарты Российской Федерации в области информационной безопасности и информационных технологий.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложенные одноитерационный и рекурсивный алгоритмы решения задачи повышения скорости вычислительных операций в продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП отличаются применением АО-подхода.
2. Обоснование выбора наиболее оптимального алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов в зависимости от количества продукционных правил в БЗ экспертной ИС встраиваемого ПО АСУ ТП отличается использованием МАИ.
3. Изменение модели экспертной ИС встраиваемого ПО АСУ ТП в части интерпретации продукционных правил отличается применением одноитерационного и рекурсивного алгоритмов решения задачи повышения скорости логического вывода в продукционных экспертных ИС.
4. Прототип подсистемы интерпретации продукционных правил экспертной ИС, применяемый при сертификации встраиваемого ПО АСУ ТП, отличается применением АО-подхода.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы решения задачи повышения скорости вычислительных операций в продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП с использованием АО-подхода.

Соответствует пункту 13 паспорта специальности: Методы получения, анализа и обработки экспертной информации.

2. Использование МАИ для обоснования выбора алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов в зависимости от количества продукционных правил в БЗ экспертной ИС встраиваемого ПО АСУ ТП.

Соответствует пункту 10 паспорта специальности: Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах.

3. Изменение модели экспертной ИС встраиваемого ПО АСУ ТП в части интерпретации продукционных правил, базирующееся на применении АО-подхода.

Соответствует пункту 4 паспорта специальности: Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

4. Прототип подсистемы интерпретации продукционных правил экспертной ИС, применяемый при сертификации встраиваемого ПО АСУ ТП.

Соответствует пункту 5 паспорта специальности: Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Обоснованность научных положений, выводов и практических рекомендаций, полученных в диссертационной работе, обеспечивается обоснованностью применяемых методов исследования, доказательством сформулированных утверждений, близостью и согласованностью представленных результатов экспериментальных исследований с теоретическими выводами.

Практическая значимость работы заключается в том, что рассматриваемая актуальная проблема недостаточной эффективности экспертных ИС, представленных большим множеством продукционных правил, может быть решена путём использования АО-подхода. АО-подход позволяет выполнить реорганизацию продукционных правил, отделив сквозные (пересекающиеся) факты.

МАИ показал, что с увеличением количества продукционных правил в БЗ экспертной ИС предпочтительнее использовать рекурсивный алгоритм извлечения аспектов из последовательности фактов.

Публикации. По основным результатам исследования имеется семь публикаций, две из которых – в журналах из списка, рекомендованного ВАК России (в соавторстве), одна – в журнале, индексируемом в базе Scopus (в соавторстве).

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы и три приложения. Объем диссертационной работы составляет 141 страницу машинописного текста, включая 22 рисунка и 18 таблиц. Список литературы содержит 100 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы его цель и задачи, методы исследования, научная новизна. Приводятся перечень научных результатов и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведены дано понятие и представлены характерные особенности встраиваемого ПО АСУ ТП и соответствующих промышленных продукционных экспертных ИС.

В частности, в данной главе описываются угрозы, которым должны противостоять средства защиты информации встраиваемого ПО АСУ ТП, особенности разработки данного ПО с точки зрения системного подхода.

Дано описание причин широко использования в составе встраиваемого ПО АСУ ТП продукционных экспертных ИС промышленного назначения.

Приведено описание экспертных ИС, их особенности, основные свойства и используемые в них модели знаний, в том числе отмечается, что наиболее распространено применение продукционной модели. Далее следует описание продукционной модели, приводятся её преимущества и недостатки.

Представлена типовая структура экспертной ИС встраиваемого ПО АСУ ТП.

Приведено описание требований к сертификации продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП.

Представлено описание причин возникновения решаемой в диссертационном исследовании задачи повышения эффективности процесса логического вывода в продукционных экспертных ИС при сертификации встраиваемого ПО АСУ ТП.

В качестве причин рассматриваются:

- уменьшение продолжительности сертификационных испытаний, обусловленное невозможностью снижения конкурентоспособности предприятия (кроме того, уменьшение сроков сертификационных испытаний ведёт, соответственно, к уменьшению стоимости проведения сертификационных испытаний).
- присущая переполненным продукциями продукционным экспертным ИС недетерминированность (неоднозначность), из-за чего возникают принципиальные трудности при проверке корректности работы системы. При большом количестве правил становится сложно отслеживать непротиворечивость базы знаний.
- меньшая эффективность процесса логического вывода, по сравнению с другими моделями представления знаний из-за того, что при логическом выводе требуется значительное количество времени на перебор и непроизводительные проверки

применимости правил. Кроме того, при большом объёме знаний усложняется понимание взаимосвязей объектов.

В данной главе также приводится требование, которое предъявляется к сертификационным испытаниям встраиваемого ПО АСУ ТП, выражающееся в необходимости неизменности параметров технологического процесса, показателей надежности и производительности, а также пределов значений параметров выполнения целевых функций, заложенных в БЗ продукционной экспертной ИС встраиваемого ПО АСУ ТП.

Во **второй главе** «Обоснование методов решения задачи повышения скорости логического вывода продукционных экспертных ИС промышленного назначения» рассматриваются известные подходы и методы решения задачи повышения скорости логического вывода продукционных экспертных ИС.

Среди известных подходов, которые могли бы применяться для повышения скорости логического вывода продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП, представлены:

- фильтры;
- фреймы;
- дуальные экспертные ИС;
- нейронные сети;
- генетические алгоритмы;
- Rete-алгоритм.

Фильтры позволяют уменьшить количество безуспешных попыток, предпринимаемых для выполнения продукционных правил в экспертной ИС, путём исключения из БЗ бесполезные (ненужные в данный момент) правил и фактов.

Подход к оптимизации с использованием фреймов позволяет уменьшить число попыток проверки применимости правил с помощью автоматической организации элементарных фактов в более сложные структуры – фреймы.

Также существует возможность преобразования непроизводительной экспертной ИС в дуальную экспертную ИС, в которой содержатся и совместно используются две машины вывода: дедуктивная, использующая продукции, содержащиеся в БЗ, и индуктивная, обеспечивающая обобщение на основе накопленных в БД прецедентов. Такое совместное использование двух методов принятия решений расширяет возможности построения правил вывода за счет использования дополнительной информации и повышает надежность результатов.

Нейронные сети могут использоваться для извлечения правил из обученных нейросетей для использования в экспертных ИС или включения знаний о предметной области экспертной ИС в нейросеть для их совершенствования.

Генетические алгоритмы могут использоваться для повышения эффективности обучения нейронной сети, решающей задачу формирования БЗ экспертной ИС. Оптимальное решение ищется в серии последовательных приближений аргументов с лучшими значениями функций приспособленности, генерируемых в результате мутации и скрещивания хромосом.

При внедрении Rete-алгоритма в экспертную ИС формируется префиксное дерево (или граф), узлам которого соответствуют антецеденты. Таким образом корневой путь к листу представляет полное условие логического вывода отдельного продукционного правила.

Среди предъявленных требований к сертификации экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП была отмечена важная необходимость в неизменности параметров технологического процесса и пределов значений параметров выполнения целевых функций, заложенных в БЗ

продукционной экспертной ИС встраиваемого ПО АСУ ТП. В соответствии с этим требованием, не могут быть применены:

- фильтры;
- фреймы;
- дуальные экспертные системы;
- нейронные сети;
- генетические алгоритмы.

Rete-алгоритм не применим в силу того, что используется редко из-за большой потребности в оперативной памяти.

