

Васильев Николай Владимирович

**МОДЕЛИ И МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ  
ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

Специальности: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель –  
Заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор Яшин А. И.

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор Душин С. Е.  
кандидат технических наук, доцент Раков И. В.

Ведущая организация – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)

Защита диссертации состоится «02» ноября 2009 г. в 14:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.07 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «01» октября 2009 г.

Ученый секретарь  
совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций

Цехановский В. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современные концепции управления сложными распределенными системами в различных отраслях человеческой деятельности (например, энергетика, транспортная логистика, системы связи, grid - системы и т.д.), базируются на парадигме человеко-машинной организации процессов управления, в которой роль принятия решений отводится человеку, а машина обеспечивает информационную поддержку этапов выработки и генерации альтернативных вариантов решений. Использование данного подхода является вынужденной мерой преодоления высокого уровня неопределенности условий решения задач управления сложными, нелинейными и динамическими объектами. При этом эффективность систем управления во многом определяется субъективными свойствами человека (группы лиц) действующего в контуре управления, что в свою очередь требует от него (них) высокого уровня компетенции в возникающих проблемных ситуациях. Известным и широко используемым методом преодоления субъективности и повышения уровня компетентности человека в принятии управляющих решений является использование систем поддержки принятия решений (СППР). СППР обеспечивают корректность решения задач выбора предпочтительных (рациональных) вариантов управления за счет инфокоммуникационной поддержки конечного пользователя на различных этапах его деятельности при помощи совокупности технологически взаимосвязанных сервисов, реализующих традиционные и перспективные информационные технологии. Основным недостатком известных подходов к построению СППР для управления распределенными объектами (РОУ) является отсутствие в них механизмов реструктуризации, срабатывающих в случае возникновения непредвиденных ситуаций структурных изменений РОУ, которые, в свою очередь, обуславливают частичную деградацию структур СППР. Примером таких структурных изменений РОУ могут служить:

- аварии на энергосетях, приводящие к частичному уничтожению структурных элементов (серверов) корпоративной СППР;
- изменения структурной топологии (аварии на узлах и пунктах управления) полевых сетей связи МЧС, МО РФ в условиях ликвидации чрезвычайных ситуаций и локальных конфликтов, соответственно;
- изменения структурной топологии сети в результате ее интеграции с другими сетями связи, приводящие к необходимости изменения структуры объединенной СППР.

Однако, несмотря на значительное количество работ отечественных и зарубежных научных школ и ученых в этой предметной области, до сих пор отсутствует системная проработка вопросов самоорганизации частично деградировавшей структуры СППР для управления РОУ в условиях его структурной деградации с целью обеспечения требуемого (или приемлемого для достижения цели) качества информационной поддержки процессов выработки и принятия решений.

Данное противоречие делает актуальным направление выполненных исследований, сформулированных в виде научной задачи разработки моделей и метода построения мультиагентных систем поддержки принятия решений для управления распределенными объектами.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является улучшение научно-методического аппарата ситуационного анализа и методов построения мультиагентных СППР для управления распределенными объектами с

динамически изменяемой структурой. В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Системный анализ задачи реструктуризации СППР для управления РОУ с динамически изменяемой структурой;
2. Разработка модели поведения элементов РОУ, обеспечивающей получение верифицируемой автоматной модели поведения распределенного объекта;
3. Разработка метода автоматического получения используемой в задачах диагностики модели причинно-следственных зависимостей между событиями, порождаемыми элементами РОУ;
4. Разработка модели и алгоритма реструктуризации СППР при возникновении параметрических и структурных изменений распределенного объекта управления;
5. Построение макета типовой мультиагентной СППР для управления РОУ и оценка эффективности предлагаемых решений.

**Объектом исследования** являются мультиагентные системы поддержки принятия решений для управления распределенными объектами.

**Предметом исследования** являются модели и алгоритмы построения мультиагентных систем поддержки принятия решений для управления распределенными объектами.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач используются методы системного анализа, математической логики, дискретной математики, теории комплексного системного проектирования.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель поведения элементов РОУ на основе алгебры процессов Милнера.
2. Метод получения графов зависимостей событий на основе алгебры процессов Милнера.
3. Модель и алгоритм реструктуризации СППР при возникновении структурных и параметрических изменений РОУ.

**Научная новизна работы** заключается в том, что в ней разработана модель поведения элементов РОУ, метод получения графов зависимостей событий на основе алгебры процессов Милнера и на их основе предложены, реализованы и исследованы модель и алгоритм реструктуризации СППР при возникновении структурных и параметрических изменений РОУ.

1. Модель поведения элементов РОУ отличается использованием для моделирования поведения элементов РОУ ограниченного набора классов выражений алгебры процессов Милнера (источники, проводники, стоки событий), являющихся символической формой задания автоматов. Каждому классу онтологии РОУ приписывается выражение алгебры, моделирующее его поведение. В дальнейшем, при наличии актуализированной структуры РОУ, результирующее выражение, описывающее поведение РОУ может быть получено из выражений, описывающих поведение его компонентов за счет применения оператора композиции “|” алгебры Милнера. Это позволяет получить формальное представление свертки траекторного многообразия РОУ для последующего его анализа средствами моделирования.

2. Метод получения графов зависимостей событий отличается использованием для порождения целевого графа зависимостей событий модифицированного автоматного представления (на основе алгебры процессов Милнера) их возможной логики в ограничениях онтологии структуры РОУ, что позволяет получить ве-

рифицируемые модели поведения объекта управления. Переход от выражения алгебры процессов Милнера, описывающего поведение РОУ к целевому представлению на основе графов зависимостей событий осуществляется на основе доказанного в работе утверждения, определяющего необходимые и достаточные условия такого перехода.

3. Модель и алгоритм реструктуризации СППР для управления РОУ в условиях его структурной деградации с целью обеспечения требуемого (или приемлемого для достижения цели) качества информационной поддержки процессов выработки и принятия решений отличаются использованием модифицированной при помощи “имитации отжига” контрактной сети агентов. Алгоритм предполагает введение глобального показателя “температура” сети агентов. Под “температурой” понимается совокупность показателей, характеризующих количество элементов в модели РОУ, определяющих неопределенность решения задачи выбора варианта реструктуризации, а также количество узлов тяготения (мест размещения моделей элементов РОУ).

