

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ**

Научный журнал

№ 3 (7)



ISSN 2413 – 0133

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
Андрианов А.Н., д.ф.-м.н., Москва, ИПМ РАН
Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Донской В.И., ак. Крымской АН, Симферополь, Тавр. академия им. В.И. Вернадского
Дунаев М.П., д.т.н., Иркутск, ИРНТУ
Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Казаков А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАН
Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины
Силич В.А., д.т.н., Томск, ТПУ
Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Федотов А.М., чл.-корр. РАН, Новосибирск, ИВТ СО РАН
Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН
Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – главный редактор
Макагонова Н.Н., к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – выпускающий редактор
Копайгородский А.Н., к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – редактор
Массель А.Г., к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – редактор
Иванов Р.А., к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – дизайнер

Рабочие контакты

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 441

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 440

Массель Л.В.,
e-mail: massel@isem.irk.ru
Макагонова Н.Н.,
e-mail: mak@isem.irk.ru

Сайт журнала и конференции ИМТ - <http://imt.isem.irk.ru>



«Information and mathematical technologies in science and management» 2017 № 3 (7)

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН © Все права принадлежат авторам публикуемых статей.

Подписано в печать 20.10.2017 г. Тираж 100 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

7

Математически информационные технологии в энергетике

Комендантова Н.П.

Необходимость системного подхода к управлению рисками энергетической революции 11

Гальперова Е.В.

Методический инструментарий для долгосрочного прогнозирования спроса на энергоносители для разных временных стадий 22

Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И.

Онтологическая модель угроз энергетической безопасности 35

Еделев А.В., Еделева О.А., Нгуен Хоай Нам

Моделирование топливно-энергетического комплекса на основе энергетических хабов при воздействии крупных возмущений 43

Пяткова Н.И., Береснева Н.М.

Моделирование критических инфраструктур энергетики с учетом требований энергетической безопасности 54

Математическое моделирование

Филиппова Ю.Ф.

Многовариантное моделирование при практической оптимизации стержневого каркаса крупногабаритного рефлектора 66

Скоробогатова М.В.

Сравнительный анализ оптимальной геометрии нижней поверхности низколетящего крыла, полученной в результате решения оптимизационной задачи аналитическим и численным методами 75

Быков А.А., Курако М.А., Симонов К.В.

Алгоритмы аппроксимации и кластеризации данных геомониторинга для оценки параметров источника цунами 85

Гвоздев В.Е., Христодуло О.И., Блинова Д.В., Набиева А.А.

Моделирование состояния территориальных систем по комплексу разнотипных показателей 93

Алексеев А.О., Алексеева И.Е., Спирина В.С.

Применение ситуационного центра имитационных деловых игр в образовании 101

Методы искусственного интеллекта

Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю., Рындин Д.А.



Решение задачи оптимального управления группой роботов эволюционными алгоритмами	109
Булатов Ю.Н., Крюков А.В.	
Интеллектуальная настройка регуляторов установок распределенной генерации	122
Феокистов А.Г., Костромин Р.О.	
Извлечение знаний агентами в системе управления распределенными вычислениями	136
Боровикова О.И., Загорулько Г.Б., Загорулько Ю.А., Шестаков В.К.	
Использование паттернов для разработки онтологии информационно-аналитического интернет-ресурса «Поддержка принятия решений»	144
Сидорова Е.А., Гаранина Н.О., Кононенко И.С.	
Подход к разрешению референциальной неоднозначности текста при пополнении онтологии	154
Ахмадеева И.Р., Серый А.С., Шестаков В.К.	
Некоторые особенности реализации платформы для построения информационно-аналитических Интернет-ресурсов	168
Правила приема статей в журнал	176



EDITOR'S FOREWORD

Mathematical and information technologies in energy sector

Komendantova N.P.

Necessity of system approach to risk management of energy revolution 11

Gal'perova E.V.

Methodical tool for different time stages for long-term forecasting of energy demand 22

Vorozhtsova T.N., Pyatkova N.I.

Ontological model of energy security threats 35

Edelev A.V., Edeleva O.A., Nguyen Hoai Nam

The modeling of energy sector with impact of large perturbations on the basis of energy hubs 43

Pyatkova N.I., Beresneva N.M.

Modeling of critical energy infrastructures taking into account energy security 54

Mathematical modeling

Filippova J.F.

Multivariate modeling for practical optimization of the skeleton frames large-sized reflector 66

Skorobogatova M.V.

Comparative analysis of the optimal geometry of the lower surface of the low-winging wing obtained by the solution of the optimization problem with analytical and numerical methods 75

Bykov A.A., Kurako M.A., Simonov K.V.

Geomonitoring data approximation and clustering algorithms for tsunami source parameters estimation 85

Gvozdev V.E., Khristodulo O.I., Blinova D.V., Nabieva A.A.

Modeling of the territorial systems state on a complex of indicators different types 93

Alekseev A.O., Alekseeva I.E., Spirina V.S.

The application of the imitative business games situational center in education 101

Methods of artificial intelligence

Diveev A.I., Shmalko E.Yu., Ryndin D.A.

Solution of optimal control problem for group of robots by evolutionary algorithms 109

Bulatov Yu.Y., Kryukov A.V.

Intelligent tuning of distributed generators regulators 122

Feoktistov A.G., Kostromin R.O.

Knowledge elicitation by agents in distributed computing management system 136

Borovikova O.I., Zagorulko G.B., Zagorulko Yu.A., Shestakov V.K.

Use of patterns for the development of the ontology for the information-analytical internet resource "Decision support" 144

Sidorova E.A., Garanina N.O., Kononenko I.S.



Approach to textual reference ambiguity resolution in the process of ontology
population 154

Akhmadeeva A.R., Sery A.S., Shestakov V.K.
Some features in implementing a platform for creating information-analytical
internet resources 168

Call for papers 176



ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Уважаемые читатели и участники традиционной Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении»!

Последние десять лет Труды конференции издавались в 2-х – 3-х томах к началу конференции. В 2016-2017 гг. отобранные и отрецензированные статьи по материалам докладов, представленных на конференции, публикуются в одноименном научном журнале, который издается как периодическое издание четыре раза в год. Журналу присвоен международный индекс ISSN. В 2016 г. вышли четыре выпуска журнала (четвертый – в двух частях), в 2017 - два. Все статьи представлены в E-library и проиндексированы в РИНЦ. Также можно ознакомиться с ними на сайте Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, в котором издается журнал: <http://isem.irk.ru/publications>.