В связи с этим предлагается разработать собственные алгоритмы на базе аспектно-ориентированного подхода (АО-подход).

Методология *аспектно-ориентированный подход к разработке программного обеспечения (АОП)* была предложена в 1996 году группой инженеров исследовательского центра Херох PARC в Исследовательском центре Пало-Альто под руководством Грегора Кичалеса (Gregor Kiczales) в работе «Aspect-oriented programming».

Используя АОП, аспекты («аспект» (лат. *aspectus* – вид) – точка зрения на изучаемый предмет, рассматриваемая в изоляции от других точек зрения) проектируются и реализуются независимо друг от друга, объединяясь в одно целое, согласно свойству системности, в автоматическом режиме.

АОП, представляя собой современное развитие объектно-ориентированного подхода к программированию, предназначено для извлечения сквозных функций внутри бизнес-логики ИС. Бизнес-логика представляет собой описание набора бизнес-правил, использующихся в ходе производственной деятельности промышленных предприятий.

Сквозная функциональность (Cross-cutting concern) – это функциональность, рассеянная по всему исходному коду ПО, систематически независимая от предметной области.

Пример сквозной функциональности в АСУ ТП (например, СОВ) представлен на рисунке 1.

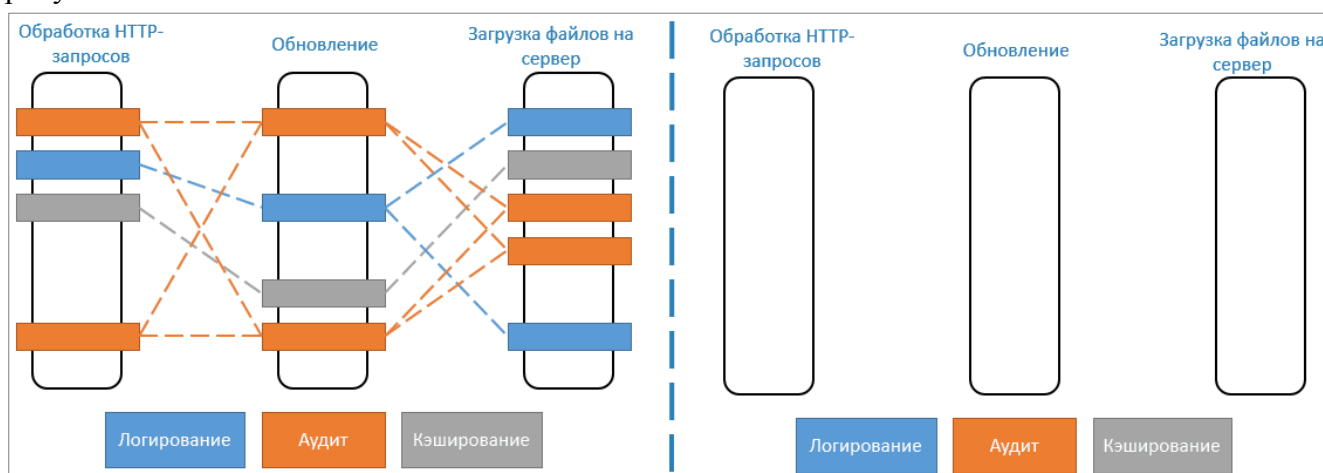


Рисунок 1. Пример сквозной функциональности в АСУ ТП

Далее в данной главе представлено описание разработанных алгоритмов решения задачи повышения скорости вычислительных операций в продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП, базирующихся на применении АО-подхода.

- одноитерационный алгоритм извлечения аспектов из последовательности фактов (ОАИ-алгоритм);

– рекурсивный алгоритм извлечения аспектов из последовательности фактов (РАИ-алгоритм).

При этом отмечается, что использование АО-подхода для повышения эффективности процесса логического вывода в продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП ранее не выполнялось.

Уточнено, что к разработке алгоритмов извлечения аспектов из последовательности фактов, кроме представленного выше, предъявляется также следующее требование: одновременное сокращение количества частных сведений при использовании АО-подхода не должно уменьшать информативность всего набора продукционных правил.

Одноитерационный алгоритм извлечения аспектов из последовательности фактов (ОАИ-алгоритм) позволяет упростить правила БЗ путём выделения аспектов.

Особенности полученных в результате применения ОАИ-алгоритма правил:

- меньшее количество сквозных фактов, по сравнению с исходным набором правил;
- средний уровень абстракции.

Описание ОАИ-алгоритма:

1. Получить исходный набор продукционных правил (базу правил):

БЗ представлена непустым множеством правил:

$$R = \{rule_1, rule_2, \dots, rule_n\} \quad (1),$$

где $R \neq \emptyset$, $n \in N$ – количество правил в БЗ.

2. Выделить из набора продукционных правил множество антецедентов:

Поскольку каждое правило включает в себя антецедент, тогда:

$$ANT = \{ant_1 \in rule_1, ant_2 \in rule_2, \dots, ant_n \in rule_n\} \quad (2).$$

3. Дифференцировать отдельные факты из антецедентов:

Каждый антецедент представлен набором известных фактов, соединенных с помощью логических операций, тогда:

$$\begin{aligned} ANT &= \{ant_1 = \{fact_1, fact_2, \dots, fact_m\} \\ &\subset F_1, ant_2 = \{fact_1, fact_2, \dots, fact_m\} \\ &\subset F_2, \dots, ant_n = \{fact_1, fact_2, \dots, fact_m\} \\ &\subset F_n\} \quad (3), \end{aligned}$$

где $m \in N$ – количество фактов в БЗ, $F_1, F_2, \dots, F_n$ – множество фактов отдельных антецедентов, причём:

$$F = F_1 \cup F_2 \cup \dots \cup F_n \quad (4),$$

где $F \neq \emptyset$, F – множество всех фактов в БЗ.

4. Выполнить поиск аспектов среди отдельных фактов:

Аспектом (Aspect) asp_i будем называть пересечение отдельных фактов в независимых антецедентах, т.е.:

$$asp_i = F_1 \cap F_2 \vee F_1 \cap F_3 \vee F_1 \cap F_4 \vee F_2 \cap F_3 \vee F_2 \cap F_4 \vee \dots \vee F_{n-1} \cap F_n \quad (5),$$

где $i \in N$ – номер выявленного аспекта.

5. Исходя из результатов поиска оформить набор аспектов:

Множество аспектов представлено следующим образом:

$$ASP = \{asp_1, asp_2, \dots, asp_k\} \quad (6),$$

где $k \in N$ – количество выявленных аспектов.

6. Выполнить замену фактов в исходном наборе продукционных правил сформированными на предыдущем шаге аспектами:

Каждое множество фактов отдельных антецедентов, в случае выявления аспекта, уменьшится на количество фактов, входящих в аспект:

$$\begin{aligned} F_1^* &= F_1 \setminus asp_1 \vee F_1 \setminus asp_2 \vee \dots \vee F_1 \setminus asp_k, \\ F_2^* &= F_2 \setminus asp_1 \vee F_2 \setminus asp_2 \vee \dots \vee F_2 \setminus asp_k, \dots, \\ F_n^* &= F_n \setminus asp_1 \vee F_n \setminus asp_2 \vee \dots \vee F_n \setminus asp_k \quad (7). \end{aligned}$$

Выполнив замену фактов в исходном наборе продукционных правил сформированными на предыдущем шаге аспектами, с учётом обновленного набора фактов, получаем множество антецедентов, состоящее из пары «множество фактов, для которых не выявлен аспект, множество аспектов, входящих в антецедент»:

$$\begin{aligned} ASP_1^* &= \{asp_1 \in ant_1 \vee asp_2 \in ant_1 \vee \dots \vee asp_k \in ant_1\}, \\ ASP_2^* &= \{asp_1 \in ant_2 \vee asp_2 \in ant_2 \vee \dots \vee asp_k \in ant_2\}, \dots, \\ ASP_n^* &= \{asp_1 \in ant_n \vee asp_2 \in ant_n \vee \dots \vee asp_k \in ant_n\} \quad (8), \\ ANT^* &= \{ant_1^* = \langle F_1^*, ASP_1^* \rangle, \\ &\quad ant_2^* = \langle F_2^*, ASP_2^* \rangle, \dots, \\ &\quad ant_n^* = \langle F_n^*, ASP_n^* \rangle\} \quad (9), \end{aligned}$$

где $ASP_1^*, ASP_2^*, \dots, ASP_n^*$ – множество аспектов, принадлежащих антецеденту.