**Практическая значимость.** Разработанные в диссертации основные научные положения, рекомендации и алгоритмы являются базой для научно-методического аппарата проектирования мультиагентных СППР для управления РОУ с динамически перестраиваемой структурой, разработанных и внедренных в двух промышленных НИР и одной ОКР.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ (2006 – 2009 гг.);
- военно-научной конференции “Информационная технология в радиоэлектронных системах”, 2007 г. (г. Горелово);
- на седьмой всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления», 2008 г. (г. Калуга).

**Публикации:** По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них – 4 статьи (2 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК), 3 работы – в материалах всероссийских научно-технических конференций.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав с выводами, заключения, списка использованной литературы, включающего 116 наименований, и трех приложений. Основная часть диссертации изложена на 143 страницах машинописного текста. Работа содержит 39 рисунков и 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, сформулированы основные положения и научные результаты, выносимые на защиту, дана краткая характеристика их новизны, достоверности и практической ценности.

**В первой главе** проведен анализ сложных распределенных систем как объектов управления. Рассмотрены основные подходы к построению СППР для управления распределенными объектами, а также проанализированы основные подходы к повышению их эффективности. Предложен подход к построению пер-

спективной мультиагентной СППР для управления РОУ с динамически изменяемой структурой.

Выявлено, что основными проблемами в цикле управления РОУ являются динамика структуры объекта и сложность причинно-следственных связей протекающих временных процессов. Эти особенности позволяют характеризовать РОУ как объект с высокой размерностью изменяемого во времени пространства состояний. Комплексный характер событий РОУ приводит к необходимости наличия средств логической фильтрации, позволяющих осуществить свертку множества событий до их базового первичного ядра. Воздействия, приводящие к изменению структуры объекта, вызывают в свою очередь деградацию структурных и динамических моделей РОУ, используемых СППР. С целью обеспечения требуемого (или приемлемого для достижения цели) качества информационной поддержки процессов выработки и принятия решений необходимо наличие механизмов, позволяющих осуществить компенсацию данных воздействий и поддержку адекватного состояния моделей структуры и динамики РОУ.

При ограничениях, налагаемых динамикой структуры РОУ, предложена обобщенная схема получения событийной модели РОУ, используемой в процессе логической фильтрации. Данная схема предполагает сочетание двух методов логической фильтрации событий: обладающего свойствами гибкости по отношению к структуре РОУ и верифицируемостью автоматного метода и метода фильтрации на основе графов зависимостей событий, позволяющих добиться компактного и эффективного представления динамики РОУ.

Показано, что двухслойная архитектура СППР, предполагающая сочетание иерархического и децентрализованного подходов к организации, позволяет учесть высокую размерность изменяемого во времени пространства состояний РОУ. Первичность процесса компенсации структурных изменений РОУ по отношению к процессу выработки решения предопределяет верхний управляющий слой, как обеспечивающий решение задачи реструктуризации. Децентрализованный подход к построению как верхнего, так и нижнего слоя учитывает распределенный характер объекта управления. На основании изложенного, предложена архитектура перспективной мультиагентной СППР для управления распределенным объектом. Использование мультиагентного подхода обусловлено тем, что глобальная цель обеспечения качества информационной поддержки процессов выработки и принятия решений в рамках распределенной СППР, может быть декомпозирована на совокупность подцелей обеспечения информационной поддержки в рамках узловых СППР. Архитектура перспективной мультиагентной СППР для управления распределенным объектом представлена на рисунке 1. Основу системы составляет сеть узловых СППР, ответственных за мониторинг фрагментов РОУ. Особенностью СППР является наличие 2-х типов агентов: пользовательских агентов, позволяющих снизить нагрузку на администратора за счет сохранения наиболее важных схем обработки данных и системных агентов. Системные агенты в свою очередь можно разделить на агентов контроля структуры РОУ (агент мониторинга структуры и агенты реструктуризации) и технологических агентов, к которым относят агентов контекста событий.

Научной задачей, решаемой в работе является разработка метода реструктуризации систем поддержки принятия решения для управления распределенными объектами с изменяемой структурой, решение которой определило последовательность содержания сформулированных и решенных в диссертации задач.