Наша конференция проводится с 1993 г. (в 2018 г. исполняется 25 лет работы конференции). Начиная с 1998 г., конференция проводится ежегодно, с 2001 г. – при поддержке РФФИ. Характер конференции – междисциплинарный. В конференции традиционно принимают участие до 200 человек из разных городов нашей страны, от Владивостока до Санкт-Петербурга, и из других стран. Члены редколлегии журнала, как правило, являются членами программного комитета конференции, его тематика совпадает с тематикой конференции.

Вашему вниманию предлагается третий выпуск 2017 г., который включает три раздела. Первый раздел, **«Математические и информационные технологии в энергетике»**, открывается статьей Н.П. Комендантовой (Австрия, Лаксенбург, Международный институт прикладного системного анализа) «Необходимость системного подхода к управлению рисками энергетической революции». В статье, на примере опыта энергетической революции в Австрии, обосновывается необходимость системного подхода, основанного на понимании экономических, социальных и технологических факторов, и рассматривается его применение для комплексной оценки рисков энергетической революции и выработки стратегий по управлению рисками. Отмечается важность учета человеческого фактора и разрешения конфликтных ситуаций при внедрении инфраструктурных проектов. В следующей статье Гальперовой Е.В. (Иркутск, ИСЭМ СО РАН) «Методический инструментарий для долгосрочного прогнозирования спроса на энергоносители для разных временных стадий исследований» предлагаются метод определения допустимой ошибки прогноза спроса на топливно-энергетические ресурсы и инструментарий (набор моделей) для прогнозирования спроса на энергоносители, важной особенностью которого является соответствие сложности и детализации моделей, с учетом объективно существующей погрешности исходной информации для разных временных стадий исследования. Статья



Ворожцовой Т.Н. и Пятковой Н.И. (Иркутск, ИСЭМ СО РАН) «Онтологическая модель угроз энергетической безопасности» представляет онтологическую модель, предназначенную для структуризации, формализованного представления и обмена знаниями между исследователями-энергетиками и специалистами в области информационных технологий. Модель рассматривается как часть онтологического пространства знаний в области энергетики, построенного в результате онтологического инжиниринга предметной области, основанного на выявлении базовых понятий и взаимосвязей между ними. В статье Еделева А.В., Еделева О.А. (Иркутск, ИСЭМ СО РАН) и Нгуен Хоай Нама (Вьетнам, Ханой, Институт энергетической науки ВАНТ) «Моделирование топливно-энергетического комплекса на основе энергетических хабов при воздействии крупных возмущений» рассматривается новый подход к исследованию поведения топливно-энергетического комплекса (ТЭК) при воздействии крупных возмущений. Модель сети энергетических хабов по сравнению с другими моделями энергетики даёт более удобную схему представления территориально-производственной структуры энергетики страны для разработки программного обеспечения. Прототип модели был опробован на данных энергетики Вьетнама, результаты показали адекватность разработанной модели ТЭК в виде сети энергетических хабов. В завершающей статье этого раздела, Пятковой Н.И. и Бересневой Н.М. (Иркутск, ИСЭМ СО РАН), «Моделирование критических инфраструктур энергетики с учетом требований энергетической безопасности», предлагается рассматривать отраслевые системы энергетики и объединяющий их ТЭК, как совокупность критических инфраструктур. Представлены разработанные модели для проведения исследований, с позиций энергетической безопасности, с учетом динамики, а также инструмент расчета и анализа состояний ТЭК в контексте критической инфраструктуры.

Второй раздел, «**Математическое моделирование**», открывается статьей Филипповой Ю.Ф. (Красноярск, Институт вычислительных технологий СО РАН) «Многовариантное моделирование при практической оптимизации стержневого каркаса крупногабаритного рефлектора». В статье представлен многовариантный подход к моделированию стержневого каркаса рефлектора, конструктивного улучшения расположения стержней для снижения весовых характеристик, показателя среднеквадратического отклонения поверхности зеркала при эксплуатационных нагрузках от теоретической поверхности параболоида; приведен пример практической оптимизации стержневого каркаса рефлектора. Статья Скоробогатовой М.В. (Иркутск, Иркутский филиал Московского Государственного Технического Университета Гражданской Авиации) «Сравнительный анализ оптимальной геометрии нижней поверхности низколетящего крыла, полученной в результате решения оптимизационной задачи аналитическим и численным методами» посвящена исследованию задач экстремизации ряда различных



аэродинамических коэффициентов для улучшения эксплуатационных характеристик летательных аппаратов. Отмечается, что задачи оптимизации геометрии крыла обычно решают классическими методами вариационного исчисления, однако характерной особенностью таких задач является то, что они в подавляющем большинстве случаев имеют избыток граничных условий, накладываемых на экстремаль, так, что их число превышает порядок дифференциального уравнения необходимого условия экстремума. В качестве альтернативы решения оптимизационных задач, аналитическое решение которых трудно или невозможно, предлагается использование численных методов оптимизации. Статья Быкова А.А., Курако М.А. (Красноярск, Сибирский федеральный университет) и Симонова К.В. (Институт вычислительного моделирования СО РАН) «Алгоритмы аппроксимации и кластеризации данных геомониторинга для оценки параметров источника цунами» посвящена вопросам разработки алгоритмического обеспечения для обработки и сравнительного анализа различных моделей оценки параметров источника цунами, которые имеют в своей основе данные геомониторинга. Рассмотрены классические способы оценки параметров источника цунами на основе анализа форшокового процесса, блочно-клавишной и поршневой моделей. Предлагаются алгоритмы и методика расчетов, включающая нелинейную регрессию для построения аппроксимационных функций и метод построения упругих сеток для кластеризации пространственных данных. В статье Гвоздева В.Е., Христуло О.И., Блиновой Д.В., Набиевой А.А. (Уфа, Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет) «Моделирование состояния территориальных систем по комплексу разнотипных показателей» рассматривается подход к формированию безразмерного интегрального показателя состояния территории, что делает возможным сравнительный анализ уникальных геотехнических систем. В основе подхода лежит системное сочетание метода идеальной точки, статистических индексов и балльных шкал, конструируемых как для измерительных, так и для экспертных данных. Описаны основные принципы построения балльных шкал, реализация которых позволяет строить шкалы для параметров различного масштаба и единиц измерения, что делает возможным сопоставление различных территорий. В качестве примера приводятся результаты комплексного анализа состояния пожарной безопасности районов Республики Башкортостан. В завершающей статье этого раздела Алексеева А.О., Алексеевой И.Е., Спириной В.С. (Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)), «Применение ситуационного центра имитационных деловых игр в образовании» описаны архитектура ситуационного центра имитационных деловых игр ПНИПУ и возможности его использования в образовательном процессе. Приводятся сведения о серии разработанных авторами деловых имитационных игр «Инвестиции в рынок недвижимости», «Управление коммерческой недвижимостью» и «Управление жилой недвижимостью», используемых как активный метод обучения при подготовке магистров по программам «Технологии «Информационные и математические технологии в науке и управлении» 2017 № 3 (7)