7. Вернуть модифицированный путём внедрения аспектов набор продукционных правил:

Следовательно, БЗ будет представлена следующим множеством правил:

$$\begin{aligned} R^* &= \{rule_1^* \in ant_1^*, \\ &\quad rule_2^* \in ant_2^*, \dots, \\ &\quad rule_n^* \in ant_n^*\} \quad (10). \end{aligned}$$

Рекурсивный алгоритм извлечения аспектов из последовательности фактов (РАИ-алгоритм), базирующийся на ОАИ-алгоритме, позволяет упростить правила БЗ путём выделения аспектов и мета-аспектов.

Особенности полученных в результате применения РАИ-алгоритма правил:

- меньшее количество сквозных фактов, по сравнению с исходным набором правил и с набором правил, полученным путём применения ОАИ-алгоритма;
- высокий уровень абстракции.

Описание РАИ-алгоритма:

1. Выполнить шаги 1 – 7 ОАИ-алгоритма:

В результате БЗ будет представлена множеством правил R^ .*

2. Выполнить поиск мета-аспектов среди отдельных фактов и аспектов:

Согласно (9) каждый антецедент, состоит из пары «множество фактов, для которых не выявлен аспект, множество аспектов, входящих в антецедент».

Мета-аспектом $masp_j$ будем называть пересечение пар отдельных фактов и аспектов или аспектов в независимых антецедентах, т.е.:

$$\begin{aligned} masp_j &= \langle F_1^*, ASP_1^* \rangle \cap \langle F_2^*, ASP_2^* \rangle \vee \\ &\quad \langle F_1^*, ASP_1^* \rangle \cap \langle F_3^*, ASP_3^* \rangle \vee \\ &\quad \langle F_1^*, ASP_1^* \rangle \cap \langle F_4^*, ASP_4^* \rangle \vee \\ &\quad \langle F_2^*, ASP_2^* \rangle \cap \langle F_3^*, ASP_3^* \rangle \vee \\ &\quad \langle F_2^*, ASP_2^* \rangle \cap \langle F_4^*, ASP_4^* \rangle \vee \dots \vee \\ &\quad \langle F_{n-1}^*, ASP_{n-1}^* \rangle \cap \langle F_n^*, ASP_n^* \rangle \quad (11), \end{aligned}$$

где $j \in N$ – номер выявленного мета-аспекта.

3. Исходя из результатов поиска оформить набор мета-аспектов:

Множество мета-аспектов представлено следующим образом:

$$MASP = \{masp_1, masp_2, \dots, masp_l\} \quad (12),$$

где $l \in N$ – количество выявленных мета-аспектов.

4. Выполнить замену фактов в наборе продукционных правил сформированными на предыдущем шаге мета-аспектами:

Каждое множество фактов и каждый аспект отдельных антецедентов, в случае выявления мета-аспекта, уменьшится на количество фактов и аспектов или аспектов, входящих в мета-аспект:

$$\begin{aligned} F_1^{**} &= F_1^* \setminus masp_1 \vee F_1^* \setminus masp_2 \vee \dots \vee F_1^* \setminus masp_l, \\ F_2^{**} &= F_2^* \setminus masp_1 \vee F_2^* \setminus masp_2 \vee \dots \vee F_2^* \setminus masp_l, \dots, \\ F_n^{**} &= F_n^* \setminus masp_1 \vee F_n^* \setminus masp_2 \vee \dots \vee F_n^* \setminus masp_l, \\ ASP_1^{**} &= ASP_1^* \setminus masp_1 \vee ASP_1^* \setminus masp_2 \vee \dots \vee ASP_1^* \setminus masp_l, \\ ASP_2^{**} &= ASP_2^* \setminus masp_1 \vee ASP_2^* \setminus masp_2 \vee \dots \vee ASP_2^* \setminus masp_l, \dots, \\ ASP_n^{**} &= ASP_n^* \setminus masp_1 \vee ASP_n^* \setminus masp_2 \vee \dots \vee ASP_n^* \setminus masp_l \quad (13). \end{aligned}$$

Выполнив замену фактов и аспектов в наборе продукционных правил сформированными на предыдущем шаге мета-аспектами, с учётом обновленного набора фактов и аспектов, получаем множество антецедентов, состоящее из тройки «множество фактов, для которых не выявлен аспект или мета-аспект, множество аспектов, входящих в антецедент, множество мета-аспектов, входящих в антецедент»:

$$\begin{aligned} MASP_1^* &= \{masp_1 \in ant_1 \vee masp_2 \in ant_1 \vee \dots \vee masp_l \in ant_1\}, \\ MASP_2^* &= \{masp_1 \in ant_2 \vee masp_2 \in ant_2 \vee \dots \vee masp_l \in ant_2\}, \dots, \\ MASP_n^* &= \{masp_1 \in ant_n \vee masp_2 \in ant_n \vee \dots \vee masp_l \in ant_n\} \quad (14), \\ ANT^{**} &= \{ant_1^{**} = \langle F_1^{**}, ASP_1^{**}, MASP_1^* \rangle, \\ &\quad ant_2^{**} = \langle F_2^{**}, ASP_2^{**}, MASP_2^* \rangle, \dots, \\ &\quad ant_n^{**} = \langle F_n^{**}, ASP_n^{**}, MASP_n^* \rangle\} \quad (15), \end{aligned}$$

где $MASP_1^*, MASP_2^*, \dots, MASP_n^*$ – множество мета-аспектов, принадлежащих антецеденту.

5. Вернуть модифицированный путём внедрения мета-аспектов набор продукционных правил:

Следовательно, БЗ будет представлена следующим множеством правил:

$$\begin{aligned} R^{**} &= \{rule_1^{**} \in ant_1^{**}, \\ &\quad rule_2^{**} \in ant_2^{**}, \dots, \\ &\quad rule_n^{**} \in ant_n^{**}\} \quad (16). \end{aligned}$$

