

На правах рукописи



Гальперов Василий Ильич

**МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ
ПОСТРОЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ В ЭНЕРГЕТИКЕ
(НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ)**

Специальность: 05.13.18 – Математическое
моделирование, численные методы и комплексы
программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского
отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Массель Людмила Васильевна

Официальные оппоненты: **Мельников Андрей Витальевич**
доктор технических наук, профессор, Автономное учреждение
Ханты-Мансийского автономного округа - Югры «Югорский
научно-исследовательский институт информационных
технологий», директор

Булатов Юрий Николаевич
кандидат технических наук, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Братский государственный университет», кафедра
электроэнергетики и электротехники, доцент

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет»,
г.Томск**

Защита состоится 27 июня 2017 г. в 9:00 на заседании диссертационного совета
Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского
отделения Российской академии наук, по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова,
130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу г.
Иркутск, ул. Лермонтова 130, к. 407 и на сайте <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2017-5/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные
печатью организации, просим отправлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова,
130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.017.01,
доктор технических наук, профессор



Клер Александр Матвеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Агентные технологии являются одной из распространенных информационных технологий, востребованной во многих предметных областях. В частности, агентные технологии декларируются как одна из базовых технологий при реализации концепции интеллектуальных энергетических систем. В то же время всегда существует разрыв между теоретическими разработками и их практическим применением в конкретных областях, что характерно и для энергетики. Диапазон предложений в данном сегменте со стороны ИТ-разработчиков весьма ограничен: решения зарубежных компаний довольно дороги и уязвимы с точки зрения кибербезопасности, качественных отечественных разработок недостаточно или они просто отсутствуют. Имеющиеся прикладные разработки в области энергетики, как правило, узкоспециализированы, не тиражируемы и требуют сопровождения (неотчуждаемы от разработчиков). Немногочисленные универсальные системы, в свою очередь, обладают излишней функциональностью и, как следствие, тяжеловесностью.

При реализации концепции интеллектуальных энергетических систем важная роль отводится подсистеме сбора и управления информацией о текущем режиме ЭЭС. В этой подсистеме одной из основных является задача оценивания состояний (ОС), которая состоит в расчете установившегося режима ЭЭС по данным телеизмерений и телесигналов. В современных условиях функционирования и управления ЭЭС возникает необходимость в выполнении ОС для энергосистем большой размерности - порядка нескольких тысяч узлов). При ОС схем ЭЭС такой размерности возникают проблемы, связанные с неоднородностью и большим объемом обрабатываемой информации, возрастанием нагрузки на доступные вычислительные ресурсы в центре управления ЭЭС. Распределенная обработка данных при декомпозиции задачи оценивания состояния является эффективным методом решения этих проблем, повышения качества результатов и надежности вычислительной процедуры ОС ЭЭС.

Одними из основных направлений работ по развитию автоматизированной системы управления режимами являются разработка алгоритмов выявления предаварийных состояний на основе методов оценивания состояния и создание систем распределенного расчета режимов энергосистем. В ИСЭМ СО РАН был разработан, но не реализован программно алгоритм распределенной обработки телеинформации при оценивании состояния с использованием многоагентных технологий, который позволяет повысить эффективность расчетов ЭЭС большой размерности (И.Н. Колосок, А.С. Пальцев). Предложенный алгоритм основан на использовании методов декомпозиции схем ЭЭС. Представляется целесообразным продемонстрировать возможности многоагентного подхода при создании интеллектуальных энергетических систем на примере решения задач ОС ЭЭС.

Таким образом, актуальность диссертационной работы обусловлена, с одной стороны, необходимостью разработки теоретического подхода к построению типовых многоагентных систем (МАС) в энергетике, включая методы управления взаимодействием агентов, с другой стороны, потребностью в практической реализации таких систем, основанной на использовании гибкой архитектуры и

базовых программных компонентов. Весьма актуальной является также задача разработки типовой системы ОС ЭЭС, позволяющей реализовать выбранный специалистом способ декомпозиции и создать конкретную конфигурацию МАС ОС для выбранного способа.

Использование многоагентных технологий в России и за рубежом рассматривается в работах В.И. Городецкого, В.Б. Тарасова, S. Russell, P. Norwig, P. Mars, M. Wooldridge, C. Hewitt, J. Inman, G. Weiss, J. Ferber и др. В ИСЭМ СО РАН вопросам применения методов искусственного интеллекта и многоагентного подхода в задачах энергетики, а так же распределенному оцениванию состояния посвящены работы А.З. Гамма, А.М. Глазуновой, Ю.А. Гришина, Р.А. Заики, Ю.Б. Каштанова, И.Н. Колосок, В.Г. Курбацкого, Л.В. Массель, В.В. Новорусского, А.С. Пальцева, Д.А. Панасецкого, Н.В. Томина, Д.А. Фартышева, П.В. Этингова и др.

Цель работы: Разработка методических основ применения многоагентных технологий при реализации концепции интеллектуальных энергетических систем на примере задачи оценивания состояния ЭЭС.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ предметной области, связанной с разработкой концепции интеллектуальных энергетических систем и решением задач оценивания состояния ЭЭС, существующих подходов к разработке многоагентных систем и возможностей их применения при создании интеллектуальных энергетических систем на примере задачи оценивания состояния ЭЭС.
2. Разработка методического подхода к построению типовых многоагентных систем на примере задачи оценивания состояния ЭЭС, включающего:
 - метод проектирования и реализации типовой МАС;
 - метод управления взаимодействием агентов на основе алгебраических сетей;
 - событийные модели сценариев взаимодействия агентов (агентных сценариев) и их графического представления с использованием элементов Joiner сетей;
 - алгоритмы взаимодействия и поведения агентов;
 - базовые компоненты типовой МАС с гибкой архитектурой.
3. Реализация, на основе предложенного методического подхода, конкретной МАС для одной из задач оценивания состояния ЭЭС и ее апробация
4. Разработка численного метода оценки надежности МАС на основе графовых моделей и его применение для выявления критичных компонентов конкретных конфигураций МАС.
5. Разработка усовершенствованной многоагентной технологии численного решения задачи оценивания состояния с использованием предложенного методического подхода и разработанного программного обеспечения.

Объектом исследования является электроэнергетическая система.

Предмет исследования – методы создания современных многоагентных систем, методы и средства управления взаимодействием агентов на основе алгебраических сетей и событийных моделей; информационная технология

распределенного оценивания состояния ЭЭС, с учетом функциональной и структурной декомпозиции.

Методы исследования: Для решения поставленных задач использовались методы искусственного интеллекта, методы агентно-ориентированного проектирования и программирования и разработки многоагентных систем, методы и средства событийного моделирования, методы теории графов, методы теории вероятности и математической статистики, теория и методы оценивания состояния ЭЭС. Предлагаемые в диссертационной работе алгоритмы оценивания состояния ЭЭС базируются на разработанном в ИСЭМ СО РАН методе контрольных уравнений.