управления недвижимостью» и «Риск-менеджмент в строительстве».

Третий раздел, «**Методы искусственного интеллекта**», открывается статьей Дивеева А.И., Шмалько Е.Ю (Москва, ФИЦ «Информатика и управление» РАН) и Рындина Д.А. (Москва, Российский университет дружбы народов) «Решение задачи оптимального управления группой роботов эволюционными алгоритмами». В статье рассматривается решение задачи оптимального управления для группы роботов эволюционными численными методами. Приведен пример решения задачи оптимального управления группы из трех роботов с динамическими и статическими фазовыми ограничениями. В качестве сравнения приведено решение той же задачи градиентными методами. Показано, что эволюционные алгоритмы в рассматриваемой технически сложной задаче работают эффективнее. Следующая статья, Булатова Ю.Н. (Братск, Братский государственный университет) и Крюкова А.В. (Иркутск, Иркутский государственный университет путей сообщения) «Интеллектуальная настройка регуляторов установок распределенной генерации», посвящена применению интеллектуальных алгоритмов управления в электроэнергетических системах, а именно, повышению устойчивости параллельной работы синхронных турбо- и гидрогенераторов установок распределенной генерации (РГ) путем их оснащения автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ). Рассматривается система адаптивного управления согласованной настройкой АРВ и АРЧВ в различных режимах работы синхронных генераторов установки РГ с использованием генетического алгоритма и нечеткой логики, используются современные технологии цифровой обработки сигналов: вейвлет-преобразование, дискретное быстрое преобразование Фурье, весовые окна. На основе выполненного моделирования показана эффективность использования предлагаемого адаптивного блока управления параметрами АРВ и АРЧВ, заключающаяся в уменьшении времени переходного процесса и перерегулирования напряжения и частоты вращения ротора генератора, а также в обеспечении необходимого запаса устойчивости. В статье Феоктистова А.Г., Костромина Р.О. (Иркутск, Институт динамики систем и теории управления СО РАН) «Извлечение знаний агентами в системе управления распределенными вычислениями» рассматривается проблема управления масштабируемыми приложениями для решения больших научных задач в гетерогенной распределенной вычислительной среде. Для ее решения разработана мультиагентная система для управления масштабируемыми приложениями, основанная на применении специальной концептуальной модели вычислительной среды, включающей различные компоненты комплексных знаний как об окружающей среде, так и о предметных областях решаемых задач. Предложен новый подход к извлечению этих компонентов знаний посредством комплексного использования концептуального моделирования распределенных вычислений, классификации заданий и ресурсов, а также параметрической настройки алгоритмов



функционирования агентов. Практические эксперименты подтверждают эффективность мультиагентного управления масштабируемыми приложениями. Завершают выпуск три статьи сотрудников Института систем информатики СО РАН (Новосибирск). В статье Боровиковой О.И., Загорулько Г.Б., Загорулько Ю.А., Шестакова В.К.: Использование паттернов для разработки онтологии информационно-аналитического Интернет-ресурса «Поддержка принятия решений» обсуждаются вопросы использования паттернов онтологического проектирования, которые позволяют описывать как типовые, так и специфические проблемы, возникающие при разработке онтологий, а также предлагаемые разработчиками рекомендации и соглашения для их решения. Описание проблем и паттернов, предлагаемых для их решения, даётся на примере разработки онтологии для информационно-аналитического интернет-ресурса по поддержке принятия решений. В следующей статье этого коллектива, Сидоровой Е.А., Гараниной Н.О. и Кононенко И.С. «Подход к разрешению референциальной неоднозначности текста при пополнении онтологии», предлагается подход к разрешению референциальной неоднозначности, возникающей в процессе автоматического анализа текста и извлечения информации при пополнении онтологии предметной области. Предложена модель разрешения референции, рассмотрены меры близости между потенциальными кореферентами, построенными на основе текстовых и семантических референциальных факторов, и предложен онтологический подход к формированию кандидатов и выбору наилучшего претендента. В статье Ахмадеевой И.Р., Серого А.С., Шестакова В.К. «Некоторые особенности реализации платформы для построения информационно-аналитических Интернет-ресурсов» обсуждаются возможности и области применения платформы для построения информационно-аналитических Интернет-ресурсов (ИАИР), основанных на технологиях Semantic Web, а также проблемы, возникающие при ее разработке. Исследуются пути совместного использования метода Linked Data и логического вывода для создания информационных ресурсов различного назначения, приводится пример применения данной платформы для создания ИАИР по поддержке принятия решений.

В приложении приводятся правила приема статей в журнал.

Мы рады сообщить Вам, что уже определены сроки и место проведения следующей, XXIII Байкальской конференции. Иркутская сессия конференции состоится 29-30 июня, Байкальская сессия – с 1 по 8 июля. Информация будет размещена на сайте конференции и разослана постоянным участникам. Ждем Ваши заявки и статьи в первые номера журнала 2018 г. Желаем удачного завершения важных дел этого года и новых свершений!

Л.В. Массель



УДК 621.11:338.27

**МЕТОДИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СПРОСА НА ЭНЕРГОНОСИТЕЛИ ДЛЯ РАЗНЫХ
ВРЕМЕННЫХ СТАДИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Гальперова Елена Васильевна

К.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник отдела «Взаимосвязей энергетики и экономики»,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, e-mail: galper@isem.irk.ru

Аннотация. Предложен метод определения допустимой ошибки прогноза спроса на топливно-энергетические ресурсы, не оказывающей заметного влияния на рассматриваемые варианты развития ТЭК. Представлен инструментарий (набор моделей) для прогнозирования спроса на энергоносители, важной особенностью которого является соответствие сложности и детализации моделей, объективно существующей погрешности исходной информации для разных временных стадий исследования.