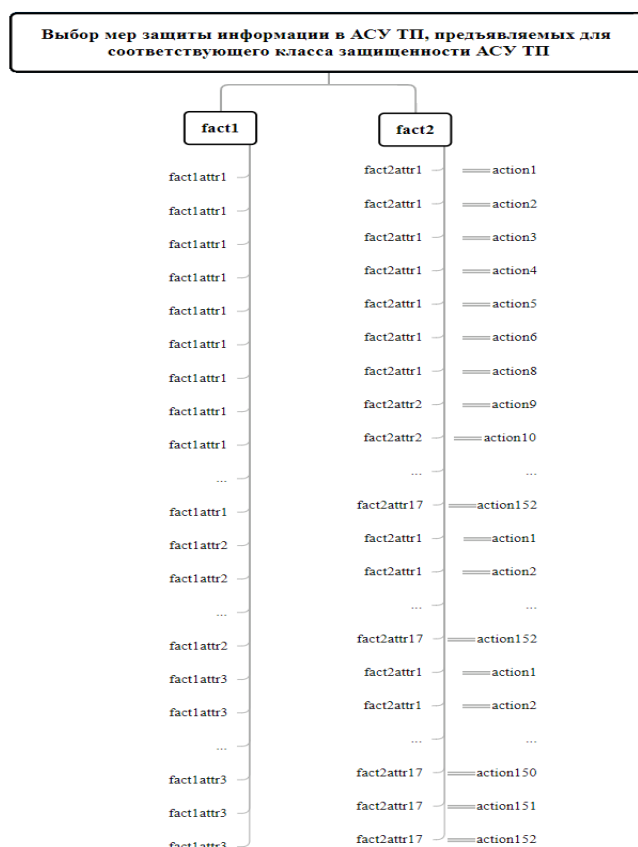
6. Для повышения абстракции повторять шаги 1 – 5, используя множество правил, обновленное внедрением мета-аспектов, полученных после выполнения данных шагов. Повторять до тех пор, пока не будут выявлены все мета-аспекты. Вернуть модифицированный путём рекурсивного внедрения мета-аспектов набор продукционных правил.

Третья глава посвящена анализу критериев повышения скорости вычислительных операций в продукционных экспертных ИС встраиваемого ПО АСУ ТП.

В качестве примера рассматривается продукционная экспертная ИС выбора мер защиты информации в АСУ ТП, предъявляемых для соответствующего класса защищенности АСУ ТП в соответствии с требованиями приказа ФСТЭК России от 14 марта 2014 г. № 31, применяемая

для интеллектуальной поддержки специалистов испытательной лаборатории ЗАО ГИЦ ПС ВТ при сертификации промышленных ИС.

```
ЕСЛИ fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr1 ТО action1;
ЕСЛИ fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr1 ТО action2;
ЕСЛИ fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr1 ТО action3;
ЕСЛИ fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr1 ТО action4;
...
ЕСЛИ fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr14 ТО action135;
ЕСЛИ fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr14 ТО action136;
...
ЕСЛИ fact1=fact1attr2 И fact2=fact2attr11 ТО action101;
ЕСЛИ fact1=fact1attr2 И fact2=fact2attr11 ТО action102;
ЕСЛИ fact1=fact1attr2 И fact2=fact2attr11 ТО action104;
...
ЕСЛИ fact1=fact1attr3 И fact2=fact2attr1 ТО action3;
ЕСЛИ fact1=fact1attr3 И fact2=fact2attr1 ТО action4;
...
ЕСЛИ fact1=fact1attr3 И fact2=fact2attr11 ТО action109;
ЕСЛИ fact1=fact1attr3 И fact2=fact2attr11 ТО action110;
...
ЕСЛИ fact1=fact1attr3 И fact2=fact2attr17 ТО action151;
ЕСЛИ fact1=fact1attr3 И fact2=fact2attr17 ТО action152;
```



На рисунке 3 зафиксированы значения скорости логического вывода в БЗ экспертной ИС из 322 правил. На оси у отмечено время выполнения поиска решения в микросекундах, на оси x отмечены номера проведенных тестов.

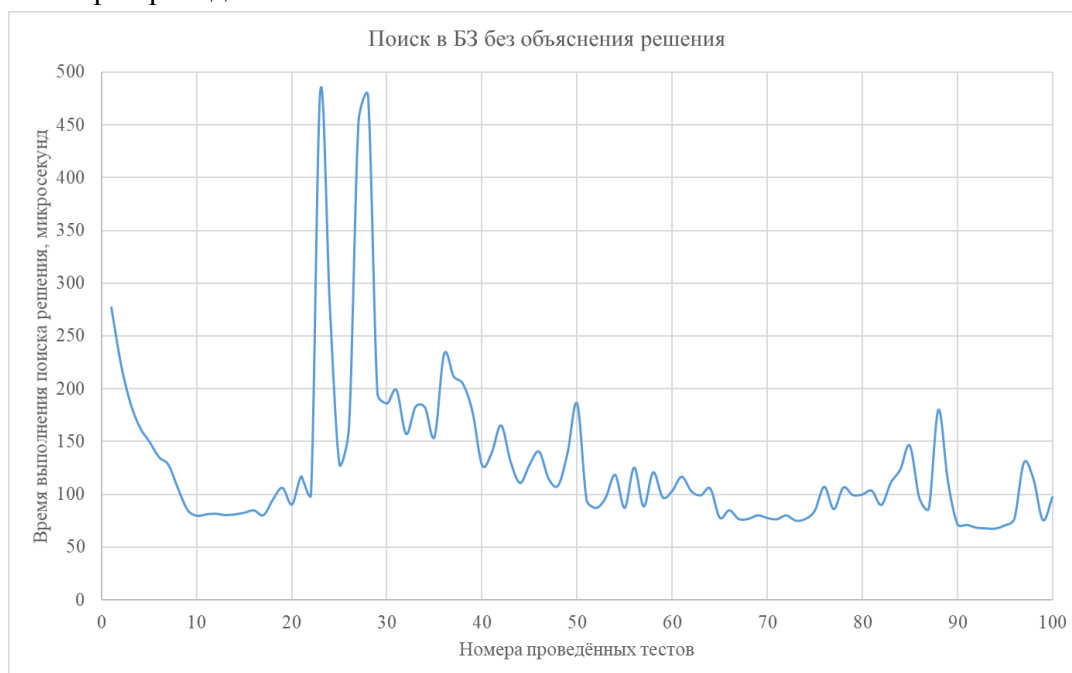


Рисунок 3. Зафиксированное значение скорости поиска в БЗ

В качестве критериев повышения скорости вычислительных операций экспертами (D. Tarditi, G. Morrisett, P. Cheng, C. Stone, R. Harper, P. Lee, D. Volpano, G. Smith) выделяются:

- уменьшение занимаемого вычислительным процессом объема памяти;
- совершенствование алгоритмов выполнения вычислительных операций;
- уменьшение задержек при передаче информации;
- устранение дублирования информации (нормализация);
- распараллеливание вычислительных процессов.

Исходя из приведённых критериев на скорость логического вывода в БЗ экспертной ИС в большей мере влияют критерии, приведённые в таблице 1.

Таблица 1. Основные критерии, влияющие на скорость логического вывода в БЗ экспертной ИС

№ п/п	Критерий	Описание
1	Скорость формирования	Скорость формирования продукционных правил
2	Занимаемый объем памяти	Объем памяти занимаемый массивом продукционных правил
3	Затраты времени	Затраты времени на логический вывод

Данные критерии будут учитываться в МАИ для определения лучшей из альтернатив.

Далее в данной главе представлены результаты применения разработанных ранее алгоритмов решения задачи повышения скорости вычислительных операций в продукционных экспертных ИС на рассматриваемом примере.