Составляют предмет научной новизны и выносятся на защиту следующие положения:

1. Разработан методический подход к построению типовых многоагентных систем на примере задачи оценивания состояния ЭЭС, включающий:
 - метод проектирования и реализации типовой МАС;
 - вычислительный метод управления взаимодействием агентов на основе алгебраических сетей;
 - событийные модели сценариев взаимодействия агентов (агентных сценариев) и их графического представления с использованием элементов Joiner сетей;
 - алгоритмы взаимодействия и поведения агентов;
 - базовые компоненты типовой МАС с гибкой архитектурой.
 Пункт 1 новизны соответствует п. 3 паспорта специальности 05.13.18¹.
2. Построены событийные модели агентных сценариев с использованием аппарата Joiner-сетей, позволяющие пользователям самостоятельно вносить изменения в алгоритм работы системы без участия программистов. Пункт 2 новизны соответствует п. 8 паспорта специальности 05.13.18².
3. Предложен численный метод оценки надежности многоагентной системы с использованием теории графов. Пункт 3 новизны соответствует п. 4 паспорта специальности 05.13.18.
4. Разработана методика разработки конкретных МАС оценивания состояния ЭЭС на основе типовой многоагентной системы. Выполнена реализация многоагентной системы «EstateMAS», отличающаяся от известных применением авторского метода управления взаимодействием агентов, разработкой агентных сценариев и их моделированием с использованием Joiner-сетей. Пункт 4 новизны соответствует п. 4 паспорта специальности 05.13.18³.
5. Предложена усовершенствованная многоагентная технология численного решения задачи оценивания состояния, отличие которой состоит в использовании разработанных методов и реализованного программного обеспечения для

¹ П. 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»

² П. 8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования»

³ П. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»

поддержки этапов технологии. Соответствует п. 3 паспорта специальности 05.13.18.

Практическая ценность работы: Предлагаемый методический подход к построению типовых многоагентных систем ориентирован на его применение при реализации концепции интеллектуальных энергетических систем и позволяет его тиражирование для различных энергетических задач. Его применение для задач оценивания состояния ЭЭС позволяет разрабатывать конкретные МАС, использующие различные методы декомпозиции схем ЭЭС, без привлечения программистов. Усовершенствованная технология оценивания состояния ЭЭС предусматривает децентрализацию расчетов установившегося режима ЭЭС, что позволит снизить нагрузку на главный диспетчерский центр и уменьшить количество данных, передаваемых по сети.

Результаты диссертационной работы применены в базовом проекте ИСЭМ СО РАН № 01201361373 «IV.35.1.3. Методы, технологии и инструментальные средства интеллектуализации поддержки принятия решений в интегрированных интеллектуальных энергетических системах», в проектах, поддержанных грантами РФФИ №13-07-140 (2013–2015), №16-07-00474 (2016–2018), №15-07-01284 (2015–2017), грантом Программы Президиума РАН №229 (2012–2014), №15-07-04074 Бел_мол_а (2015–2016), а так же грантом СО РАН и Института энергетики НАН Беларуси №18Б (2012-2014). В рамках двух последних проектов результаты диссертационной работы переданы и использованы в Институте энергетики НАН Беларуси.

Личный вклад. Положения, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором. Постановка задачи выполнена совместно с Л.В. Массель, И.Н. Колосок и А.С. Пальцевым.

Апробация работы: Результаты работы докладывались на Международной конференции «Computer science and information technologies (CSIT'2015)», Рим, Италия, 2015; Байкальских Всероссийских с международным участием конференциях «Информационные и математические технологии в науке и управлении», г. Иркутск, 2013-2016 гг.; на международных семинарах «Contingency management, intelligent, agent-based computing and cyber security in energy sector», Монголия – Россия, 2014-2017 гг.; на XVI Всероссийской конференции молодых ученых «Математическое моделирование и информационные технологии», г. Красноярск, 2015 г.; на конференциях молодых ученых ИСЭМ СО РАН, 2014-2016 гг., а также на заседаниях секции Ученого совета ИСЭМ СО РАН «Прикладная математика и информатика».

Публикации: По теме диссертационной работы опубликованы 10 статей, в том числе 4 из них – в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК. Получены 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура работы: Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 94 наименований и 4-х приложений общим объемом 139 страниц, основной текст изложен на 111 страницах, включает 11 таблиц и 36 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность рассматриваемой проблемы, сформулирована цель работы и определены задачи, необходимые для ее достижения. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приводится общая характеристика работы.

В первой главе выполнен анализ предметной области, связанной с концепцией интеллектуальных энергетических систем. Важную часть в этой концепции занимает задача оценивания состояния. В современных условиях функционирования и управления ЭЭС требуется создание расчетной модели для схем большой размерности (порядка нескольких тысяч узлов) на базе методов оценивания состояния ЭЭС. Такие схемы не полностью наблюдаемы, возможны искажения данных и плохая их синхронизация. Искажение результатов оценивания состояния вследствие появления ошибочных телеизмерений, потери наблюдаемости, отказа в системах сбора и передачи данных могут привести к искажению результатов оценивания состояния и, как следствие, к неправильным решениям, формируемым на базе полученной расчетной модели. Одним из способов расчета установившегося режима ЭЭС является распределенная обработка данных. Данные декомпозируются (разбиваются на небольшие группы), рассчитываются параллельно и затем вновь объединяются. Использование декомпозиции в задаче оценивания состояний обосновано в работах А.С. Пальцева и И.Н. Колосок⁴. Для реализации данного подхода целесообразно использовать многоагентные системы, поскольку они являются одной из базовых технологий при реализации концепции интеллектуальных энергетических систем⁵, а в данном случае позволяют организовать распределенные вычисления при реализации методов декомпозиции.

Агенты как независимые, самостоятельные программы обладают всеми необходимыми характеристиками для проведения распределенных вычислений. Каждый агент будет отвечать за определенную часть алгоритма и контактировать с другими агентами для выполнения задания, формируя, таким образом, многоагентную систему⁶. На данный момент существует очень небольшое количество платформ, позволяющих организовывать работу многоагентных систем. Большинство созданных ранее систем уже не поддерживаются и не развиваются, за исключением единичных представителей, а так же ощущается недостаток специализированных типовых платформ для решения энергетических задач. Именно поэтому разработка новых методических подходов к реализации многоагентных систем является актуальной и востребованной задачей.

⁴ И.Н. Колосок, А.С. Пальцев. Двухуровневый иерархический алгоритм оценивания состояния ЭЭС и его реализация на основе мультиагентного подхода // Сб. докладов III Международной научно-практической конференции «ЭНЕРГОСИСТЕМА: управление, конкуренция, образование». Т.1. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2008. – С. 354-359.

⁵ Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью // под ред. академиков Фортова В.Е. и Макарова А.А. – М.: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2012. – С. 235.

⁶ Интеллектуальные агенты / В кн. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – С. 75-108.

Во второй главе описаны предлагаемый методический подход, методы, модели и алгоритмы построения многоагентных систем на примере оценивания состояния ЭЭС. Система должна создаваться с определенной целью G , которую перед созданием необходимо четко определить. Цель достигается за счет выполнения определенного ряда задач, как простых, так и комплексных, которые можно разделить на отдельные подзадачи. Требуется определить множество подобных задач $\{T\}$. Система должна уметь решать данные задачи. Сформулированное множество задач определяет множество функций будущей системы $\{F\}$. Функции системы распределяются между агентами $\{A\}$ так, чтобы каждый агент решал свою задачу, либо часть какой-то большой задачи. Таким образом, необходимо построить цепочку отображений: $G \rightarrow \{T\} \rightarrow \{F\} \rightarrow \{A\}$.