Ключевые слова: модель, оптимизация, прогнозирование, неопределенность, Монте-Карло, ценовая эластичность спроса, энергоносители.

Введение. Долгосрочное прогнозирование представляет собой начальный этап разработки и обоснования перспектив развития энергетики. Его основные цели:

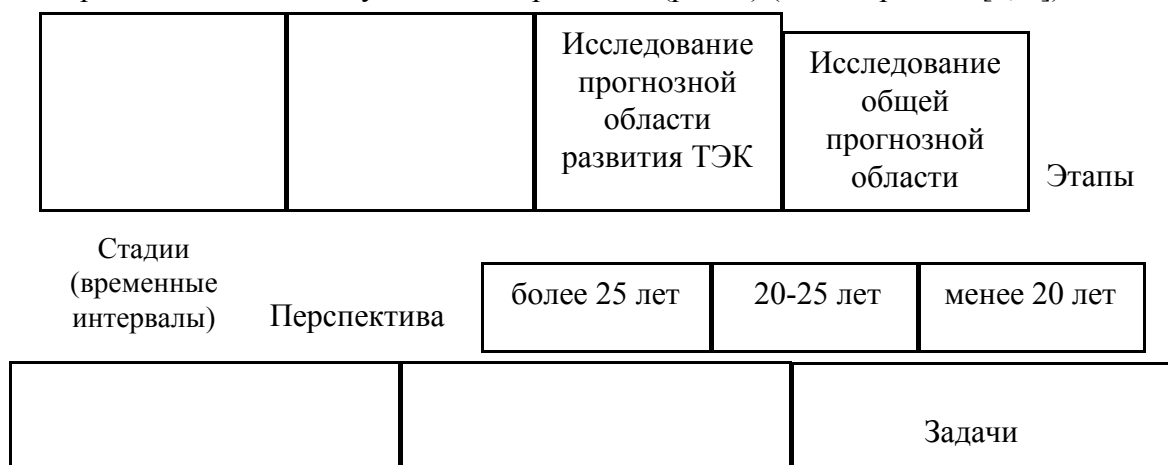
- очертить область допустимого и эффективного развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны;
- выявить проблемы, которые могут возникнуть в процессе развития;
- дать необходимую информацию для разработки энергетической стратегии и политики страны и регионов, генеральных схем развития отраслей энергетики, бизнес-планов энергетических компаний.

Сложности при долгосрочном прогнозировании развития энергетики в настоящее время обусловлены изменением взаимосвязей внутри самого топливно-энергетического комплекса, усилением взаимозависимости энергетики и экономики, а также ростом неопределенности их будущего развития. Именно необходимость учета большого числа неоднозначных факторов формирует широкий спектр возможных вариантов перспективного развития ТЭК. Для практических целей из него необходимо выделить те, которые в наибольшей степени соответствуют эффективной (по разным критериям) стратегии [11].



Методы учета фактора неопределенности при прогнозных исследованиях ТЭК в нашей стране были разработаны еще в 70-80-х годах прошлого века (см., например, [1, 12, 13]). В настоящее время в условиях усиления рыночных отношений в экономике и ТЭК, возрастания роли финансовых и ценовых факторов, трансформации в методах и способах управления, роста противоречий между государством и отдельными энергетическими компаниями возникает необходимость в их модификации и дальнейшем развитии.

1. Особенности методического подхода к сужению зоны неопределенности при долгосрочном прогнозировании ТЭК. В ИСЭМ СО РАН разрабатывается методический подход к повышению обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК. Особенность подхода состоит в разбиении процесса прогнозного исследования на три основных последовательных этапа и несколько временных стадий. Сужение зоны неопределенности прогнозов основывается, в том числе, на выделении на каждом этапе и временном интервале особо важных и сложных задач для более глубокой их проработки с целью определения наиболее устойчивых решений (рис. 1) (см. подробнее [8, 9]).



		Сценарии условий развития ТЭК
--	--	--

Рис. 1. Схема поэтапного подхода к повышению обоснованности долгосрочного прогнозирования развития ТЭК [8]

Важной чертой подхода является соответствие его принципу адекватности используемого инструментария погрешности исходных данных и необходимой точности результатов решаемых задач. Сложность и детализация методов и моделей на разных временных стадиях исследования должна учитывать объективную неопределенность будущих условий, присущую каждому прогнозному интервалу. Другими словами, чем более продолжителен горизонт прогноза, тем проще должны быть модели и меньше уровней их иерархии (рис. 2). Кроме того, чем больше временной интервал прогнозирования, тем менее достоверными становятся результаты оптимизационных расчетов, и их следует заменять многовариантными исследованиями на основе имитационных моделей.



Как видно из рис. 2 одной из наиболее важных задач, выделяемых на каждой временной стадии исследования ТЭК является прогноз конъюнктуры (спроса и цен) региональных энергетических рынков. Определение возможного диапазона динамики цен на энергоносители является самостоятельной задачей, один из подходов к ее решению описан в [9]. При определении прогнозного диапазона потребности в энергии на каждой временной стадии должны учитываться соответствующие перспективы научно-технологического прогресса (НТП) в производстве и потреблении энергоносителей, ожидаемые изменения в экономике страны и показателях качества жизни населения. Требования к инструментарию и методам исследования спроса на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) для разных временных стадий должны быть различными, соответствующими объективной неопределенности используемой исходной информации.

Результаты прогно-зов подготовитель-ног	более 25 лет	Перспектива	до 20 лет
---	--------------	-------------	-----------

4

4

6



Рис. 2. Состав и взаимосвязи решаемых задач на разных стадиях исследования вариантов долгосрочного развития ТЭК [8]

1 – перспективы ТЭК; 2 – исследование конъюнктуры региональных энергетических рынков (спрос и цены); 3 – оценка барьеров и угроз; 4 – развитие отраслей ТЭК; 5 – взаимосвязь с макроэкономикой; 6 – стратегические планы энергетических компаний

2. Предлагаемый метод оценки допустимой ошибки прогнозов ТЭР.