В частности, в листинге 2 представлен набор продукционных правил, с учетом выделенных объектов правил и объектов действий, после применения ОАИ-алгоритма.

```

ЕСЛИ aspect1 TO action1;
ЕСЛИ aspect1 TO action2;
ЕСЛИ aspect1 TO action3;
ЕСЛИ aspect1 TO action4;

```

```

ЕСЛИ aspect1 ТО action5;
ЕСЛИ aspect1 ТО action6;
ЕСЛИ aspect1 ТО action8;
ЕСЛИ aspect2 ТО action9;
...
ЕСЛИ aspect4 ТО action41;
ЕСЛИ aspect4 ТО action43;
ЕСЛИ aspect4 ТО action44;
ЕСЛИ aspect4 ТО action45;
ЕСЛИ aspect4 ТО action47;
ЕСЛИ aspect5 ТО action49;
ЕСЛИ aspect5 ТО action50;
ЕСЛИ aspect5 ТО action51;
ЕСЛИ aspect5 ТО action53;
...
aspect1 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr1]
aspect2 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr2];
aspect3 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr4];
aspect4 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr5];
aspect5 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr6];
...

```

Листинг 2. Фрагмент набора продукционных правил после применения ОАИ-алгоритма

Граф логического вывода для набора продукционных правил после применения ОАИ-алгоритма представлен на рисунке 4.

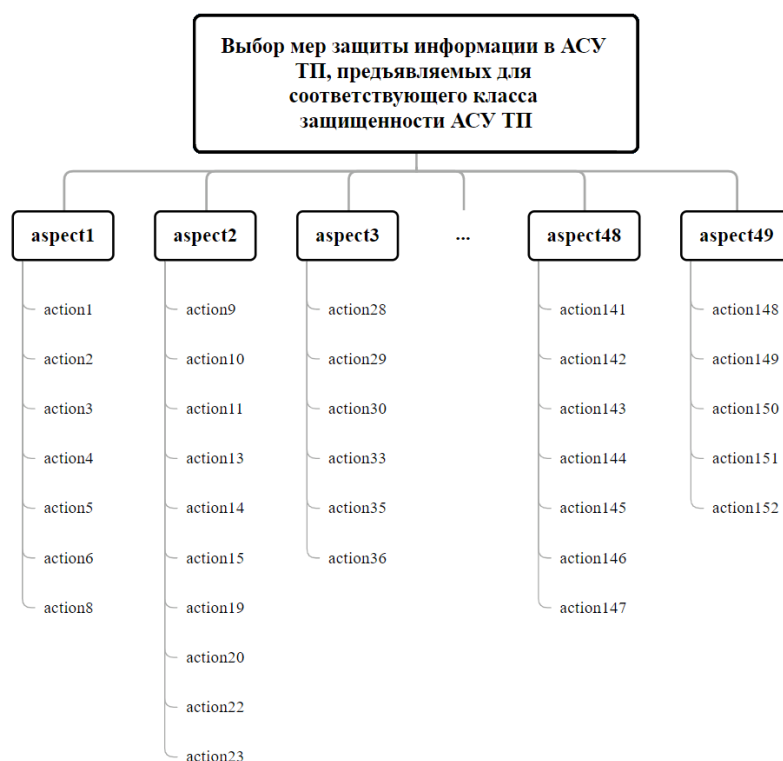


Рисунок 4. Граф логического вывода для набора продукционных правил после применения ОАИ-алгоритма

В листинге 3 представлен набор продукционных правил, с учетом выделенных объектов правил и объектов действий, после применения РАИ-алгоритма.

```

ЕСЛИ aspect50 ТО action1 И action2 И action3 И action4 И action5 И action6 И action8;
ЕСЛИ aspect51 ТО action9 И action10 И action11 И action13 И action14 И action15 И action19 И action20 И action22 И action23;
ЕСЛИ aspect52 ТО action28 И action29 И action30 И action33 И action35 И action36;
...
ЕСЛИ aspect54 ТО action49 И action50 И action51 И action53;
ЕСЛИ aspect55 ТО action58 И action59;

```

```

...
aspect1 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr1]
aspect2 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr2];
aspect3 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr4];
aspect4 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr5];
aspect5 = [fact1=fact1attr1 И fact2=fact2attr6];
...
aspect53 = _[aspect4];
aspect54 = _[aspect5];
...
aspect78 = _[aspect29];
aspect79 = _[aspect30];
aspect80 = _[aspect31];
aspect81 = _[aspect32];
aspect82 = _[aspect33];
...
aspect95 = _[aspect46];
aspect96 = _[aspect47];
aspect97 = _[aspect48];
aspect98 = _[aspect49];

```

Листинг 3. Фрагмент набора продукционных правил после применения РАИ-алгоритма

Граф логического вывода для набора продукционных правил после применения РАИ-алгоритма представлен на рисунке 5.

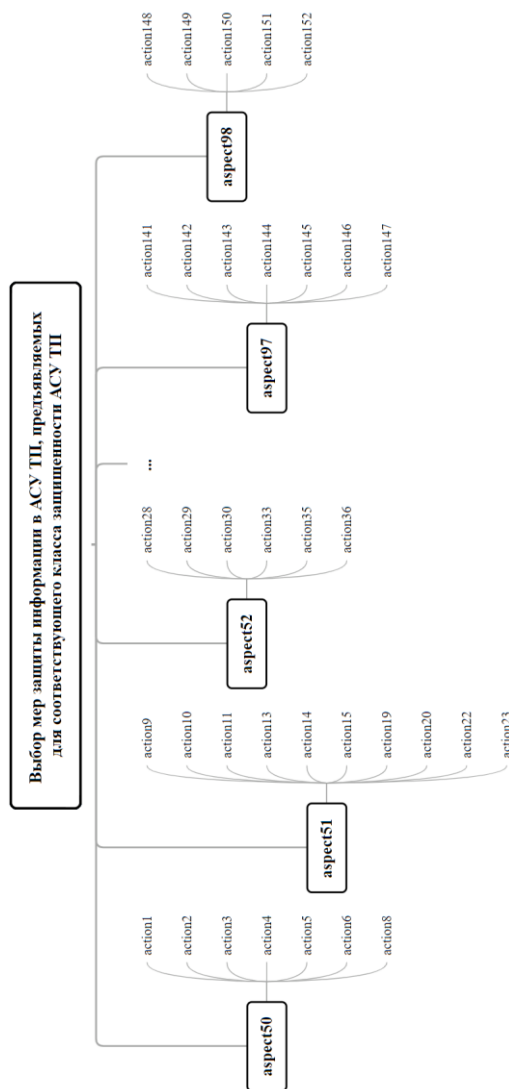


Рисунок 5. Граф логического вывода для набора продукционных правил после применения РАИ-алгоритма

Для поддержки принятия решения при выборе алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов в зависимости от количества правил в БЗ экспертной ИС описывается использование метод анализа иерархий (МАИ). Данный метод позволяет выразить проблему выбора в виде иерархии. В наиболее распространенном случае иерархия состоит из вершины – цели, промежуточного уровня – критериев (технико-экономических параметров) и нижнего уровня – набора альтернатив.

После иерархического воспроизведения проблемы устанавливаются приоритеты критериев и оценивается каждая из альтернатив по критериям. В МАИ элементы задачи сравниваются попарно по отношению к их воздействию на общую для них характеристику.

Результат парных сравнений образует обратносимметричную матрицу. Элементом матрицы $a(i, j)$ является интенсивность проявления элемента иерархии i относительно элемента иерархии j .

Для фиксации интенсивности используется шкала отношений Саати:

1 – равная важность;

3 – умеренное превосходство одного над другим;

5 – существенное превосходство;

7 – значительное превосходство;

9 – очень сильное превосходство;

2, 4, 6, 8 – промежуточное решение между двумя соседними суждениями.

В МАИ элементы $a(i, j)$ должны соответствовать следующим правилам:

– если при сравнении одного фактора i со вторым фактором j получено $a(i, j) = b$, то при сравнении второго фактора с первым получаем $a(j, i) = 1/b$.