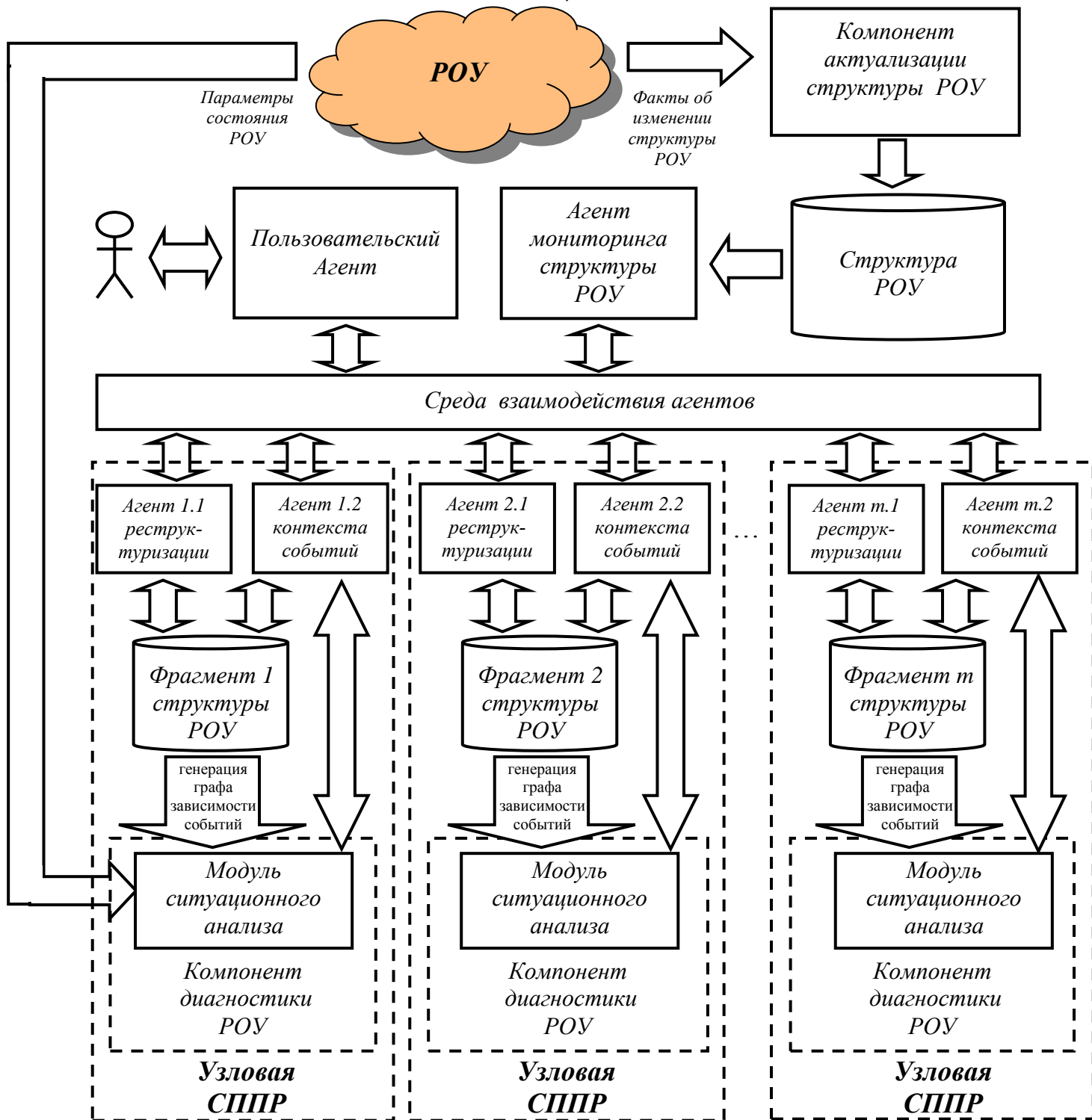


Рисунок 1 - Архитектура перспективной МАС СППР для управления распределенным объектом

**Вторая глава** посвящена разработке основных положений метода построения СППР для управления распределенными объектами: формализации процесса создания модели объекта управления при наличии воздействий, приводящих к изменению его структуры, разработке моделей поведения элементов распределенных объектов управления, а также метода получения графов зависимостей событий на основе алгебры процессов. Метод отличается использованием автоматного представления возможной логики событий по структурной модели РОУ для порождения целевого графа зависимостей событий, что позволяет получить верифицируемые модели поведения РОУ. Сформулированный метод требует формального описания поведения

элементов и распределенного объекта в целом. Предложенные модели отличаются использованием для моделирования динамики элементов РОУ трех классов поведения. Класс поведения объекта накладывает ограничения на вид выражения алгебры процессов Милнера, моделирующего его динамику.

Под моделью объекта управления понимается тройка

$$\Omega = \langle \Theta, z, D \rangle,$$

где  $\Theta$  – совокупность классов, описывающих предметную область.  $\Theta = \{ \Theta_{Ent}, \Theta_{Rel} \}$ , где  $\Theta_{Ent}$  – множество классов сущностей предметной области,  $\Theta_{Rel}$  – множество классов отношений между сущностями;

$D$  – совокупность данных, полученных путем измерений;

$z$  – отношение актуализации, осуществляющее порождение объектов классов из  $\Theta$  на основе данных  $D$ , а также актуализацию состояния объектов.

В условиях наличия воздействий, приводящих к изменению структуры объекта управления, в отношении актуализации могут быть выделены два компонента:

$$z = \{ z_S, z_P \},$$

где  $z_S$  – отношение актуализации структуры объекта управления, которое позволяет выделять объекты и отношения между ними на основе используемых в алгоритме функционирования  $z_S$  признаков;

$z_P$  – отношение актуализации параметров моделей элементов распределенной системы.

Выделение двух отношений актуализации приводит к разделению общего потока данных на поток параметрических данных  $D_P$  и поток структурных данных  $D_S$ .

Под приведенной моделью РОУ  $\Psi = (Ob, R)$  понимается совокупность объектов  $Ob$  и отношений между ними  $R$ , полученных в результате применения отношения актуализации к совокупности классов  $\Theta$  на совокупности данных  $D$ . Будем считать отношения  $R$  объектами специального вида:

$$R \subseteq \bigcup_{n \in N} Ob^n,$$

где  $Ob^n$  – декартово произведение  $n$  множеств  $Ob$ , а  $N$  – максимальная кардинальность отношения между объектами.

Цикл управления на основе информационной модели объекта показан на рисунке 2. Данные о функционировании объекта управления поступают в блоки актуализации параметров элементов объекта управления  $z_P$  и актуализации структуры  $z_S$ , в котором, на основе совокупности классов  $\Theta$  формируется текущая информационная модель объекта управления  $\Psi$ . Полученная модель поступает в блок сравнения состояний *diff*, в котором на основе пользовательских требований к состоянию формируется невязка  $\delta$ . На основе невязки  $\delta$ , блоком *eff* формируется набор команд управления  $C$ . Набор пользовательских требований  $R$  не учитывает структуру объекта управления, рассматривая его как “черный ящик”.

Описания классов из совокупности  $\Theta$  могут быть расширены добавлением к параметрическому описанию сущности модели ее поведения. Таким образом, для любого класса  $c_i$  из совокупности  $\Theta$  описание будет  $(Par, Act, Trans)$ , где  $Par$  – набор параметров объекта с перечислением их типа,  $Act$  – перечисление типов портов (интерфейсов) объекта, а  $Trans$  – схема генерации переходов.

Описание схемы генерации переходов  $Trans$  предполагает задание совокупности переходов вида



Состояние 1 [Событие: Предикат 1] →

Состояние 2 →

[Множество: Предикат 2]

Для объекта, находящегося в состоянии 1, предикат 1 определяет тот объект, событие которого инициирует переход объекта в состояние 2. Предикат определяется на множестве отношений, которыми связан данный объект с другими объектами.