Приближенное представление о диапазонах неопределенности и необходимой точности прогнозируемых показателей на разных временных периодах может дать анализ разработанных ранее прогнозов. Обобщение таких работ, выполненных в США в период 1995-2013 гг., приведенное в [9], показало, что значение диапазонов неопределенности потребности в первичных энергоресурсах (ПЭР), возрастает с 5-10% для перспективы 5 лет, до 13-23% для 10-15 лет и до 22-38% для 20-25 лет. Для России аналогичные показатели, рассчитанные на основе Энергетических стратегий до 2010, 2020 и 2030 гг. представлены в [3] и имеют соизмеримые диапазоны: для 5 лет - 3-5%, для 10-15 лет - 7-15%, для 20-25 лет - 10-32%. Ошибка прогнозов, рассчитанная на основе сравнения прогнозных показателей Энергетической стратегии России до 2010 г. и Энергетической стратегии России до 2020 г. с реально достигнутыми отчетными данными по потреблению ПЭР, составила на перспективу 10 лет – 3-15%, на 20 лет – 4-20%, для электроэнергии это 3-8%, 6-24% соответственно, т.е. диапазоны неопределенности и ошибки прогнозов достаточно близки.

Там же показана зависимость неопределенности прогноза производства и потребления энергоресурсов от горизонта прогнозирования t :

- для потребления первичной энергии $I = 1,13t - 3$ ($R^2 = 0,74$)
- для потребления электроэнергии $I = 1,6t - 5,4$ ($R^2 = 0,89$)
- для производства первичной энергии $I = 0,75t + 1,5$ ($R^2 = 0,9$)

В [3] сделаны выводы, что (1) неопределенность прогнозов растет с увеличением горизонта прогнозирования, (2) величина и характер ее изменения во времени различаются для разных прогнозируемых показателей, (3) для перспективной потребности в ПЭР она увеличивается на 1,1-1,4% на каждый последующий год прогнозного периода.

Оценка интервалов неопределенности в существующих прогнозах производства и потребления энергоресурсов, разработанных в нашей стране и за рубежом, может быть ориентиром при определении допустимой ошибки (приемлемой точности) прогнозов для разной временной перспективы.

Для определения допустимой ошибки прогноза ТЭР на всех временных стадиях исследования перспектив развития ТЭК автором предлагается подход, который исходит из



того, что ошибка в прогнозе спроса на энергоносители не должна оказывать влияние на рассматриваемые варианты развития ТЭК, то есть изменение объемов спроса на энергию в пределах прогнозного диапазона не должно отражаться на структуре ее производства.

Для каждой временной стадии задача формулируется следующим образом. Необходимо найти такой диапазон спроса на данный вид ресурса, при подстановке границ которого в оптимизационную модель ТЭК структура производства топлива и электроэнергии остается неизменной. Определение допустимой ошибки выполняется по следующей схеме:

- а) определяется максимально возможный интервал спроса на ресурс для рассматриваемого сценария экономики;
- б) находятся средние значения спроса из интервала для каждого вида энергоресурса;
- в) на модели ТЭК для среднего варианта рассчитывается структура его покрытия (например, для электроэнергии - доля ТЭС, АЭС, ГЭС, ВИЭ и т.д. в суммарном производстве);
- г) далее, изменением (с определенным шагом) в сторону верхней и нижней границы диапазона формируется последовательность вариантов спроса, для каждого из которых с помощью модели ТЭК рассчитывается структура производства.
- е) как только изменение спроса приводит к изменению структуры производства, расчеты заканчиваются; последние варианты верхней и нижней границы диапазона, при которых структура еще остается неизменной, являются тем интервалом, точность которого приемлема для прогнозных исследований ТЭК.

3. Комплект моделей ИСЭМ СО РАН для прогнозных исследований спроса на энергоносители на разных временных стадиях. В ИСЭМ СО РАН для прогноза спроса на ТЭР используются модели, погрешность результатов решения которых соответствует объективной неопределенности используемых исходных данных. При разработке моделей использован принцип агрегирования/разагрегирования объектов и их связей в продуктовом, технологическом и территориальном аспектах.

Продуктовый аспект представляет собой последовательное разагрегирование потребности в энергии. На дальнюю перспективу рассматриваются 3 вида энергоносителей: электроэнергия, теплоэнергия, котельно-печное топливо. На ближнюю перспективу котельно-печное топливо представляется по видам: природный газ, мазут, уголь, прочие виды топлива (в том числе сжиженный газ), и добавляются основные виды моторного топлива (бензин, дизельное, синтетическое жидкое топливо).

Технологический аспект моделируется по группам существующих и новых энергопотребляющих объектов (сфер экономики, отраслей промышленности, предприятий),



а также перспективных новых и энергосберегающих технологий в потреблении разных видов ТЭР.

Территориальный аспект моделей в зависимости от периода прогнозирования описывает потребность в ТЭР: в России в целом; в разрезе укрупненных регионов (европейская часть России, Урал, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток); или федеральных округов (таб.).

Важно, чтобы необходимое агрегирование и разагрегирование исходной информации, взаимосвязей и результатов исследования производилось с наименьшими потерями важных свойств и показателей, а применяемые на каждой временной стадии методы (исследования, анализа, моделирования) обеспечивали приемлемую погрешность результатов. Один из возможных подходов к определению рационального агрегирования объектов и территории при прогнозировании стоимости производства электроэнергии на региональных энергетических рынках представлен в [10]. Там же описаны результаты экспериментальных расчетов, которые показали, что характер неопределенности исходных данных не оказывает влияния на ошибку агрегирования при определении средней цены на электроэнергию в макрорегионе, однако это влияние может быть достаточно заметным при определении рациональной структуры электростанций.