– для всех i значение элемента матрицы $a(i, j) = 1$.

Согласно описанным правилам матрица парных сравнений $\bar{A}$ имеет вид:

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 1 & A_1 & \dots & A_n \\ A_1 & 1 & \dots & W_1/W_n \\ \dots & \dots & 1 & A_n \\ A_n & W_n/W_1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (17),$$

где $A_1, A_2, \dots, A_n$ – множество элементов матрицы парных сравнений, $W_1, W_2, \dots, W_n$ – интенсивность проявления элемента.

Оценка компонентов вектора приоритетов производится по следующим формулам:

Собственный вектор:

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 1 & A_1 & \dots & A_n \\ A_1 & 1 & \dots & W_1/W_n \\ \dots & \dots & 1 & A_n \\ A_n & W_n/W_1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} X_1 &= \sqrt[n]{1 * W_1/W_2 * \dots * W_1/W_n} \\ X_n &= \sqrt[n]{W_n/W_1 * \dots * 1} \end{aligned} \quad (18).$$

Вектор приоритетов:

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 1 & A_1 & \dots & A_n \\ A_1 & 1 & \dots & W_1/W_n \\ \dots & \dots & 1 & A_n \\ A_n & W_n/W_1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} X_1 / \sum_{i=1}^n X_i \\ X_n / \sum_{i=1}^n X_i \end{aligned} \quad (19).$$

Далее вычисляются максимальное собственное значение λ_{max} , индекс согласованности ИС и отношение согласованности ОС.

Максимальное собственное значение λ_{max} вычисляется как сумма произведений суммы столбцов матрицы попарных сравнений на величину соответствующего вектора приоритетов.

Индекс согласованности ИС необходим для проверки степени согласованности и вычисляется по формуле:

$$ИС = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (20).$$

Отношение согласованности ОС определяется из отношения индекса согласованности на число, соответствующее случайной согласованности СС матрицы того же порядка, что и исходная матрица попарных сравнений:

$$ОС = ИС / СС \quad (21).$$

Значения случайной согласованности представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения случайной согласованности

Размер матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайная согласованность	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Величина ОС должна быть порядка 10 % или менее. Иначе величина ОС не является приемлемой и необходимо перепроверить суждения.

Значение глобального приоритета для каждой из альтернатив подсчитывается как сумма произведений значения вектора приоритета для критерия и значений вектора локального приоритета этой альтернативы в отношении данного критерия.

Предложенный подход дает объективную оценку при выборе алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов в зависимости от количества правил в БЗ экспертной ИС.

Рассматривается применение МАИ для поддержки принятия решения при выборе алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов в зависимости от количества правил в БЗ экспертной ИС: 10, 25, 50, 100, 250, 500 и 1000 продукционных правил.

Подробно рассматривается применение МАИ для БЗ экспертной ИС состоящей из 10 продукционных правил.

Этап 1. Структуризация задачи в виде иерархической структуры с несколькими уровнями

Связь между целью, критериями оценивания и альтернативами образуют иерархическую структуру. Целью является выбор алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов, альтернативами – разработанные алгоритмы, а критериями оценивания – выбранные на первом этапе анализа характеристики: скорость формирования, занимаемый объем памяти, затраты времени.

На рисунке 6 представлена иерархическая структура проблемы выбора алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов.

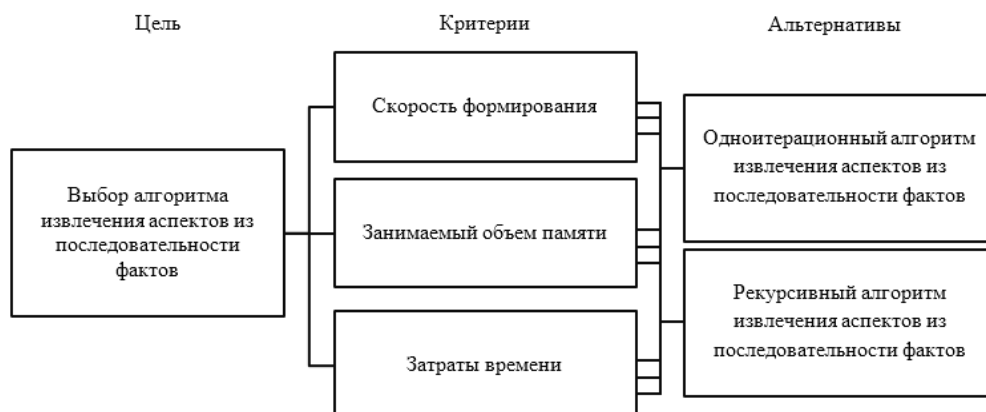


Рисунок 6. Иерархическая структура проблемы

Этап 2. Выполнение попарных сравнений критериев

Результаты сравнения пары критериев представлены в таблице 3.

Таблица 3. Матрица попарных сравнений критериев

<i>Критерий</i>	Скорость формирования	Занимаемый объем памяти	Затраты времени
Скорость формирования	1/1	2/1	5/1
Занимаемый объем памяти	1/2	1/1	4/1
Затраты времени	1/5	1/4	1/1

Этап 3. Вычисление коэффициентов важности для критериев

Полученные согласно формулам (18) и (19) значения собственных векторов и векторов приоритетов для критериев представлены в таблице 4.

Таблица 4. Значения собственных векторов и векторов приоритетов для критериев

<i>Критерий</i>	Скорость формирования	Занимаемый объем памяти	Затраты времени	<i>Собственный вектор</i>	<i>Вектор приоритетов</i>
Скорость формирования	1,000	2,000	5,000	2,154	0,570
Занимаемый объем памяти	0,500	1,000	4,000	1,260	0,333
Затраты времени	0,200	0,250	1,000	0,368	0,097
Итого	1,700	3,250	10,000	3,783	1,000

Сумма значений векторов приоритетов равна 1, значит нормализация (составление векторов приоритетов) выполнена корректно.

Определим величину отношения согласованности ОС, используя формулы (20) и (21).

$$\lambda_{max} = 0,570 * 1,700 + 0,333 * 3,250 + 0,097 * 10,000 = 3,025,$$

$$ИС = (3,025 - 3) / (3 - 1) = 0,012, ОС = 0,012 / 0,580 = 0,021 = 2,1\%,$$

где 0,580 – значение случайной согласованности ОС для $n = 3$.

Величина $ОС = 2,1\% < 10\%$, что является приемлемым результатом, значит перепроверять суждения не нужно.

Сравнивая нормализованные оценки векторов приоритетов, можно сделать вывод, что для 10 продукционных правил наибольшее значение при выборе алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов придается критерию «Скорость формирования».

Этап 4. Выполнение попарных сравнений альтернатив

Результаты сравнения пары альтернатив для критерия «Скорость формирования» представлены в таблице 5. Результаты сравнения пары альтернатив для критерия «Занимаемый объем памяти» представлены в таблице 6. Результаты сравнения пары альтернатив для критерия «Затраты времени» представлены в таблице 7.