Однако выполнять действия необходимо в определенном порядке, к тому же некоторые задачи можно решить несколькими разными методами, поэтому необходимо определить порядок вызова агентов $\{P_A\}$. Исходя из этого порядка и множества представленных в системе агентов, необходимо генерировать множество агентных сценариев $\{S_A\}$, для которых требуется построить событийные модели описания этих сценариев $\{E_S\}$. Для ускорения разработки МАС целесообразно реализовать базовые программные компоненты для агентов $\{C_B\}$. Таким образом, модель многоагентной системы можно представить, как:

$$M_{MAS} = (A, P_A, S_A, E_S, C_B);$$

где A – множество агентов, P_A – порядок вызова агентов, S_A – совокупность агентных сценариев, E_S – множество событийных моделей, C_B – множество базовых компонентов.

Исходя из того, что на данный момент не существует единого подхода к разработке многоагентных систем, предложен авторский **методический подход к построению типовых многоагентных систем, на примере задачи оценивания состояния ЭЭС**. Основой подхода является метод проектирования и реализации типовой МАС, который реализован в виде методики, включающей следующие этапы:

1. Описание будущей системы, исходя из специфики решаемой задачи.
 - 1.1. Определение цели создания МАС.
 - 1.2. Выделение множества задач $\{T\}$, которые необходимо решить. Поставленная цель G может быть достижима в несколько этапов и включать в себя решение нескольких задач, каждая из которых может быть разбита на подзадачи.
 - 1.3. Определение множества функций МАС $\{F\}$.
 - 1.4. Определение списка будущих агентов $\{A\}$. Алгоритм «большой» задачи необходимо разбить на этапы.
 - 1.4.1. Разработка базовых компонентов МАС $\{C_B\}$.
2. Разработка агентных сценариев.
 - 2.1. Определение порядка вызова имеющихся в системе агентов $\{P_A\}$, включая возможность ветвлений, циклов и распределенных вычислений.
 - 2.2. Разработка сценариев вызова агентов $\{S_A\}$.
 - 2.3. Описание сценариев в виде событийных моделей $\{E_S\}$, с использованием элементов Joiner-сетей.

3. Разработка архитектуры МАС.

3.1. Построение общей структуры будущей системы, на основании ранее созданного списка агентов и сценариев.

3.2. Формулирование функциональных, системных и технических требований к МАС.

3.3. Определение списка базовых технологий для реализации системы.

4. Метод проектирования МАС.

4.1. Построение диаграмм прецедентов, классов и IDEF0-модели для агентов.

4.2. Разработка алгоритма взаимодействия между агентами на основании ранее разработанной событийной модели.

4.3. Проектирование пользовательского интерфейса.

5. Реализация МАС.

5.1. Разработка каждого агента в отдельности, с использованием авторских базовых компонентов МАС, и его тестирование.

5.2. Разработка главного модуля, проверка взаимодействия его и других агентов.

5.3. Тестирование функции мониторинга и корректности работы системы.

Новизна предложенного подхода заключается в разработке сценариев взаимодействия агентов (агентных сценариев), которые предлагается использовать для редактирования алгоритма решения задачи без участия программистов; сценарии формируются энергетиками. Сценарий состоит из списка вызовов агентов и условий их запуска. Пример агентного сценария для решения задачи оценивания состояния ЭЭС приведен на рис. 1.

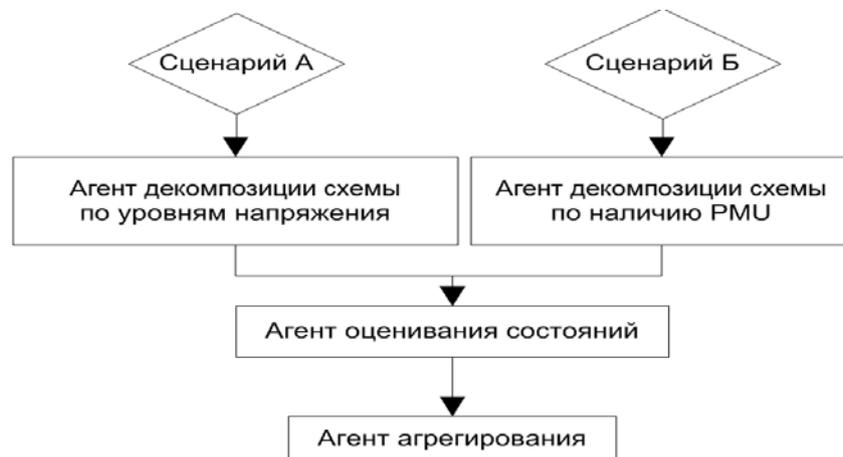


Рис. 1. Агентные сценарии для задачи оценивания состояния ЭЭС.

Основное преимущество применения многоагентного подхода – это возможность организовать распределенную обработку данных. При создании нового или редактировании существующего сценария у пользователя должна быть возможность указать те этапы алгоритма, на которых данные можно разделить между несколькими агентами одного типа. Для создания более гибких алгоритмов также предлагается добавлять в сценарии условные операторы и циклы. В таком случае полученные на текущем этапе результаты будут проходить логическую проверку, по итогам которой будет выполняться то или иное действие.

Автором предложен **вычислительный метод управления взаимодействием агентов на основе алгебраических сетей (Joiner-net)**⁷. Управление взаимодействием агентов осуществляется с помощью агентных сценариев. Система состоит из следующих элементов:

1. Три типа агентов: агент – пользователь (U), агент – менеджер (M), агент – вычислитель (C).
2. Список агентов вычислителей: $L(c_1, c_2, \dots, c_n)$.
3. Список задач $G(g_1, g_2, \dots, g_n)$.
4. Взаимно-однозначное соответствие: $g_i \leftrightarrow c_i$.
5. Множество пусковых (Ψ) и флаговых (Φ) функций.

Для каждого сценария строится событийная модель и описывающая ее Joiner-сеть. Joiner-сеть можно представить в виде набора пусковых и флаговых функций. Предлагается использовать пусковые и флаговые функции для управления MAC и выполнения заданных пользователем сценариев. Метод управления взаимодействием агентов на основе алгебраических сетей:

1. Все флаговые функции принимают значение равно 0.
2. Агент-пользователь (U) определяет сценарий (порядок вызова агентов и условия их запуска), по которому будет проходить расчет, и передает агенту-менеджеру (M) файл с исходными данными (F_D), генерируя событие, задавая флаговую функцию менеджера $= 1$, $U: F_D \rightarrow \Phi_M$. Из события формируется пусковая функция (Ψ_M) для агента-менеджера $U: \Phi_M \rightarrow \Psi_M$.
3. Пусковая функция инициирует работу агента-менеджера $M: \Psi_M \rightarrow M^\Psi$. Агент-менеджер формирует из исходных данных XML-файл $M: F_D \rightarrow F_{XML}$.
4. В зависимости от сценария, агент-менеджер определяет первого агента-вычислителя (c_1) в списке вызова. Передает исходные данные, генерируя событие, и формирует пусковую функцию данного агента $M: M^\Psi \rightarrow M^\Phi \rightarrow \Phi_M \rightarrow \Psi_{c_1}$. После окончания работы агента, инициирующая его флаговая функция принимает значение 0, $\Phi_M := 0$.
5. Пусковая функция инициирует работу агента-вычислителя, который получил данные $c_1: \Psi_{c_1} \rightarrow c_1^\Psi$. Агент выполняет свою часть алгоритма, после чего определяет агента-вычислителя (или агентов) для следующего этапа алгоритма $c_1: F_{XML} \rightarrow F'_{XML}$. В зависимости от задачи на этом этапе возможен выбор из нескольких типов агентов, в том случае, если в алгоритме возможны несколько вариантов развития событий $c_1: L(g) \rightarrow c_i$. Когда агент-вычислитель для следующего этапа определен, для него формируется пусковая функция, а на вход подаются события, которые запускают процесс работы агентов $c_1: c_1^\Psi \rightarrow c_1^\Phi \rightarrow \Phi_{c_1} \rightarrow \Psi_{c_i}$.
6. 5-й этап повторяется до тех пор, пока все задачи из списка G не будут решены и процесс не подойдет к возврату данных агентом-вычислителем агенту-менеджеру $c_n: c_n^\Psi \rightarrow c_n^\Phi \rightarrow \Phi_{c_n} \rightarrow \Psi'_M$.