Таблица. Методический инструментарий для прогнозирования спроса на энергоносители для разных временных стадий исследований*

Перспектива	Задача	Методы	Модели	Степень агрегирования в моделях		
				продук-тов	объектов	терри-тории
более 25 лет	Определение возможного диапазона спроса на основные виды энергоносителей рассматриваемого сценария развития экономики в условиях максимальной неопределенности	Обобщение имеющихся прогнозов, методы регрессионного анализа, метод межстранных сравнений, метод Делфи.	ТЭГ	Электроэнергия, теплоэнергия, котельно-печное топливо	Производственная и непродовольственная сферы экономики	Страна в целом
20-25 лет	Оценка влияния отраслевой структуры экономики и уровня жизни населения на спрос на ТЭР	Методы регрессионного анализа, метод оптимизации, имитационное моделирование.	МИДЛ, ПРОМ-ЭН, НЕПР-ЭН, ЭНЕРДЕМ	Электроэнергия, теплоэнергия, котельно-печное и моторное топливо	25 отраслей промышленности, население, сфера услуг.	Страна в целом
15- 20 лет	Определение региональной структуры спроса на энергоресурсы	Методы регрессионного анализа, имитационное моделирование, двухэтапный метод.	ЭНЕРДЕМ, СТЭП	Электроэнергия, теплоэнергия, природный газ, мазут, уголь, прочие виды топлива, моторное топливо	промышленность, транспорт, население, сфера услуг	Укрупненные регионы или Федеральные округа
до 15 лет	Анализ чувствительности вариантов энерго- и топливо-снабжения потребителей в регионах к	Метод оптимизации, имитационное моделирование	МИСС	Электроэнергия, теплоэнергия, природный газ,	Энергоемкие отрасли промышленности, грузовой и пассажирс	Федеральные округа, субъекты федера-ц

	изменению задаваемых ограничений. Оценка ценовой эластичности спроса на разные виды топлива и энергии на региональных энергетических рынках	ие, метод Монте-Карло .		мазут, уголь, прочие виды топлива, бензин, дизельное, синтетиче- ское жидкое топливо	кий транспорт, электроста нции, котельные , население, сфера услуг	ии, агломе-р ации, поселе-н ия
--	--	-------------------------------	--	--	--	--

* составлено автором

Временная стадия более 25 лет. Определяется диапазон спроса на основные виды энергоносителей (электроэнергия, теплоэнергия, котельно-печное топливо) по стране в целом в условиях максимальной неопределенности будущего. Для этой перспективы не существует достоверной информации по развитию экономики и ее отраслей. Исследование базируется, как правило, на мнениях авторитетных экспертов в области экономических и технологических законов развития. Подобное исследование не требует сложных моделей. Прогнозирование спроса на энергоносители основывается на существующих долгосрочных глобальных (мировых) тенденциях и закономерностях во взаимосвязях энергетики, экономики и энергопотребления, а также выявлении возможных прорывных технологий в производстве и потреблении энергоносителей, которые могут быть реализованы на данном временном интервале и повлиять на изменение полученных тенденций энергопотребления. Имитационная модель спроса на энергоносители ТЭГ (Тенденции Энергопотребления Глобальные) состоит из двух взаимосвязанных блоков: блок Тенденций и блок Перспективы. В первом на основе длинных рядов отчетных данных и существующих прогнозов по потреблению разных видов энергоносителей, динамики объема ВВП, численности населения, цен на разные виды энергоносителей и т.д. по основным развитым странам мира и России с использованием методов регрессионного анализа строятся зависимости: изменения темпов использования энергоносителей от темпов изменения ВВП и численности населения, душевого энергопотребления от ВВП, динамики энергоемкости ВВП и т.д. Выявленные закономерности обобщаются, анализируются и переносятся во второй блок, где накладываются на сформированные перспективные сценарии развития экономики нашей страны. Результатом является диапазон неопределенности (от максимума до минимума) потребности в основных видах энергоносителей с учетом отечественной специфики.



Временная стадия 20-25 лет. Основной задачей является оценка влияния отраслевой структуры экономики и уровня жизни населения на спрос на ТЭР. В имитационной модели ЭНЕРДЕМ методом прямого счета определяются потребности производственной и непроизводственной сфер экономики в электроэнергии, централизованном тепле, котельно-печном и моторном топливе, а также в топливе, используемом для сырьевых и нетопливных нужд:

где $\sum_{j=1}^n E_{ij}$ – суммарный объем потребления i -го вида энергоресурса в году t , E_{ij} – изменяющиеся удельные расходы j -го вида энергоресурса для i -ой отрасли, Y_i – объем валовой продукции в отрасли i в году t .

Исходной информацией для определения спроса на ТЭР производственной сферы являются объемы валовой продукции 25 основных отраслей экономики, полученные в результате решения межотраслевой имитационной оптимизационной динамической модели экономики страны МИДЛ (подробнее в [5]) и динамика изменения коэффициентов их энергоемкости (определяется вне модели отдельно для существующих и новых производственных мощностей). Данными для модели МИДЛ являются параметры изменения основных макроэкономических показателей, которые разрабатываются по вариантам на данную перспективу в Основных направлениях долгосрочного социально-экономического развития РФ.

Информацией для расчетов потребности в разных видах энергоресурсов для непроизводственной сферы являются численность населения, принятая в рассматриваемом варианте развития экономики и динамика перспективного душевого энергопотребления, рассчитанная на имитационной модели НЕПР-ЭН (подробнее в [6]). Исходные данные для нее формируются на основе анализа существующих и перспективных социальных, экономических и технологических факторов и взаимосвязей, влияющих на уровень и стиль жизни населения и развитие сферы услуг.

Временная стадия 15-20 лет. Основной задачей является оценка влияния региональной структуры экономики на спрос на энергоресурсы. Следует отметить, что на региональном уровне существует большая, чем на уровне страны неопределенность будущего, поскольку один и тот же вариант перспективного развития экономики страны может быть реализован несколькими вариантами размещения производительных сил. Для этого временного горизонта, как правило, разрабатываются прогнозы долгосрочного регионального развития, что позволяет значения диапазонов потребности в электроэнергии,



теплоэнергии и котельно-печном топливе (КПТ), полученные по стране в целом, агрегировать по федеральным округам или укрупненным территориям. Агрегирование осуществляется с использованием разработанного ранее *двухэтапного метода* (см. подробнее [2]), который сочетает в себе учет общероссийских тенденций и региональных особенностей. Метод исходит из того, что (1) развитие отдельных регионов подчинено общей концепции развития экономики страны, (2) территориальная структура энергопотребления должна учитывать особенности регионов (численность населения, климат, размещение производства, перспективы создания новых топливных баз, крупных центров переработки ТЭР, освоение новых территорий и т.д.);