Таблица 5. Матрица попарных сравнений альтернатив для критерия «Скорость формирования»

<i>«Скорость формирования»</i>	Без применения алгоритма	ОАИ-алгоритм	РАИ-алгоритм
Без применения алгоритма	1/1	3/1	4/1
ОАИ-алгоритм	1/3	1/1	2/1
РАИ-алгоритм	1/4	1/2	1/1

Таблица 6. Матрица попарных сравнений альтернатив для критерия «Занимаемый объём памяти»

«Занимаемый объём памяти»	Без применения алгоритма	ОАИ-алгоритм	РАИ-алгоритм
Без применения алгоритма	1/1	1/5	1/5
ОАИ-алгоритм	5/1	1/1	2/1
РАИ-алгоритм	5/1	1/2	1/1

Таблица 7. Матрица попарных сравнений альтернатив для критерия «Затраты времени»

«Затраты времени»	Без применения алгоритма	ОАИ-алгоритм	РАИ-алгоритм
Без применения алгоритма	1/1	1/8	1/7
ОАИ-алгоритм	8/1	1/1	3/1
РАИ-алгоритм	7/1	1/3	1/1

Этап 5. Вычисление коэффициентов важности для альтернатив

Полученные согласно формулам (18) и (19) значения собственных векторов и векторов приоритетов альтернатив для критерия «Скорость формирования» представлены в таблице 8, для критерия «Занимаемый объём памяти» представлены в таблице 9, для критерия «Затраты времени» представлены в таблице 10.

Таблица 8. Значения собственных векторов и векторов приоритетов альтернатив для критерия «Скорость формирования»

«Скорость формирования»	Без применения алгоритма	ОАИ-алгоритм	РАИ-алгоритм	Собственный вектор	Вектор приоритетов
Без применения алгоритма	1,000	3,000	4,000	2,289	0,625
ОАИ-алгоритм	0,333	1,000	2,000	0,874	0,238
РАИ-алгоритм	0,250	0,500	1,000	0,500	0,136
Итого	1,580	4,500	7,000	3,663	1,000

Сумма значений векторов приоритетов равна 1, значит нормализация (составление векторов приоритетов) выполнена корректно.

Определим величину отношения согласованности ОС, используя формулы (20) и (21).

$$\lambda_{\max} = 0,625 * 1,580 + 0,238 * 4,500 + 0,136 * 7,000 = 3,018,$$

$$\text{ИС} = (3,018 - 3) / (3 - 1) = 0,009, \text{ОС} = 0,009 / 0,580 = 0,016 = 1,6\%,$$

где 0,580 – значение случайной согласованности ОС для $n = 3$.

Величина ОС = 1,6 % < 10 %, что является приемлемым результатом, значит перепроверять суждения не нужно.

Таблица 9. Значения собственных векторов и векторов приоритетов альтернатив для критерия «Занимаемый объём памяти»

«Занимаемый объём памяти»	Без применения алгоритма	ОАИ-алгоритм	РАИ-алгоритм	Собственный вектор	Вектор приоритетов
Без применения алгоритма	1,000	0,200	0,200	0,342	0,089
ОАИ-алгоритм	5,000	1,000	2,000	2,154	0,559
РАИ-алгоритм	5,000	0,500	1,000	1,357	0,352
Итого	11,000	1,700	3,200	3,854	1,000

Сумма значений векторов приоритетов равна 1, значит нормализация (составление векторов приоритетов) выполнена корректно.

Определим величину отношения согласованности ОС, используя формулы (20) и (21).

$$\lambda_{max} = 0,089 * 11,000 + 0,559 * 1,700 + 0,352 * 3,200 = 3,054,$$

$$ИС = (3,054 - 3) / (3 - 1) = 0,027, ОС = 0,027 / 0,580 = 0,046 = 4,6\%,$$

где 0,580 – значение случайной согласованности ОС для $n = 3$.

Величина ОС = 4,6 % < 10 %, что является приемлемым результатом, значит перепроверять суждения не нужно.

Таблица 10. Значения собственных векторов и векторов приоритетов альтернатив для критерия «Затраты времени»

«Затраты времени»	Без применения алгоритма	ОАИ-алгоритм	РАИ-алгоритм	Собственный вектор	Вектор приоритетов
Без применения алгоритма	1,000	0,125	0,143	0,261	0,058
ОАИ-алгоритм	8,000	1,000	3,000	2,884	0,645
РАИ-алгоритм	7,000	0,333	1,000	1,326	0,297
Итого	16,000	1,460	4,140	4,472	1,000

Сумма значений векторов приоритетов равна 1, значит нормализация (составление векторов приоритетов) выполнена корректно.

Определим величину отношения согласованности ОС, используя формулы (20) и (21).

$$\lambda_{max} = 0,058 * 16,000 + 0,645 * 1,460 + 0,297 * 4,140 = 3,104,$$

$$ИС = (3,104 - 3) / (3 - 1) = 0,052, ОС = 0,052 / 0,580 = 0,090 = 9,0\%,$$

где 0,580 – значение случайной согласованности ОС для $n = 3$.

Величина ОС = 9,0 % < 10 %, что является приемлемым результатом, значит перепроверять суждения не нужно.

Этап 6. Определение наилучшей альтернативы

Значение глобального приоритета для каждой из альтернатив подсчитывается как сумма произведений значения вектора приоритета для критерия и значений вектора локального приоритета этой альтернативы в отношении данного критерия.

Рассчитанное значение глобального приоритета для каждой из альтернатив представлено в таблице 11.

Таблица 11. Определение наилучшей альтернативы

Определение наилучшей альтернативы	Критерии			Глобальные приоритеты
Альтернативы	Скорость формирования	Занимаемый объем памяти	Затраты времени	
	Значение вектора приоритета			
	0,570	0,333	0,097	
Без применения алгоритма	2,289	0,342	0,261	
ОАИ-алгоритм	0,874	2,154	2,884	1,496
РАИ-алгоритм	0,500	1,357	1,326	0,866

Выбранной считается альтернатива с максимальным значением глобального приоритета. Таким образом, для БЗ экспертной ИС состоящей из 10 продукционных правил, необходимо выбрать ОАИ-алгоритм.

Повторив данные вычисления для БЗ экспертной ИС из 25, 50, 100, 250, 500 и 1000 продукционных правил, получена гистограмма, отображающая выбранные значения глобальных приоритетов, представленная на рисунке 7.

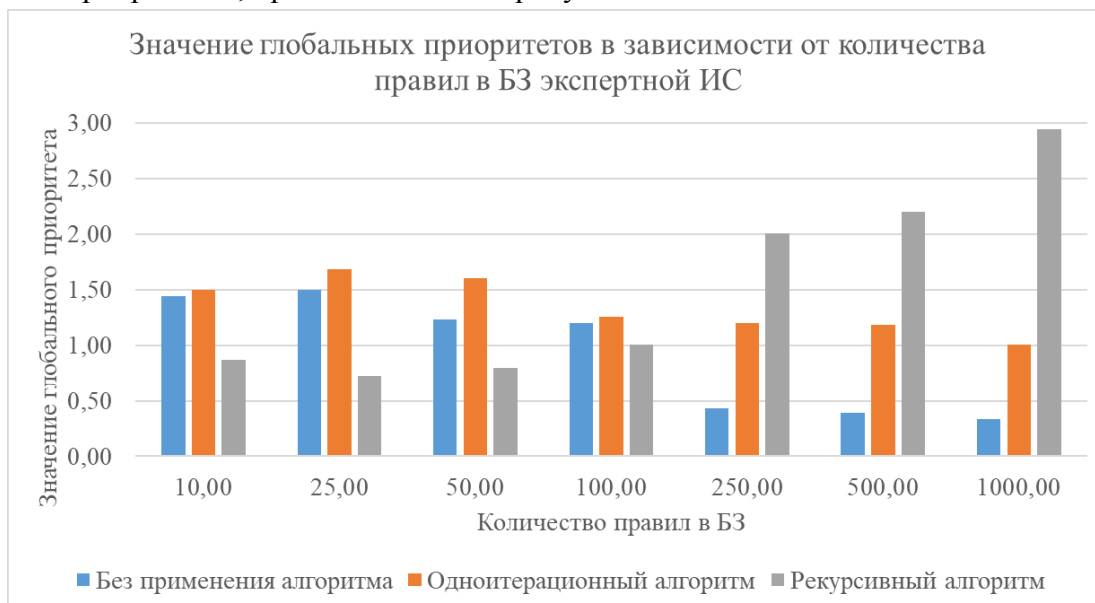


Рисунок 7. Гистограмма, отображающая выбранные значения глобальных приоритетов для БЗ экспертной ИС из 10, 25, 50, 100, 250, 500 и 1000 продукционных правил

Из данной гистограммы видно, что с увеличением количества продукционных правил в БЗ экспертной ИС до 250 правил, лучше всего начинает себя проявлять РАИ-алгоритм.