⁷ Столяров Л.Н., Новик К.В. Joiner-сеть для моделирования взаимодействующих параллельных процессов // Моделирование процессов управления: Сб. научных трудов. Моск. физ.-тех. ин-т. – М., 2004. – С. 81-97.

7. Повторное формирование пусковой функции Ψ'_M у агента-менеджера сигнализирует о том, что все этапы сценария были выполнены и последний агент-вычислитель из цепочки вызовов вернул данные после проведения всех расчетов $M: \Psi'_M \rightarrow M^\Psi, M: F'_{XML} \rightarrow F'_D$. Данные возвращаются к агенту-пользователю.

Подробная реализация данного метода представлена в основном тексте работы.

Для моделирования агентных сценариев разрабатываются событийные модели, которые описываются Joiner-сетью (J-net), что позволит пользователям самостоятельно вносить изменения в алгоритм работы системы без участия программистов. Узлами J-net являются процессы функционирования агентов и события, инициирующие эти процессы и сигнализирующие о прекращении их выполнения. Процессы связываются между собой с помощью входных и выходных событий. Выходные события одного процесса могут являться входными для другого, иначе говоря – инициирующими запуск иного агента. Основные Joiner-элементы описания агентных сценариев представлены в табл. 1.

Таблица 1. Joiner-элементы.

—	Процесс работы агента.
●	Событие, которое генерирует агент после окончания своей работы.
⊂	Пользователь, взаимодействующий с программой.
→	Направление развития событий.

Использование подобных элементов позволит экспертам определить последовательность вызова агентов, а также наглядно описать весь алгоритм решения задачи. Комбинацией из описанных выше элементов можно создать несколько базовых шаблонов, которые представлены на рис. 2.

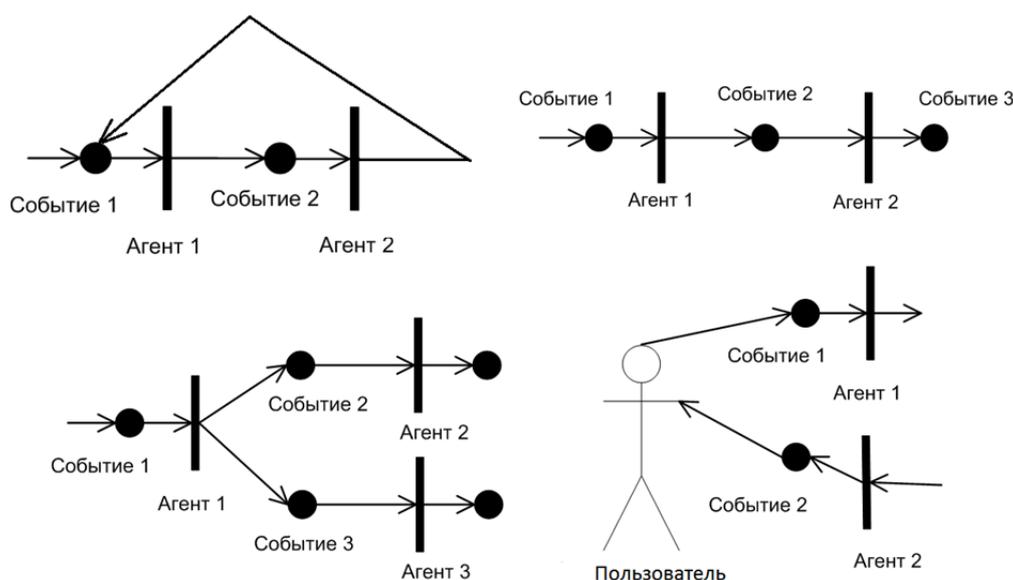


Рис. 2. Шаблоны возможных событий.

Пример событийной модели агентного сценария на основе Joiner-сети показан на рис. 3.

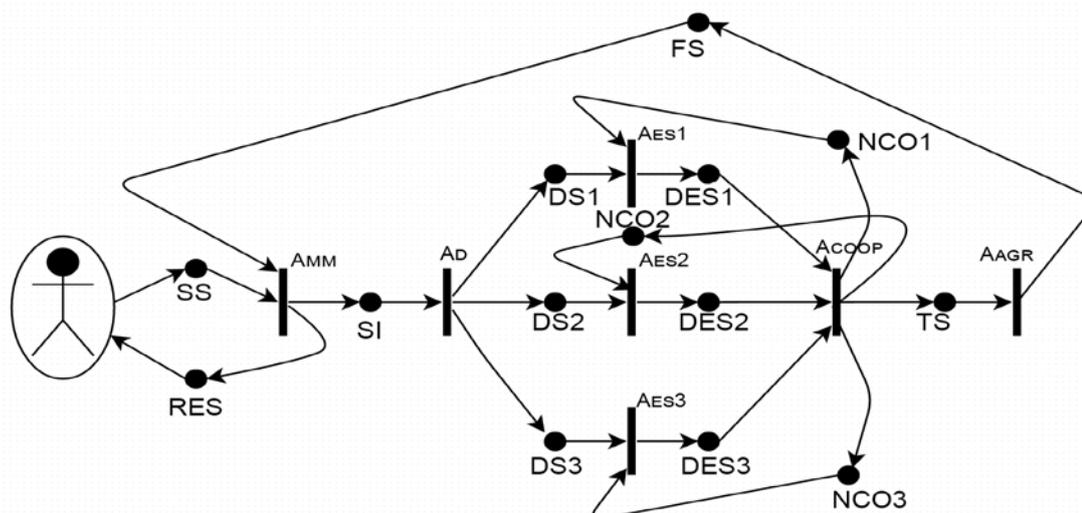


Рис. 3. Joiner-сеть событийной модели агентного сценария.

На рис .3 представлены следующие процессы и события.

Процессы:

A_{MM} – процесс работы главного модуля.

A_D – процесс работы агента декомпозиции схемы.

A_{ES1} , A_{ES2} , A_{ES3} – процесс работы агентов оценивания состояния.

A_{COOP} – процесс работы агента кооперации.

A_{AGR} – процесс работы агента агрегирования.

События:

SS – пользователь отправил исходную схему.

SI – передача исходных данных.

DS1, DS2, DS3 – схема разделена на 3 подсистемы.

DES1, DES2, DES3 – оценивание состояния подсистем завершено.

NCO1, NCO2, NCO3 – согласование между схемами не достигнуто.