Двухэтапный метод реализован в имитационной модели СТЭП (Связь Тенденций ЭнергоПотребления) и предполагает, что тенденции изменения энергопотребления на единицу ВВП и/или на душу населения одинаковы как для страны, так и для регионов. В связи с этим на первом этапе доля региона в общероссийском потреблении энергоносителей меняется:

- в производственной сфере – пропорционально изменению его доли в ВВП
- в непроизводственной сфере – пропорционально изменению доли в численности населения страны

где $P_{r,t}^e$ – потребность в энергоносителе e в регионе r в году t соответственно производственной и непроизводственной сферы, $P_{s,t}^e$ – потребность в энергоносителе e в стране в году t соответственно производственной и непроизводственной сферы, D_{r,t_0}^e – доля региона r в потреблении энергоносителя e в базовом году t_0 в производственной или непроизводственной сфере, D_{s,t_0}^e – доля региона в общероссийском ВВП, N_{s,t_0}^e – доля региона в численности населения страны.

На втором этапе полученные значения энергопотребления корректируются, учитывая существенные изменения, способные заметно повлиять на тенденции энергопотребления в регионе.

Исходной информацией является прогноз энергопотребления по стране в целом, существующая и перспективная структура регионального производства ВВП, «Информационные и математические технологии в науке и управлении» 2017 № 3 (7)



энергопотребления и численности населения. Структура котельно-печного топлива определяется общероссийскими тенденциями, исходя из существующего в базовом году (t_0) состояния, то есть предполагаемым увеличением или снижением доли того или иного вида топлива с учетом региональных особенностей.

На временной стадии до 15 лет осуществляются анализ чувствительности вариантов энерго-топливоснабжения потребителей в регионах к изменению задаваемых ограничений и оценка ценовой эластичности спроса. В первую очередь проводятся исследования возможной реакции потребителей и инвесторов на изменение стоимости энергоносителей и определение наиболее устойчивых вариантов энергоснабжения потребителей в регионах. Для этого разработан оригинальный методический подход (подробнее в [4]) особенность которого, заключается в имитации конкуренции энергоносителей и их поставщиков в рассматриваемом регионе в условиях неполноты информации и определении ценовой эластичности спроса на топливо и энергию, как у отдельных потребителей, так и в регионе в целом. Последняя может приниматься во внимание для последующей корректировки спроса на более отдаленную перспективу, если необходима новая итерация расчетов.

Для реализации подхода разработан набор моделей МИСС (Модель Имитационная Стохастическая Статическая) энергоснабжения отдельных потребителей (электростанции, котельные, промышленные потребители (цементная промышленность), транспорт (отдельно пассажирский и грузовой). Отличительной чертой моделей МИСС является совмещение оптимизации с методом Монте-Карло и возможность задания разного распределения вероятности в интервалах используемых исходных данных (подробнее в [7]).

Критерием является минимум средней цены продукции потребителя энергии в регионе при условии, что цены строятся на принципах самокупаемости (самофинансирования):

где Q_i – производство продукции i с использованием топлива e , на установке j (искомая переменная),
 P_i – цена продукции i , произведенной на энергоносителе (топливе) e , руб./ед. продукции, на установке j ,
 P_e – цена топлива e , поставляемого потребителю i , руб./тут,
 R_{ej} – удельный расход топлива e на производство



продукции i на установке j , тунт/ед. продукции, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma$ – удельные капиталовложения на прирост мощности на производство продукции i на топливе e на установке j , руб./ед. мощности,

условно-постоянная часть себестоимости продукции i (без топливной составляющей) производимой с использованием топлива e на установке j , руб./ед. продукции, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma$ – коэффициенты корректировки себестоимости, эффективности капиталовложений, дисконтирования.

Описанный набор (стенд) моделей может использоваться как для решения специфических задач каждой отдельной временной стадии, так и во взаимосвязанном исследовании от дальней перспективы к ближней и, при необходимости, проводить итерационные расчеты, когда результаты дальней перспективы корректируются на основе ближней.

Заключение. При долгосрочном прогнозировании спроса на энергоносители важно, чтобы погрешность получаемых на разных временных стадиях прогноза результатов соответствовала объективно существующей неопределенности исходной информации, поэтому состав моделей должен различаться по степени агрегирования и применяемым методам. Следует отметить, что в отечественной и зарубежной практике прогнозирования в большинстве случаев одни и те же системы моделей используют для прогнозов на перспективу как до 15, так и 35-40 лет. При этом создаются все более сложные модельно-информационные комплексы (см., например, [14-16]), не учитывающие, что детализация рассматриваемых объектов, территорий и связей требует дополнительной информации и повышает вероятность погрешности прогнозов.

Представленный набор (стенд) моделей оценки спроса на энергоносители для долгосрочного исследования вариантов развития ТЭК отвечает принципу соответствия точности результатов и неопределенности информации. Сочетание различных методов по этапам исследования с возможностью учета характера неопределенности исходных данных расширяют аналитические возможности используемых в настоящее время подходов к прогнозированию, позволяет более полно учесть изменение и усиление влияния новых факторов во взаимосвязях энергетики и экономики. Созданный инструментарий может быть использован при разработке программ и стратегий развития экономики и ТЭК страны и регионов, а также стратегических бизнес-планов энергетических компаний.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности / Л.С. Беляев. Новосибирск: Наука. 1978. 126 с.
2. Гальперова Е.В. Особенности прогнозирования энергопотребления на региональном уровне / Изв. РАН. Энергетика. 2004. № 4. С. 61–66.
3. Гальперова Е.В., Мазурова О.В. Исследование зависимости роста неопределенности прогнозов производства и потребления энергоресурсов от рассматриваемой перспективы // Энергетическая политика. 2013. № 3. С. 33–38.
4. Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю. Один подход к оценке влияния неопределенности исходных данных при долгосрочном прогнозировании энергоснабжения региона // Региональная экономика: теория и практика. 2015. №1. С. 36-43.
5. Кононов Ю.Д., Любимова Е.В., Тыртышный В.Н. Проблемы оценки народнохозяйственных последствий долгосрочных стратегий развития энергетики // Экономика и математические методы. 1983. Т. 19. № 5. С. 912–916.
6. Кононов Ю.Д., Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю. и др. Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики. Новосибирск: Наука. 2009. 178 с.
7. Кононов Ю. Д., Тыртышный В. Н. Оценка влияния характера неопределенности будущих условий на конкурентоспособность вариантов топливоснабжения // Энергетическая политика. 2011. № 4. С. 90–94.
8. Кононов Ю.Д. Поэтапный подход к оценке обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК и к оценке стратегических угроз // Известия РАН. Энергетика. 2014. № 2. С. 61–70.
9. Кононов Ю.Д. Пути повышения обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК. Новосибирск: Наука. 2015. 147 с.
10. Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Рациональное агрегирование территории при долгосрочном прогнозировании цен на электроэнергию // Проблемы прогнозирования. 2016. № 6. С. 56–64.
11. Макаров А.А. Некоторые проблемы долгосрочного прогнозирования энергетики /А.А. Макаров// Энергетика страны и регионов: Теория и методы управления. Новосибирск: Наука. 1988. С. 43–98.
12. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Новосибирск: Наука. 1979. 416 с.