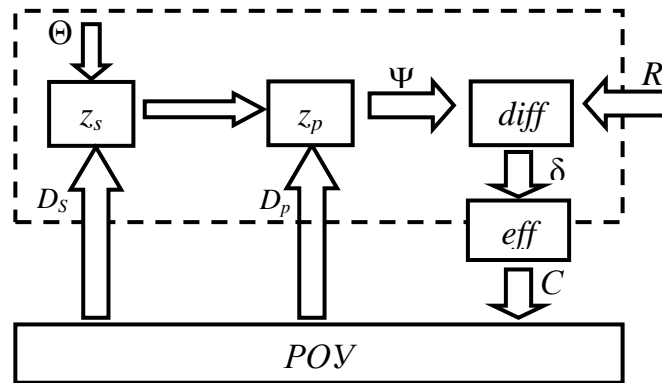


Рисунок 2 - Цикл управления объектом (ОУ) на основе информационной модели

Однако предложенный подход не позволяет осуществить проверку корректности результирующей модели переходов, получаемой в результате объединения моделей отдельных элементов объекта управления. Понятие зависимости событий в РОУ предполагает отсутствие цикличности и недопустимых тупиковых состояний элементов. Указанных свойств позволяет добиться алгебраический подход к описанию поведения элементов объекта управления. Термин алгебра предполагает, что выбирается алгебраический (аксиоматический) подход к описанию и трактовке понятия процесс и, следовательно, поведения. В настоящее время, в большинстве отечественных и зарубежных работ наибольшее распространение получила алгебра процессов Милнера. Выражение алгебры процессов может быть интерпретировано как автомат, в котором ребра помечены событиями, принятыми или переданными от других объектов. В алгебре процессов определяется ряд операций над выражениями, среди которых следует особо выделить операцию композиции “|”, семантика которой заключается в моделировании параллельного выполнения операндов с замыканием одноименных портов приема и передачи разных процессов.

В работе показано, что для описания поведения элементов РОУ достаточно ввести 3 класса объектов: источники, проводники и стоки.

Источники - это объекты, которым разрешено осуществлять самопроизвольный переход между состояниями с генерацией событий ( $e$ ), передаваемых другим элементам и извещения станции управления о возникновении события ( $\gamma$ ). Источник может быть промоделирован следующими выражениями алгебры процессов Милнера:

$$S = S'_i, S'_i = \gamma.(S''_i \mid e.nil),$$

где  $S'_i$  - начальное состояние процесса;

$\gamma$  - извещение станции управления;

$e$  - извещение зависимых от объекта-инициатора элементов РОУ;

$nil$  - терминальный (“мертвый”) процесс.

Проводники – это объекты моделирующие цепочку “прием события” – “смена состояния” – “передача события”. Проводник может быть промоделирован следующими выражениями алгебры процессов Милнера:

$$S = \bar{e}'.S'_i, \quad S'_i = \gamma.(S''_i \mid e.nil),$$

где  $\bar{e}'$  - событие, получаемое от объекта-инициатора.

Стоки – это объекты, которые, как и проводники принимают события от других элементов, осуществляют смену состояния, извещают станцию управления, однако передачи события другим элементам распределенного объекта управления не производят. Сток может быть промоделирован следующими выражениями алгебры процессов Милнера:

$$S = \bar{e}'.S'_i, \quad S'_i = \gamma.S''_i.$$

В различных ситуациях, элемент может быть как проводником, или истоком так и стоком, так что результирующее поведение определяется совокупностью моделируемых ситуаций:

$$S = \sum_{i=1}^N \bar{\alpha}_i.S'_i + \sum_{j=1}^M \beta_j.S'_j,$$

где  $\bar{\alpha}_i$  - действие по приему  $i$ -го события;

$\beta_j$  - действие по передаче  $j$ -го события.

События взаимодействия элементов  $e_i$  описываются в форме

*“Имя события: Функция выбора”*

Функция выбора имеет в качестве области определения модель структуры РОУ и определяет в случае действия:

- по передаче события - множество объектов, которым передается событие;
- по приему события - множество объектов, от которых получено событие.

Модель поведения РОУ получается путем композиции описаний, входящих в его состав и операции сокрытия внутренних событий  $e_i$ :

$$S_{res} = (S_1 \mid S_2 \mid S_3 \mid \dots \mid S_n) \setminus \{e_i\}.$$

Результирующее выражение также представляет собой символическую форму задания автомата и может быть проверено на предмет отсутствия: циклов, тупиков и иных свойств, специфицируемых при помощи того же языка алгебры процессов Милнера.

В качестве целевой модели, применяемой для логической фильтрации, используется граф зависимостей событий, который задается парой

$$\mathfrak{S} = \langle E, \rightarrow \rangle,$$

где  $E$  – множество событий;

$\rightarrow \subseteq E \times E$  - причинно-следственное бинарное отношение, задающее слабый частичный порядок на множестве событий.

Интуитивный смысл отношения  $e_1 \rightarrow e_2$  - событие  $e_1$  является причиной  $e_2$  (возможно причиной нескольких событий).

Основное преимущество данного подхода заключается в том, что граф зависимостей событий может быть представлен в виде булевого выражения, что позволяет добиться максимального быстродействия подсистемы логической фильтрации и минимального объема памяти требуемой для хранения структуры.

Метод получения графов зависимостей событий на основе выражения, описывающего результирующее поведение РОУ, основывается на следующем предположении:

Событие  $\gamma_1$ , генерируемое объектом  $B$  зависимо от события  $\gamma_2$ , генерируемого объектом  $A$ , если существует такое внутреннее событие  $e$ , которое генерируется  $A$  после посылки события  $\gamma_2$  и вызывает смену состояния объекта  $B$ , приводящую к генерации  $\gamma_1$ .

Однако, особенности семантики алгебры процессов Милнера, использующей модель парных взаимодействий выражений процессов (прием-передача) при комбинации нескольких процессов (больше 3) приводят к наличию в результирующем выражении множества комбинаций событий  $\gamma_i$  извещения управляющей станции. Это не позволяет осуществить непосредственное преобразование результирующего выражения в граф зависимостей событий. Необходимое и достаточное условие зависимости событий определяется при помощи следующего доказанного в работе утверждения:

*Для того, чтобы событие  $\gamma_2$  было зависимо от события  $\gamma_1$  необходимо и достаточно, чтобы в именованной системе переходов результирующего выражения существовал хотя бы один переход вида  $\xrightarrow{\gamma_1} S \xrightarrow{\gamma_2}$  и не существовало переходов вида  $\xrightarrow{\gamma_2} S \xrightarrow{\gamma_1}$ .*

**Третья глава** посвящена разработке модели и алгоритма функционирования мультиагентного сообщества реструктуризации СППР на основе имеющихся модели описания элементов РОУ и графа зависимостей событий.

Результаты основываются на приведенной в первой главе архитектуре перспективной мультиагентной СППР, предполагающей разбиение элементов РОУ на подмножества, число которых равно числу узлов СППР. В связи с тем, что реструктуризация СППР преследует цель компенсации рассогласования структурной и динамической модели объекта управления, в первую очередь следует определить интегральный показатель эффективности функционирования СППР. В случае распределенного объекта подобным интегральным показателем может служить оперативность СППР. Так как минимум суммы достигается тогда и только тогда, когда каждое слагаемое минимально, в качестве такого показателя оперативности СППР может быть принято суммарное время принятия решения всеми узлами системы. Вывод выражения для суммарного времени основывается на принятой модели потоков данных между узлами СППР, представляемых агентами контекста событий и элементом РОУ. Схема потоков данных приведена на рисунке 3.