TS – согласование достигнуто.

FS – исходная схема собрана из разделенных подсистем.

RES – результаты отправлены пользователю.

Изображенную на рис. 3 схему можно описать совокупностью пусковых и флаговых функции (табл. 2). Эти функции описывают события, которые инициируют наступление процесса или свидетельствуют о его завершении.

Таблица 2. Пусковые и флаговые функции

Пусковые функции:	Флаговые функции:
$\Psi_{mm} = (SS \vee FS) \cdot \overline{SI}$	$\Phi_{mm}: SI := 1, SS := 0$
$\Psi_d = SI \cdot \overline{DS1} \cdot \overline{DS2} \cdot \overline{DS3}$	$\Phi_d: SI := 0, DS1 := 1, DS2 := 1, DS3 := 1$
$\Psi_{es_i} = (DS_i \vee NCO_i) \cdot \overline{DES_i}$	$\Phi_{es_i}: DS_i := 0, DES_i := 1$
$\Psi_{coop} = (\overline{DES1} \cdot \overline{DES2} \cdot \overline{DES3}) \cdot$ $\cdot \overline{NCO1} \cdot \overline{NCO2} \cdot \overline{NCO3} \cdot TS$	$\Phi_{coop}: DES1 := 0, DES2 := 0,$ $DES3 := 0, NCO1 := 1, NCO2 := 1,$ $NCO3 := 1, TS := 1$
$\Psi_{agr} = TS \cdot \overline{FS}$	$\Phi_{agr}: TS := 0, FS := 1$

Для передачи данных по локальной сети, как правило, используется стек протоколов TCP/IP. Большинство программных платформ могут использовать TCP/IP для передачи данных по сети. Таким образом, при помощи TCP/IP мы можем обмениваться информацией между программами, написанными на разных программных платформах. На рис. 4 приведен предлагаемый автором **алгоритм межплатформенного взаимодействия агентов**.

XML-файлы, которые используются в системе, состоят из двух частей. В первой части находится информация о местонахождении агента в локальной сети. Во второй части файла хранятся данные. Это могут быть как данные для расчетов, так и данные для кооперации.

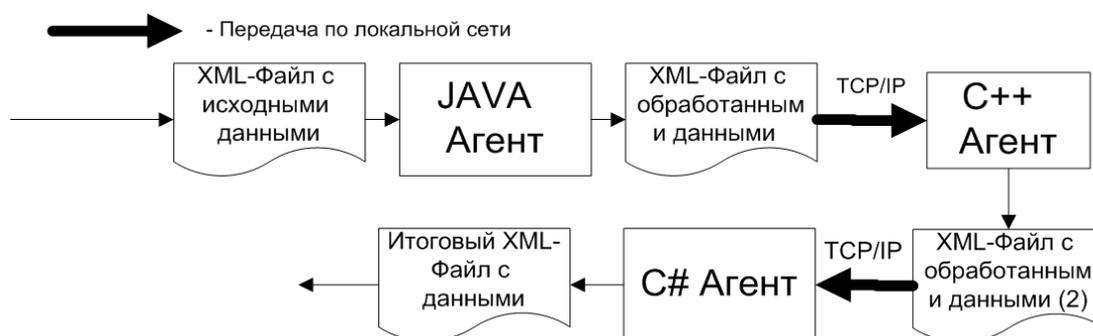


Рис. 4. Алгоритм межплатформенного взаимодействия агентов.

Обо всех изменениях в своем состоянии агент должен известить главный модуль, чтобы тот обладал актуальной информацией о состоянии системы. На рис. 5 представлен **общий алгоритм поведения агентов**.



Рис. 5. Общий алгоритм поведения агентов.

При поиске агентов могут возникнуть сложные ситуации, требующие кооперации между агентами. Ситуации, которые могут возникнуть при поиске

агентов: в первом случае агенту необходимо найти другого агента: $A_i \rightarrow A_j$, где A_i – текущий агент, A_j – следующий агент; во второй ситуации один агент должен найти двух или более агентов, чтобы те продолжили решать задачу, выполняя параллельные вычисления: $A_i \rightarrow A_j, A_i \rightarrow A_k$; самая сложная ситуация, когда нескольким агентам необходимо найти одного: это может произойти, если распределенный этап алгоритма сменяется линейным этапом:

$$A_i, A_j, A_k \rightarrow A_g.$$

При разработке конкретной МАС используются **авторские базовые компоненты**, описанные ниже. Каждый агент в системе, за исключением главного модуля, состоит из трех частей:

- **Передаваемый интерфейс.** Агент делегирует свой интерфейс главному модулю, передает ему информацию о требуемых параметрах, их количество, тип данных и ограничения. На основании этой информации главный модуль генерирует интерфейс для пользователя.
- **Модуль сетевого взаимодействия.** В системе обмен данными происходит при помощи стека протоколов TCP/IP и XML-документов с данными.
- **Вычислительный модуль.** Каждый агент в системе присутствует для того, чтобы решать определенную задачу в рамках общего алгоритма. Данный модуль отвечает за ту работу, которую агент выполняет в системе.

Ядро всей будущей системы – главный модуль. Он так же, как и остальные компоненты, является агентом, однако он обладает большим набором полномочий и функций. Главный модуль отличается от других агентов по наличию определенных базовых компонентов:

- **Генератор пользовательского интерфейса.** Агент в системе передает главному модулю список параметров, которые необходимо указать. Чтобы пользователь имел возможность в удобной форме работать с этими данными, главному модулю необходимо на основании пришедшей от агента информации создать интерфейс для пользователя.
- **Список активных агентов.** Главный модуль должен знать, какие сейчас агенты в сети, по какому адресу они находятся, и какие задачи могут выполнять.
- **Редактор агентных сценариев.** Агентные сценарии применяются для того, чтобы дать пользователям возможность самостоятельно менять алгоритм решения задач, без привлечения программиста.
- **Модуль мониторинга.** Отслеживает состояние каждого агента, его дееспособность и степень выполнения им задачи.

Для функционирования многоагентной системы необходимо, чтобы все ее составляющие работали исправно. Выход из строя одного или нескольких агентов может повлиять как на быстродействие системы, так и полностью вывести ее из строя. Решением данной проблемы может быть введение в систему резервных агентов, которые смогут заменить вышедших из строя. Подобное решение эффективно, но затрачивает дополнительные мощности, что может пагубно повлиять

на быстроедействие системы. Таким образом, необходимо выявить критически важных агентов, выход из строя которых приведет к максимальному ущербу, и принять меры по повышению надежности их работы. Для достижения этой цели предлагается **численный метод оценки надежности многоагентной системы** с использованием теории графов, выявляются критичные компоненты конкретной конфигурации МАС и формулируются рекомендации по повышению надежности работы МАС (пример ее применения приведен в гл. 3). Для оценки надежности МАС разработана методика, реализующая предложенный метод:

1. Построение графа агентных взаимодействий.
2. Анализ структуры графа.
3. Использование методов описания графа (например, построение матрицы смежности для этого графа).
4. Определение степеней вершин на основе определения степеней захода и исхода. $P_i^+(a) = \sum_{j=1}^m q_{ij}$; $P_j^-(a) = \sum_{i=1}^m q_{ij}$; где m – количество вершин, $P_i^+(a)$ – полустепень захода (показатель входящих связей), $P_j^-(a)$ – полустепень исхода.
5. Выделение вершин с наибольшей степенью: $P(a) = P_i^+(a) + P_j^-(a)$.
6. Выявление критически важных для функционирования МАС агентов, на основе ранжирования степеней вершин графа.
7. Формулирование рекомендаций по повышению надежности этих агентов посредством резервирования агентов данного типа.