Получены в общем случае результаты представлены в таблице 12.

Таблица 12. Результаты выбора алгоритма извлечения аспектов из последовательности фактов в зависимости от количества правил в БЗ экспертной ИС

№ п/п	Количество продукционных правил	Рекомендуемый алгоритм
1	10	ОАИ-алгоритм
2	25	ОАИ-алгоритм
3	50	ОАИ-алгоритм
4	100	ОАИ-алгоритм
5	250	ОАИ-алгоритм
6	500	РАИ-алгоритм
7	1000	РАИ-алгоритм

На рисунке 8 зафиксированы значения скорости логического вывода в БЗ экспертной ИС из 59 правил после применения, выбранного через МАИ для заданного количества продукционных правил, ОАИ-алгоритма. На оси у отмечено время выполнения поиска решения в микросекундах, на оси x отмечены номера проведенных тестов.

Сравнение значений скорости логического вывода в БЗ экспертной ИС из 59 правил до и после применения ОАИ-алгоритма представлено на рисунке 9.



Рисунок 8. Зафиксированное значение скорости поиска в БЗ после применения ОАИ-алгоритма



Рисунок 9. Сравнение значений скорости логического вывода в БЗ экспертной ИС из 59 правил до и после применения ОАИ-алгоритма

В четвертой главе представлено описание прототипа подсистемы интерпретации продукционных правил экспертной ИС, применяемого при сертификации встраиваемого ПО АСУ ТП, базирующегося на применении АО-подхода и предложена последовательность интерпретации продукционных правил.

Представлено изменение классической статической модели экспертной ИС в части интерпретации продукционных правил, базирующееся на применении АО-подхода (Рисунок 10).

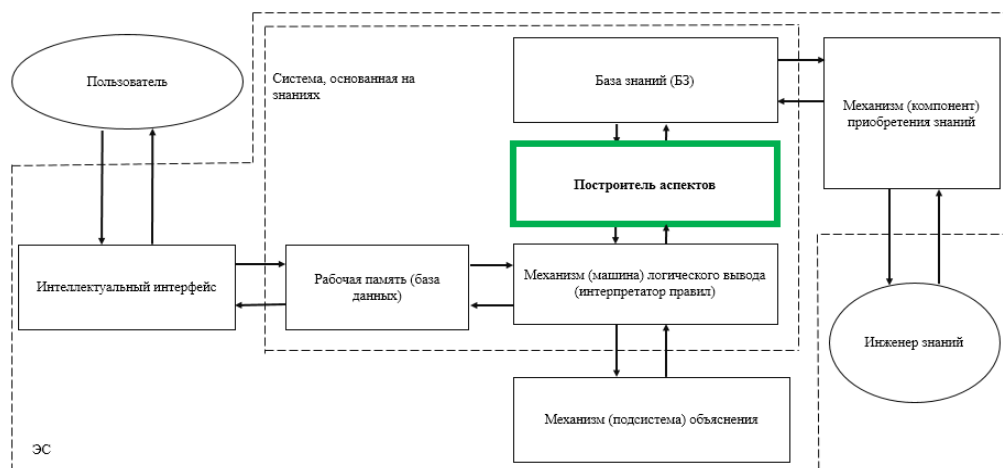


Рисунок 10. Модель экспертной ИС с применением АО-подхода

В модель экспертной ИС добавляется новый элемент – построитель аспектов, преобразующий исходный набор продукционных правил в новый набор с использованием одного из алгоритмов извлечения аспектов из последовательности фактов. Выбор подходящего алгоритма осуществляется с использованием МАИ. С учётом требования, касающегося отсутствия переработки исходной структуры БЗ и БД экспертной ИС, построитель аспектов:

- загружает из БД исходный набор продукционных правил;
- в интерпретатор правил передаёт набор правил, реорганизованных при помощи одного из алгоритмов извлечения аспектов;
- сохраняет в БД исходный набор продукционных правил, сделав обратное преобразование, реорганизованных при помощи одного из алгоритмов извлечения аспектов, продукционных правил.

Прототип реализован с помощью технологии Spring Boot. Подключение к БД экспертной ИС происходит с помощью протокола JDBC. Получение реорганизованного при помощи одного из алгоритмов извлечения аспектов и сохранение исходного набора правил выполняется в соответствии с REST-подходом.

В **заключении** представлены основные выводы и результаты диссертационной работы. Рассматривается вопрос перспектив дальнейшего практического применения основных результатов исследования.

Перспективой развития данного исследования рассматривается вариант использования разработанных алгоритмов в работе экспертных ИС систем обнаружения вторжений (IPS, Intrusion Prevention System). Сокращение количества операций при поиске решения и избавление от перебора всех фактов позволит увеличить скорость реакции на инциденты, что для систем обнаружения вторжений является важным.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включенных в список ВАК:

1. Гончаров, А.А. Аспектно-ориентированное программирование в контексте решения вопросов повышения эффективности экономических показателей IT-проектов / А.А. Гончаров, Н.А. Семенов // Программные продукты и системы. – 2016. – № 3.
2. Гончаров, А.А. Повышение скорости логического вывода продукционных экспертных систем путём использования аспектно-ориентированного подхода / А.А. Гончаров, Н.А. Семенов // Программные продукты и системы. – 2018. – № 3.

Статьи в изданиях, не включенных в список ВАК:

1. Гончаров, А.А. Модель доступа к информационным ресурсам предприятия с помощью подсистемы Oracle Entitlements Server на примере модуля безопасности IBM WebSphere / А.А. Гончаров // Сборник научных трудов XII-ой Международной научно-практической конференции «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности» (МНПК «ЛЭРЭП-9-2015»). – 2015. – Т. 3.
2. Гончаров, А.А. Использование нового стандарта ГОСТ Р 56939–2016 как основной шаг к безрисковой сертификации средств защиты информации / А.А. Гончаров // Материалы научно-практической конференции «Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов ТвГТУ», приуроченной ко Дню российской науки. – 2017. – Т. 3.
3. Гончаров, А.А. Аспектно-ориентированный подход как метод повышения скорости логического вывода продукционных экспертных систем / А.А. Гончаров // Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям («IS&IT'18»). – 2018. – Т. 1.
4. Гончаров, А.А., Семенов, Н.А. Повышение скорости логического вывода в экспертной системе / А.А. Гончаров, Н.А. Семенов // Научный журнал «Мягкие измерения и вычисления». – 2018. – №. 8.
5. Гончаров, А.А. Применение аспектно-ориентированного подхода в экспертных системах промышленного назначения / А.А. Гончаров, Н.А. Семенов // IX-ая Международная научно-практическая конференция «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». – 2019.