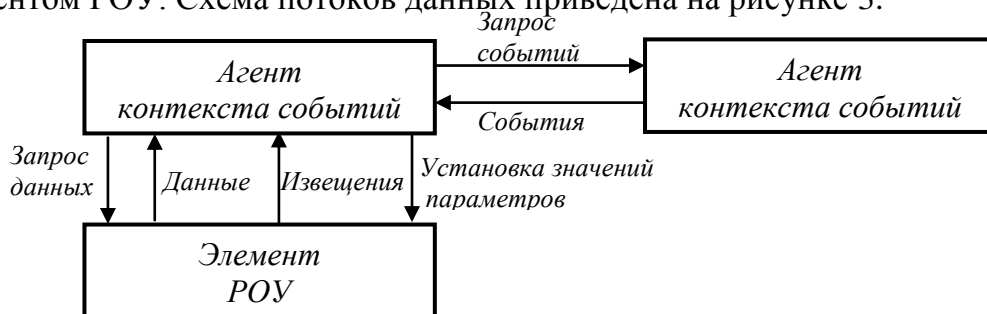


Рисунок 3 - Схема потоков данных между узлами СППР и элементом РОУ

В соответствии со схемой, для каждого агента контекста событий  $a_i$  время обработки событий складывается из времени обработки событий от локальных элементов РОУ, подчиненных данному агенту и событий (внешних) от элементов, подчиненных другим агентам:

$$T_{a_i} = T(E_{a_i}^{лок}) + T(E_{a_i}^{вн}).$$

В свою очередь, время обработки локальных событий агента определяется множеством событий, полученных в результате запросов агента к параметрам элемента РОУ и множеством извещений элемента РОУ к агенту.

$$T(E_{a_i}^{лок}) = T(E_{a_i}^{лок пар}) + T(E_{a_i}^{лок изв}).$$

Приведем итоговое выражение для максимального времени обработки локальных событий агентом:

$$T_{MAX}(E_{a_i}^{лок}) = T_{MAX}(E_{a_i}^{лок пар}) + T(E_{a_i}^{лок изв}) = \sum_{k=1}^{E(a_i)} \left( \sum_{j=1}^{P(e_k)} \left( \frac{v_{ik}^{пар j} \cdot (V_k^{пар j} \text{запрос} + V_k^{пар j} \text{отклик})}{\omega(a_i, e_k)} + \frac{1}{v_{ik}^{пар j}} \right) \cdot [Bel_{PAR}(a_i, p_{kj})] + \sum_{j=1}^{N(e_k)} \left( \frac{v_{ik}^{изв j} \cdot V^{изв}}{\omega(a_i, e_k)} \right) \cdot [Bel_{NOT}(a_i, n_{kj})] \right),$$

где  $v_{ik}^{изв j}$  - частота получения извещений от элемента;

$v_{ik}^{пар j}$  - частота запросов агента  $a_i$  к  $j$ -му параметру элемента  $e_k$ ;

$$[Bel_{PAR}(a_i, p_{kj})] = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й агент обращается к } j\text{-му параметру } k\text{-го элемента} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$[Bel_{NOT}(a_i, n_{kj})] = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й агент принимает извещение номер } j \text{ на } k\text{-м элементе РОУ} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$\omega(a_i, e_k)$  - скорость передачи данных на маршруте  $\{a_i, e_k\}$  между узлом агента  $a_i$  и элементом  $e_k$ . Определяется величиной минимальной пропускной способности

$$\omega(a_i, e_k) = \min_{\omega_{jk} \in \{a_i, e_k\}} (\omega_{ik});$$

$V_k^{пар j \text{запрос}}$  - размер запроса при обращении к параметру  $j$ ;

$V_k^{пар j \text{отклик}}$  - размер отклика;

$V^{изв}$  - размер извещения, который постоянен и равен величине пакета.

Время обработки внешних событий агентами определяется используемым механизмом взаимодействия агентов, которые представлены схемой дублирования, схемой опроса по требованию и схемой взаимодействия по извещению. Схема дублирования данных опроса элемента, представленная на рисунке 4.а, сводится к уже рассмотренному случаю обработки локальных событий.

Схема опроса по требованию, представленная на рисунке 4.б предполагает использование агентом запроса к агенту-владельцу элемента.

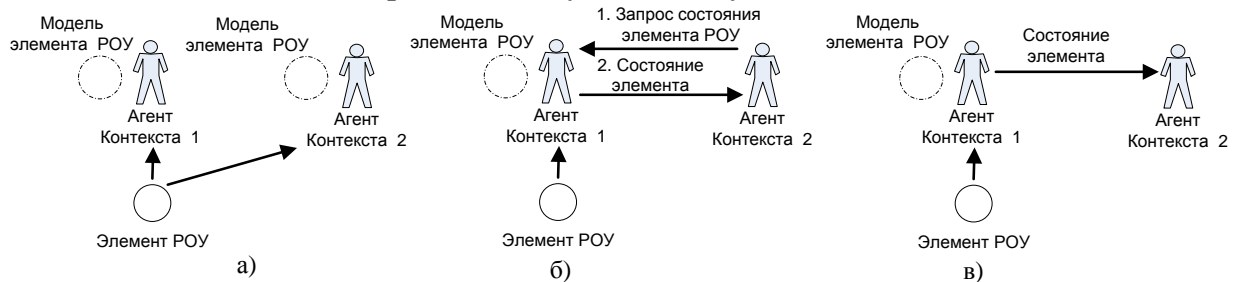


Рисунок 4 – Механизмы взаимодействия агентов. а) - схема дублирования, б) - схема опроса по требованию, в) - схема взаимодействия по извещению

В результате, вклад в суммарное время опроса будет описываться выражением:

$$T_{REQ}(E^{BH}_{a_i}) = \sum_{l=1}^{A(a_i)} \sum_{k=1}^{E(a_l)} \sum_{j=1}^{M(e_k)} \left( \frac{v_{ilk}^{cobj} \cdot (2 \cdot V^{сообщ})}{\omega(a_i, a_l)} \right) \cdot [Bel_{REQ}(a_i, m_{ilk})],$$