В третьей главе описана выполненная автором реализация конкретной системы для оценивания состояния ЭЭС «EstateMAS» на основе типовой МАС.

Архитектура системы EstateMAS изображена на рис. 6. Разработанная система EstateMAS состоит из 4-х вычислительных агентов и одного главного модуля. Она включает в себя: агент «Главный модуль», агент декомпозиции, агентов оценивания состояния, агент координации и агент агрегирования. Для реализации агента оценивания состояния используется вычислительное ядро, в его основе лежит ПВК «Оценка-ПК»⁸, который в настоящее время относится к категории унаследованного ПО. Для использования ПВК «Оценка-ПК» автором была разработана «оболочка» (middle-ware), позволяющая агенту использовать все функции данного программного комплекса, без необходимости проводить его реинжиниринг.

В будущем допускается возможность интеграции разработанной системы EstateMAS с другими интеллектуальными инструментальными средствами ОС. Для перехода от качественной оценки такими средствами⁹ к количественной, с использованием ПК, разработано, при участии автора, специальное программное

⁸ Гришин Ю.А., Колосок И.Н., Коркина Е.С., Эм Л.В., Орнов В.Г., Шелухин Н.Н. Программно-вычислительный комплекс «Оценка» оценивания состояния ЭЭС в реальном времени. // Электричество. 1999. №2., С. 8-16.

⁹ Массель Л.В., Массель А.Г. Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 135-141.

средство, которое может быть использовано в дальнейших исследованиях, предполагающих развитие методов оценивания состояния ЭЭС¹⁰.

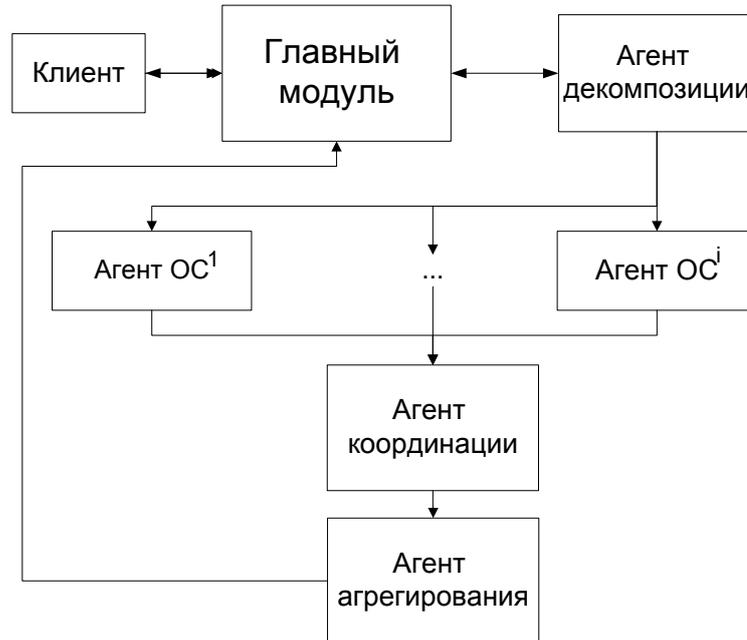


Рис. 6. Архитектура EstateMAS – конкретной многоагентной системы оценивания состояний ЭЭС.

Автором предложена **усовершенствованная многоагентная технология решения задачи оценивания состояния** (табл. 3), на каждом этапе которой используются собственные программные средства поддержки предлагаемой технологии.

Таблица 3. Усовершенствованная многоагентная технология численного решения задачи ОС.

Этап	Программное средство	Результат этапа
Получение задания от пользователя	Главный модуль	Исходные данные получены, запущен процесс решения задачи
Декомпозиция исходных данных	Агент декомпозиции	Расчетная схема разделена на n отдельных подсистем
Оценивание состояния	Агенты ОС	В полученных на прошлом этапе подсистемах проведено оценивание состояния
Проверка значений в граничных узлах	Агент координации	Проведено сравнение значений напряжений и фазовых углов в граничных узлах в разных подсистемах, если согласование значений не достигнуто, в данные внесены коррективы
Объединение данных	Агент агрегирования	Полученные ранее подсистемы вновь объединены в одну с результатами ОС

Программной платформой для разработки выбран «.Net Framework 4.5». Для разработки используются язык C# и среда Microsoft Visual Studio 2013. Для более

¹⁰ Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ, п. 5 в списке публикаций автора.

простого и быстрого внесения изменений за основу структуры ПК взят шаблон проектирования «MVC» (Model-view-controller, «Модель-представление-контроллер»). В каждом агенте содержится от 5 до 11 классов. Общее количество строк кода превышает 6000. На рис. 7 изображена диаграмма классов одного из агентов системы (агента оценивания состояния).

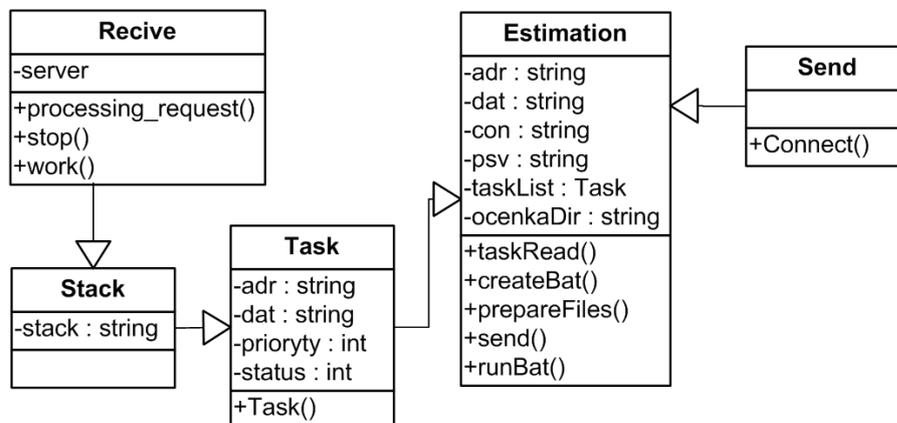


Рис. 7. Диаграмма классов агента оценивания состояния.

После реализации EstateMAS для апробации усовершенствованной многоагентной технологии был проведен вычислительный эксперимент. Задача вычислительного эксперимента заключалась в том, чтобы выполнить декомпозицию схемы "Московского кольца" по уровням напряжения. Первая группа включает в себя узлы с напряжением 750 кВ, вторая группа состоит из узлов с напряжением 500 кВ. В каждую группу также попадают граничные узлы и связи из соседствующей группы.

Результаты декомпозиции представлены графически на рис. 8.

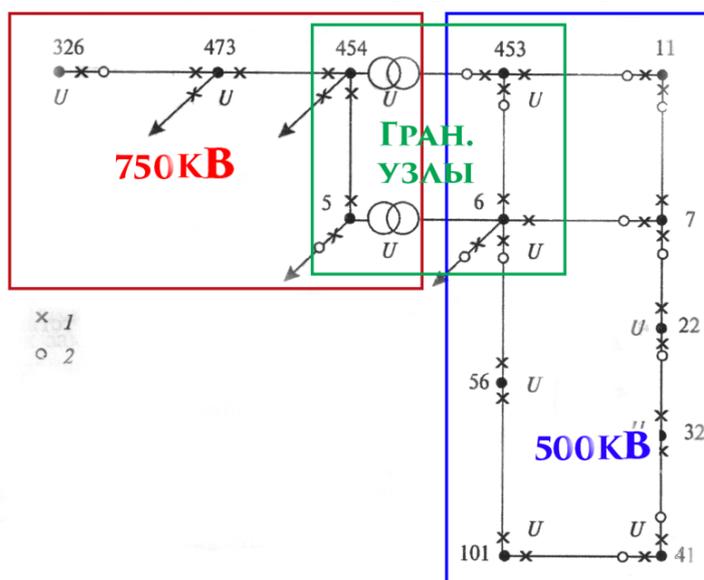


Рис. 8. Схема «Московское кольцо» после декомпозиции.

Для сравнения выполнен расчет полной схемы и получившихся подсистем. Результаты расчетов в ПВК «Оценка-ПК» показаны в таблице 4 (выделены значения в граничных узлах), где U – напряжение (кВ), δ – фазовый угол (в градусах). Была решена задача координации значений в граничных узлах, после чего повторно

проведено оценивание состояний с скорректированными значениями, поэтому разница между показателями минимальна, не превышает установленную в агенте координации погрешность.

Таблица 4. Результаты расчетов.

№ узла	Измеренное напряжение кВ	Оцененные значения					
		Полная схема		Первая подсистема		Вторая подсистема	
		U	δ	U	δ	U	δ
5	752,7	747	-5,85	746,63	-5,42	746,65	-5,44
6	509	517,5	-7,03	517,72	-7,71	517,8	-7,73
7	500	502	-9,39	-	-	502,41	-8,77
11	500	505	-10,14	-	-	505,34	-9,24
22	500	498	-9,03	-	-	498,055	-9,79
32	500	497	-6,71	-	-	496,775	-6,47
41	500	512	-6,16	-	-	511,595	-6,08
56	500	515	-6	-	-	515,125	-5,36
101	500	515	-6,08	-	-	514,98	-5,84
326	750	741	-11,08	740,64	-10,29	-	-
453	510,3	512	-7,06	512,045	-6,92	512,029	-6,92
454	740	740	-4,8	740,35	-4,36	740,35	-4,36
473	750	753	-0,01	753,26	-0,04	-	-

Применим предложенный метод оценки надежности МАС. Построим граф агентных взаимодействий, в котором агенты сопоставлены с вершинами: Amm – главный модуль, Ad – агент декомпозиции, Aesi – агенты оценивания состояния, Асоор – агент координации, Аagr – агент агрегирования. Вершины соединяются дугами, причем дуга из Ai идет в Aj только в том случае, если агент Ai обращается к агенту Aj. Полученный граф представлен на рисунке 9.

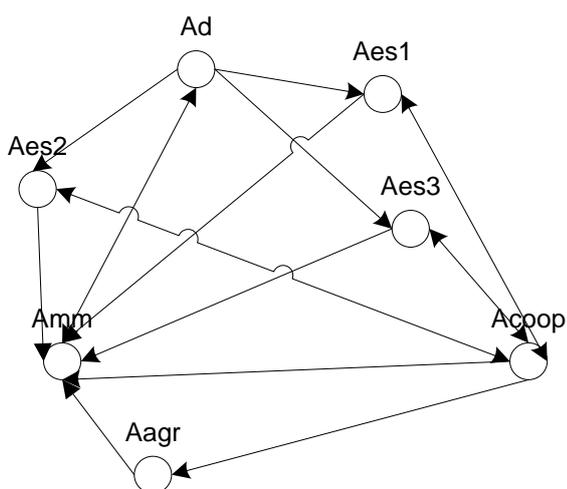


Рис. 9. Граф агентных взаимодействий.

Пользуясь свойствами матриц смежности, можно найти степени вершин $P(a)$.

$$q_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если из вершины } i \text{ идет дуга к вершине } j; \\ 0, & \text{если из вершины } i \text{ нет дуги к вершине } j; \end{cases}$$

Построим матрицу смежности для этого графа (табл. 5):

Степени вершин указаны в таблице 6.

Таблица 5. Матрица смежности для графа (рис. 9).

	Amm	Ad	Aes1	Aes2	Aes3	Acoop	Aagr	$P_j^-(a)$
Amm	0	1	0	0	0	0	0	1
Ad	1	0	1	1	1	0	0	4
Aes1	1	0	0	0	0	1	0	2
Aes2	1	0	0	0	0	1	0	2
Aes3	1	0	0	0	0	1	0	2
Acoop	1	0	1	1	1	0	1	5
Aagr	1	0	0	0	0	0	0	1
$P_i^+(a)$	6	1	2	2	2	3	1	

Таблица 6. Степени вершин.

a	Amm	Ad	Aes1	Aes2	Aes3	Acoop	Aagr
P(a)	7	5	4	4	4	8	1

Отсюда следует, что наибольшую степень имеют (наиболее часто взаимодействуют с другими агентами) и, соответственно, являются критичными агенты: Acoop, Amm, Ad. После выявления критичных агентов могут быть предложены меры по повышению их надежности. На данный момент наиболее доступное решение – резервирование (дублирование) критичных агентов. В принципе, для повышения надежности работы агентов могут быть использованы и другие рекомендации, общие для повышения надежности программного обеспечения.

Проведен также более обширный эксперимент, основанный на данных по системе Красноярскэнерго, состоящей из 111 узлов и 176 связей. Исходная схема была разделена на 2 подсистемы по 27 (включая 11 граничных узлов из другой подсистемы) и 95 узлов (включая 12 граничных узлов из другой подсистемы). Всего было выделено 23 граничных узла, в которые были установлены (программно) датчики РМУ. Поскольку значения узловых напряжений (данные от РМУ) в граничных узлах принимаются за точные, расчет идет относительно этого условия. Таким образом, мы можем исключить агента координации из алгоритма ОС. В итоге расчетные значения обеих подсистем и общей схемы получились идентичными, без необходимости вносить корректировки в значения в граничных узлах. Численные результаты данного примера подробно описаны в основном тексте диссертационной работы. В автореферате, в таблице 7, представлены лишь результаты расчетов малой подсистемы (27 узлов). Поскольку значения расчетов общей схемы и подсистемы совпадают, для сравнения представлен один столбец с оцененным напряжением, а граничные узлы выделены жирным шрифтом. Для этого примера также выполнен анализ надежности МАС, выявлены наиболее критичные агенты: главный модуль и агент декомпозиции.

Таблица 7. Результаты расчетов ЭЭС Красноярска.