где  $A(a_i)$  - число агентов, с которыми взаимодействует агент  $a_i$ ;

$E(a_l)$  - число элементов в зоне ответственности агента  $a_l$ ;

$M(e_k)$  - число событий элемента  $e_k$ ;

$V^{сообщ}$  - зависящий от используемой платформы агентов размер сообщения, пересылаемого между агентами;

$v_{ilk}^{cobj}$  - частота опроса  $i$ -м агентом  $j$ -го события на  $k$ -м элементе, принадлежащем  $l$ -му агенту;

$$Bel_{REQ}(a_i, m_{ilk}) = \begin{cases} 1 - \text{если } i - \text{й агент опрашивает } j - \text{е событие на } k - \text{м элементе} \\ l - \text{го агента} \\ 0 - \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Схема опроса по извещению, представленная на рисунке 4.в, предполагает, что агент 2 заключает контракт (подписку) с агентом 2 на получение событий от элемента РОУ, принадлежащего агенту 1. В соответствии с контрактом, в случае возникновения соответствующего события, агент 1 автоматически производит ретрансляцию события агенту 2.

В результате, вклад в суммарное время данной схемой будет определяться выражением:

$$T_{NOT}(E^{BH}_{a_i}) = \sum_{l=1}^{A(a_i)} \sum_{k=1}^{E(a_l)} \sum_{j=1}^{M(e_k)} \left( \frac{v_{lk}^{cobj} \cdot V^{сообщ}}{\omega(a_i, a_l)} \right) \cdot [Bel_{NOT}(a_i, m_{ilk})]$$

где  $A(a_i)$  - число агентов, с которыми взаимодействует агент  $a_i$ ;

$E(a_l)$  - число агентов в зоне ответственности агента  $a_l$ ;  $M(e_k)$  - число событий элемента  $e_k$ ;

$V^{сообщ}$  - зависящий от используемой платформы агентов размер сообщения, пересылаемого между агентами;

$v_{lk}^{cobj}$  - частота генерации  $j$ -го события на  $k$ -м элементе  $l$ -го агента;

$$Bel_{NOT}(a_i, m_{ilk}) = \begin{cases} 1 - \text{если } i - \text{й агент извещается о } j - \text{м событии на } k - \text{м элементе} \\ l - \text{го агента} \\ 0 - \text{в противном случае} \end{cases}$$

Выражение для максимального времени может быть получено в результате суммирования вышеприведенных выражений для времени приема каждого агента.

$$T_{MAX}(E) = \sum_{i=1}^A (T_{MAX}(E_{a_i}^{лок}) + T_{REQ}(E^{BH}_{a_i}) + T_{NOT}(E^{BH}_{a_i})).$$

Минимизацию приведенного функционала предполагается производить при следующих ограничениях:

- на коэффициент использования ( $KI_{ij}$ ) ребер  $\omega_{ij}$ :

$$V_{ij}^{\Sigma} \leq KI_{ij} \cdot \omega_{ij}$$

исходя из практического опыта, величину  $KI_{ij}$  следует полагать равной 0.7;

- на возможных агентов, к которым производится прикрепление данного элемента с целью сокращения пространства решений за счет отбрасывания заведомо нерациональных вариантов;
- на загрузку узлов СППР. Во избежание создания ситуации, при которой в сети присутствует несколько максимально загруженных агентов и множество незадействованных, в качестве дополнительного ограничения может использоваться условие наличия у агента некоторого минимального числа элементов РОУ  $E_{\min}$  :

$$E(a_i)_{ij} \geq E_{\min} .$$

В качестве основы алгоритма реструктуризации был использован модифицированный метод “отжига”, получивший распространение в области комбинаторной оптимизации и моделирования в физике.

Алгоритм реструктуризации основан на имитации охлаждения расплавленной среды, в которой происходит образование кристаллической структуры вокруг нескольких узлов притяжения. Исходя из физических аналогий, под температурой понимается совокупность показателей, характеризующих количество элементов в модели распределенного объекта управления имеющих отклонение от эталонной структуры. Повышение температуры для отдельного элемента означает рост количества потенциальных узлов СППР, к которым он может быть прикреплен (т.е., фактически, рост числа степеней свободы элемента). Состояние каждого элемента  $e_i$  РОУ относительно системы мониторинга характеризуется парой  $\varphi=(a_j, v_i)$ , где  $a_j$ -агент (узел), к которому приписан элемент,  $v_i$  - матрица межагентных связей 3-х строк и  $A$  - 1 столбцов, где  $A$  – число агентов.

Схема	$a_0$	$a_1$	...	$a_{j-1}$	$a_{j+1}$	...	$a_A$
<i>Дублирование</i>	<b>1</b>	<b>0</b>	...	<b>1</b>	<b>0</b>	...	<b>0</b>
<i>Опрос по требованию</i>	<b>0</b>	<b>1</b>	...	<b>0</b>	<b>1</b>	...	<b>0</b>
<i>Взаимодействие по извещению</i>	<b>0</b>	<b>0</b>	...	<b>0</b>	<b>0</b>	...	<b>1</b>

Рисунок 5 –Матрица межагентных связей

$k$  –й столбец матрицы устанавливает факт использования агентом  $a_k$  одного из трех механизмов доступа к соответствующему элементу агента  $a_j$ . В процессе функционирования алгоритма производится случайный выбор элемента и последующая передача прав по мониторингу элемента ведомому агенту или модификация в матрице элемента одного из столбцов, связанного с ведомым агентом.

Описанный алгоритм ориентирован на взаимодействие агентов в паре. В контексте алгоритма агенты не являются индивидуально рациональными. Предполагается модель *рациональной пары агентов*. Алгоритм реструктуризации протекает по итерациям и предполагает, разделение множества агентов на ведущих и ведомых агентов. Целью ведущих агентов является генерация предложений по изменению структуры РОУ. В дальнейшем оценка изменения производится как ведущим, так и ведомым агентом. В результате изменение либо принимается, либо отвергается. В процессе функционирования могут приниматься локально неоптимальные решения с вероятностью, зависящей от показателя называемого “температурой сети”. Блок-схемы функционирования ведущего и ведомого агентов показаны на рисунках 6.а и 6.б.