№ узла	Измеренное напряжение кВ	Оцененные значения			
		Полная схема		Первая подсистема	
		U	δ	U	δ
6	514.81	501.835	-3.487	501.835	-3.487
8	119.00	119.793	-11.872	119.793	-11.872
9	118.80	119.753	-11.923	119.753	-11.923
10	23.90	23.191	-1.458	23.191	-1.458
11	515.37	502.345	-2.914	502.345	-2.914
12	515.37	502.345	-2.924	502.345	-2.924
14	503.29	501.665	-14.971	501.665	-14.971
22	226.69	225.517	-33.645	225.517	-33.645
23	487.87	481.945	-24.646	481.945	-24.646
24	15.60	14.620	-18.113	14.620	-18.113
25	492.80	486.505	-20.401	486.505	-20.401
37	234.48	225.627	-10.489	225.627	-10.489
39	227.85	220.847	-3.838	220.847	-3.838
40	509.08	496.435	-10.857	496.435	-10.857
41	20.00	18.991	-6.941	18.991	-6.941
70	225.96	232.067	-44.602	232.067	-44.602
72	227.82	240.437	-33.148	240.437	-33.148
88	508.69	489.275	-10.583	489.275	-10.583
89	17.80	16.821	-6.070	16.821	-6.070
100	508.53	489.035	-10.537	489.035	-10.537
101	17.80	16.821	-8.689	16.821	-8.689
267	515.91	510.645	-4.976	510.645	-4.976
469	516.58	514.015	-4.396	514.015	-4.396
545	496.06	496.060	-0.528	496.060	-0.528
888	119.76	126.274	-4.145	126.274	-4.145
889	533.00	535.975	0.000	535.975	0.000
1066	517.82	495.595	-4.464	495.595	-4.464

Использование MAC при декомпозиции задачи ОС обеспечивает возможность проводить расчет отдельных подсистем параллельно, что на системах с большим количеством узлов позволяет ускорить процесс обработки данных, однако это требует решать координационную задачу, что может привести к дополнительным итерациям расчета. Благодаря тому, что пользователь сам задает агентные сценарии, на основе которых автоматически редактируется алгоритм, обеспечивается более гибкий подход к решению задачи.

До разработки MAC «EstateMAS» задача оценивания состояния решалась с помощью ПВК «Оценка-ПК» только для отдельных подсистем. Не предусматривались задание и смена сценариев и операции декомпозиции и координации, которые в MAC «EstateMAS» реализованы и автоматизированы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ существующих подходов к разработке многоагентных систем и возможностей их применения при реализации концепции интеллектуальных энергетических систем на примере задачи оценивания состояния ЭЭС.
2. Предложен методический подход к построению типовых многоагентных систем на примере задачи оценивания состояния ЭЭС и реализована методика, включающая пять основных этапов: проектирование и реализацию МАС, разработку агентных сценариев, алгоритм межплатформенного взаимодействия и поведения агентов, разработку базовых компонентов МАС.
3. Предложен вычислительный метод управления взаимодействием агентов на основе алгебраических сетей. Построены событийные модели агентных сценариев с использованием аппарата Joiner-сетей, позволяющие пользователям самостоятельно вносить изменения в алгоритм работы системы без участия программистов. Использование агентных сценариев обеспечивает гибкость при составлении пользователями алгоритма решения задачи.
4. Разработан численный метод оценки надежности многоагентной системы. Выполнена оценка надежности конфигураций МАС для конкретных задач с использованием разработанного метода.
5. На основе предлагаемого методического подхода выполнены проектирование и реализация многоагентной системы с гибкой архитектурой «EstateMAS» для оценивания состояний ЭЭС. Разработана усовершенствованная многоагентная технология численного решения задачи оценивания состояния с использованием предложенного методического подхода и разработанного программного обеспечения.
6. Проведены вычислительные эксперименты по ОС схем «Московское кольцо» и ЭЭС Красноярска, результаты показали корректность работы МАС. Так же выполнена оценка надежности МАС и выявлены критически важные агенты для разной конфигурации МАС.
7. Результаты диссертационной работы применены в базовом проекте ИСЭМ СО РАН №01201361373 и в проектах по грантам РФФИ №13-07-140 (2013-2015), №16-07-00474 (2016-2018), №15-07-01284 (2015-2017), гранту Программы Президиума РАН №229 (2012-2014), №15-07-04074 Бел_мол_а (2015-2016), а так же грант СО РАН Института энергетики НАН Беларуси №18Б (2012-2014). В рамках двух последних проектов результаты диссертационной работы переданы и использованы в Институте энергетики НАН Беларуси.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах из списка ВАК:

1. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентных систем распределенного решения энергетических задач с использованием агентных сценариев // Известия Томского политехнического университета Т. 326. № 5, 2015.– С. 45-53.
2. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентной системы оценивания состояния электроэнергетических систем с использованием событийных моделей // Наука и образование. – №9. – 2015. – М.: МГТУ им. Баумана. Эл. №ФС77-4211. ISSN 1994-0448. DOI: 10.7463/ 0915. 0811180.

3. Массель Л.В., Гальперов В.И. Проектирование и разработка многоагентной системы оценивания состояния ЭЭС // Вестник ИрГТУ. – 2015. – №10. – С. 27 -33.
4. Массель Л.В., Гальперов В.И. Анализ надежности работы многоагентных систем с использованием графовой модели // Вестник ИрГТУ. – 2017. №1.– С. 72-80.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

5. Массель Л.В., Курганская О.В., Гальперов В.И. Настольное приложение для интеллектуального контроля и преобразования данных для вычислительного эксперимента в исследованиях энергетической безопасности IntDataTransformer Lite. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612394 от 18.02.2016.
6. Массель Л.В., Гальперов В.И. Многоагентная система для оценивания состояния ЭЭС «EstateMAS». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661113 от 30.09.2016.
7. Массель Л.В., Гальперов В.И. Агент мониторинга и контроля функционирования многоагентной системы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661065 от 28.09.2016.
8. Массель Л.В., Гальперов В.И. Агент агрегирования. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661106 от 30.09.2016.
9. Массель Л.В., Гальперов В.И. Агент координации. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661105 от 28.09.2016.
10. Массель Л.В., Гальперов В.И. Агент оценивания состояния ЭЭС. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661107 от 30.09.2016.
11. Массель Л.В., Гальперов В.И. Агент декомпозиции схемы ЭЭС. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661005 от 30.09.2016.

В других изданиях:

12. Гальперов В.И., Колосок И.Н., Массель Л.В., Пальцев А.С. Постановка задачи разработки мультиагентной системы для оценивания состояния ЭЭС с учетом структурной и функциональной декомпозиции / Труды XVIII Байкальской Всероссийской конференции "Информационные и математические технологии в науке и управлении". Часть III. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. – С. 231-234.
13. Гальперов В.И. Агентные сценарии для разработки многоагентных систем оценивания состояния ЭЭС / Труды XIX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть III. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – С. 76-80.
14. Гальперов В.И. Применение многоагентного подхода для разработки программных систем оценивания состояния ЭЭС. – Системные исследования в энергетике/ Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып. 44. – Иркутск ИСЭМ СО РАН, 2014.- С. 165-170.
15. Гальперов В.И. «Методика построения многоагентных систем с использованием Joiner-сетей для описания сценариев взаимодействия агентов» / Системные исследования в энергетике: Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Вып. 45. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 153–160.
16. Massel L.V., Galperov V.I. The development of multi-agent system state estimation of electric power systems using joiner-networks. / Proceedings of the Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2015), Rome, Italy, September 22–26, 2015, Vol. 2, Ufa State Aviation Technical University, 2015, pp. 1-6.
17. Гальперов В.И. Проектирование многоагентной системы оценивания состояния ЭЭС / Труды XX Байкальской Всероссийской конференции "Информационные и математические технологии в науке и управлении". Часть II. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 7-13.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.
Заказ № 46 Тираж 100 экз.