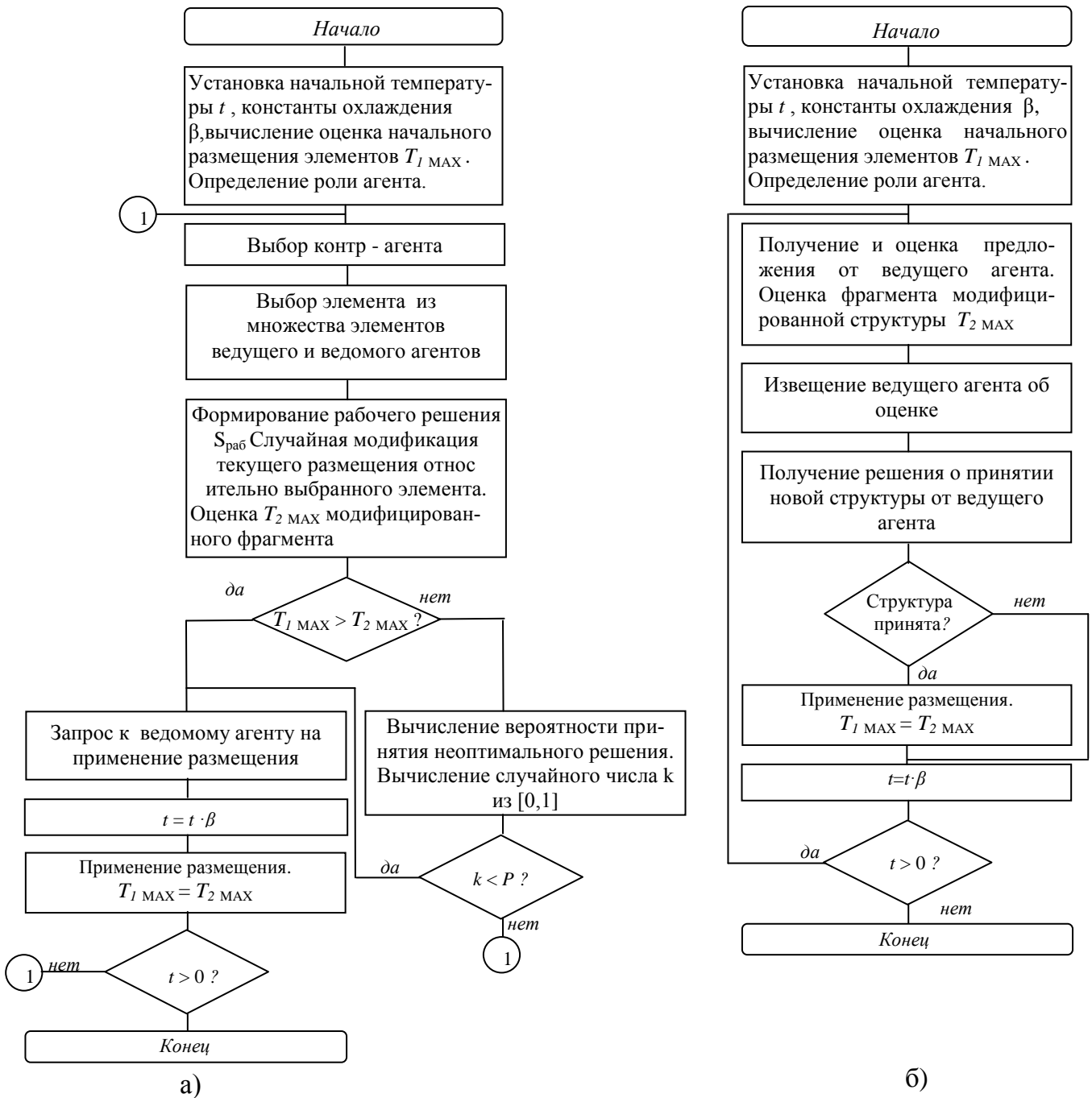


Рисунок 6 - Блок-схемы алгоритма функционирования агентов. а) – блок-схема алгоритма функционирования ведущего агента, а) – блок-схема алгоритма функционирования ведомого агента

**Четвертая глава** посвящена экспериментальной проверке полученных результатов. Для проверки корректности полученных результатов был создан макет мультиагентной СППР для управления РОУ. В качестве распределенного объекта был использован фрагмент корпоративной NGN – сети, реализованный на стенде ОАО “Интелтех”. Для исследования режимов функционирования подсистемы реструктуризации была разработана и реализована имитационная модель.

В рамках натурального моделирования были реализованы следующие компоненты:

- компонент актуализации структуры РОУ, служащий для автоматического построения структурной модели сети. В качестве источников информации о

структуре РОУ были использованы базы управляющей информации стандартного SNMP – агента и расширенного MPLS – агента;

- *компонент анализа структурной модели РОУ*, служащий для визуализации и корректировки созданной компонентом актуализации модели, а также ее загрузки в хранилище (СІМ – сервер OpenPegasus). К числу функций, выполняемых данным приложением следует отнести начальную фрагментацию модели и загрузку полученных фрагментов в узловые СППР;
- *агент реструктуризации*, реализующий описанный алгоритм реорганизации распределенной СППР. В качестве основы для программной реализации была взята платформа JADE. Задание параметров реструктуризации (температуры, константы охлаждения, допустимого числа итераций) осуществляется через стандартные средства управления платформой JADE;
- *агент контекста событий*, осуществляющий разрешение коллизий и сбор статистик обращения агентов к элементам, также реализован на базе платформы JADE. В процессе функционирования за каждым из агентов закрепляется перечень контролируемых элементов. Получение имени агента контекста событий, которому подконтролен элемент осуществляется при помощи службы желтых страниц, реализуемой в рамках платформы JADE.

В составе узловой СППР был использован модуль ситуационного анализа специально разработанного автором программного комплекса “Автоматизированная система управления связью”, обеспечивающий выполнение следующих функций: измерение параметров элементов РОУ, генерация события на основе порогового значения характеристики элемента, прием извещений от элементов РОУ, логическую фильтрацию событий на основе заданного графа зависимостей событий, графический WEB – интерфейс, обеспечивающий визуализацию данных анализа состояния фрагмента РОУ.

Исследование качества принимаемого решения в зависимости от начальной температуры проводилось при помощи программы имитации процесса реструктуризации распределенной СППР. При этом считалось, что качество информационной поддержки должностного лица в контуре управления распределенным объектом тем выше, чем выше оперативность СППР и меньше расхождение между моделью и РОУ. Моделировались системы, состоящие из 400, 700, 1000 и 2000 узлов РОУ и 10 агентов реструктуризации. Моделирование проводилось на интервалах: [100, 10] градусов с шагом 10 градусов, [10-1] градусов с шагом 1 градус, [1-0.1] градусов с шагом 0.1 градуса, [0.1-0.01] градуса с шагом 0.01 градуса. Указанные диапазоны были выбраны эмпирически, исходя из первоначальных наблюдений за поведением имитационной модели. Обобщенные результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 7.

Проведенное моделирование позволяет заключить, что с ростом размерности решаемой задачи происходит смещение вправо точки оптимальной начальной температуры процесса реструктуризации. Эмпирически может быть установлена логарифмическая зависимость оптимальной начальной температуры процесса реструктуризации от числа узлов объекта управления.



В результате проведения полунатурного эксперимента было установлено следующее:

1. Подтверждена гипотеза об адекватности предложенной архитектуры мультиагентной СППР для управления РОУ, а также разработанных моделей поведения элементов РОУ и метода получения графа зависимостей событий на основе алгебры процессов Милнера;
2. Подтверждена гипотеза о необходимом увеличении начальной оптимальной температуры сообщества агентов реструктуризации с ростом сложности РОУ;

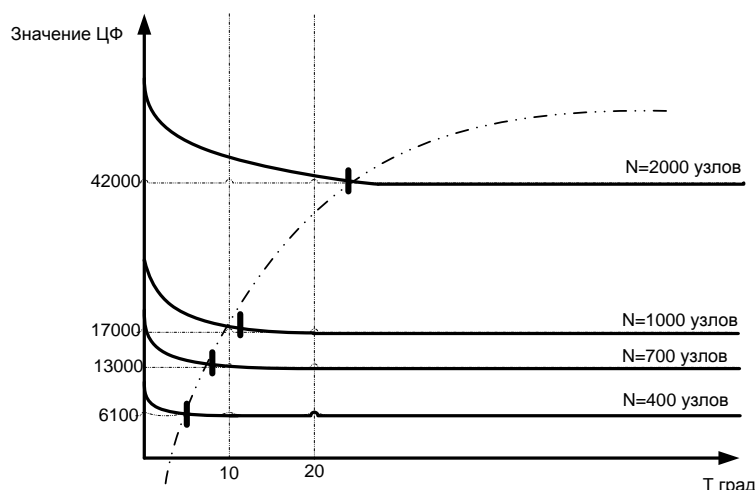


Рисунок 7 - Влияния начальной температуры на качество принимаемого решения

3. Отработаны формы WEB – интерфейса для поддержки администратора мультиагентной СППР в процессе решения задач реконфигурирования системы по измененной структуре фрагмента корпоративной сети и предложены методики проверки работоспособности подсистемы реструктуризации и построения структурной и динамической моделей.

**В заключении** перечислены основные научные и практические результаты.

**В приложении 1** приведена схема классов, предназначенная для моделирования фрагмента корпоративной сети.

**В приложении 2** представлены методики проверки работоспособности узловых СППР.

**В приложении 3** приведены листинги программ для полунатурного моделирования мультиагентной СППР для управления РОУ.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты проделанной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработана модель поведения элементов РОУ, обеспечивающая получение верифицируемой автоматной модели поведения распределенного объекта;
2. Разработан метод автоматического получения используемой в задачах диагностики модели причинно-следственных зависимостей между событиями, порождаемыми элементами РОУ;

3. Разработана модель и алгоритм реструктуризации СППР при возникновении параметрических и структурных изменений распределенного объекта управления;
4. Разработан макет перспективной мультиагентной СППР, который был исследован в составе системы управления фрагментом корпоративной сети на стенде ОАО “Интелтех”. Полунатурные экспериментальные исследования показали перспективность предлагаемых решений по построению мультиагентных СППР для управления РОУ с изменяемой структурой.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:**

9.1. Васильев, Н.В., Яшин, А.И. Алгебраический подход к построению алгоритмов на графах [Текст] / Н.В. Васильев, А.И. Яшин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета). Сер. Информатика, управление и компьютерные технологии. – СПб.:Изд-во СПбГЭТУ, 2006г. – Вып.1– С. 11-16.

9.2. Васильев, Н.В., Смирнова, Н.Н. Аналитический подход к верификации комплексов взаимодействующих процессов [Текст] / Н.В. Васильев, Н.Н.Смирнова // Мехатроника, Автоматизация, Управление – М. 2007г., №5 – С. 31-35.

#### **Другие работы**

#### **Статьи:**

9.3. Васильев, Н.В., Смирнова, Н.Н. Аналитический подход к исследованию поведения протокольных объектов [Текст] / Н.В. Васильев, Н.Н.Смирнова //Актуальные вопросы ракетно-космической техники и технологий – СПб.: Изд-во БГТУ “Военмех”, 2006г. – Вып.4 – С. 175 – 178.

9.4. Васильев, Н.В., Соколов, М.Н. Методика описания и анализа процессов в вычислительной сети с гарантированным качеством обслуживания приложений [Текст] / Н.В. Васильев, М.Н. Соколов // Информационная технология в радиоэлектронных системах: сб. докл. военно-научной конф., г. Горелово 28-29 мая 2007г. – Горелово, 2007. – С. – 64-65.

9.5. Титов, Г.С., Васильев, Н.В. Метод управления качеством обслуживания в сетях коммутации пакетов при наличии априорных знаний [Текст] / Г.С. Титов, Н.В. Васильев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Известия государственного электротехнического университета). Сер. Информатика, управление и компьютерные технологии. – СПб.:Изд-во СПбГЭТУ, 2008г. –Вып.1– С. 32-37.

9.6. Васильев, Н.В., Титов, Г.С. Перспективная система управления сетью связи на основе компонентного подхода [Текст] / Н.В. Васильев, Г.С. Титов // Новые информационные технологии в системах связи и управления: тр. VII Всерос. научно-технической конф., г. Калуга, 13-15 июня 2008г. – Калуга: Изд-во КНИИТМУ, 2008г.- С.105-107.

9.7. Титов, Г.С., Васильев, Н.В. Метод управления качеством обслуживания в сетях коммутации пакетов при наличии априорных знаний [Текст] / Г.С. Титов, Н.В. Васильев // Новые информационные технологии в системах связи и управления: тр. VII Всерос. научно-технической конф., г. Калуга, 13-15 июня 2008г. – Калуга: Изд-во КНИИТМУ, 2008г.- С.107-110.