13. Методы и модели согласования иерархических решений. Под. ред. А.А. Макарова. Новосибирск: Наука. 1979. 239 с.
14. Mantzos L., Capros P. The PRIMES. Version 2. Energy System Model: Design and features. Режим доступа: <http://www.e3mlab.ntua.gr/manuals/PRIMESld.pdf> (дата обращения: 01.01.2016)
15. SCANNER. Модельно-информационный комплекс / ред. А.А. Макаров. М.: ИНЭИ РАН. 2011. 72 с.
16. The National Energy Modeling System / Industrial Demand Module Washington: Energy Information Administration. Режим доступа: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/industrial.pdf> (дата обращения: 01.01.2016)

UDK 621.11:338.27

**METHODICAL TOOL FOR DIFFERENT TIME STAGES FOR LONG-TERM
FORECASTING OF ENERGY DEMAND**

Elena V. Gal'perova

Ph.D., Associate Professor, Leading Researcher. Department of Energy-Economy Interactions
Melentiev Energy Systems Institute
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: galper@isem.irk.ru

Abstract. The paper presents the method for determining the permissible error in energy demand forecasting. This error should not affect to the considered options of the fuel and power sector development. The toolkit (a set of models) for the different time stages of the study for forecasting energy demand is presented. The specific feature of the models is the correspondence between their complexity and uncertainty of future conditions input data.

Keywords: model, optimization, forecasting, uncertainty, Monte Carlo, price elasticity, energy consumption.



References

1. Belyaev L.S. Reshenie slozhnyh optimizacionnyh zadach v usloviyah neopredelennosti [The solution of complex optimization problems under uncertainty]. Novosibirsk: Nauka = Sciencel. 1978. 126 p. (in Russian)
2. Gal'perova E.V. Osobennosti prognozirovaniya jenergopotrebleniya na regional'nom urovne. [Specific features of energy demand forecasting at a region level] // Izvestija RAN. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2004. №4. Pp. 61–66. (in Russian)
3. Gal'perova E.V., Mazurova O.V. Issledovanie zavisimosti rosta neopredelennosti prognozov proizvodstva i potrebleniya ehnergoresursov ot rassmatrivaemoj perspektivy [The research of the relation between the term and the increase growth uncertainty of production and consumption of energy carriers forecasts] // Jenergeticheskaja politika = Energy policy. 2013. №3. Pp. 33–38. (in Russian)
4. Gal'perova E.V., Kononov D.Ju. Odin podhod k ocenke vlijaniya neopredelennosti ishodnyh dannyh pri dolgosrochnom prognozirovanii jenergосnabzhenija regiona [An approach to the study of the impact of input data uncertainty on long-term forecasting regional energy supply] // Regional'naja jekonomika: teorija i praktika = Regional economics: theory and practice. 2015. № 1. pp. 36-43 (in Russian).
5. Kononov Ju.D., Ljubimova E.V., Tyrtysnyj V.N. Problemy ocenki narodnohozjajstvennyh posledstvij dolgosrochnykh strategij razvitiya jenergetiki [Problems of assessment of economic consequences of long-term energy strategies] / Jekonomika i matematicheskie metody = Economics and Mathematical Methods. 1983. Vol. 19. № 5. Pp. 912–916. (in Russian)
6. Kononov Ju.D., Gal'perova E.V., Kononov D.Ju. i dr. Metody i modeli prognoznyh issledovanij vzaimosvjazej jenergetiki i jekonomiki [Methods and models of forecasting studies the relationships between energy and economy]. Novosibirsk: Nauka = Science. 2009. 178 p. (in Russian)
7. Kononov Ju.D., Tyrtysnyj V.N. Ocenka vlijaniya haraktera neopredelennosti budushhih uslovij na konkurentosposobnost' variantov toplivosnabzhenija [Assessment of the nature of the uncertainty of future conditions on the competitiveness of fuel supply options] // Jenergeticheskaja politika = Energy policy. 2011. № 4. Pp. 90–94. (in Russian)
8. Kononov Yu.D. Poehtapnyj podhod k ocenke obosnovannosti dolgosrochnykh prognozov razvitiya TEK i k ocenke strategicheskikh ugroz [A step-by-step approach to the improvement in the validity of long-term energy development forecasts and the assessment of strategic threats] // Izvestija RAN. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2014. № 2. Pp. 61–70. (in Russian)



9. Kononov Ju.D. Puti povysheniya obosnovannosti dolgosrochnyh prognozov razvitija TJeK [Ways to improve the validity of long-term forecasts of Energy]. Novosibirsk: Nauka = Science. 2015. 147 p. (in Russian).
10. Kononov Yu.D., Kononov D.Yu. Racional'noe agregirovanie territorii pri dolgosrochnom prognozirovanii cen na ehlektroehnergiyu [Rational territorial aggregation for long-term forecasting of electricity prices] // Problemy prognozirovaniya = Studies on Russian Economic Development. 2016. № 6. Pp. 56–64. (in Russian)
11. Makarov A.A. Nekotorye problemy dolgosrochnogo prognozirovaniya ehnergetiki / Energetika strany i regionov: Teoriya i metody upravleniya [Energy of the country and regions: Theory and methods of management]. Novosibirsk: Nauka = Science. 1988. Pp. 43–98. (in Russian)
12. Melent'ev L.A. Sistemnye issledovaniya v ehnergetike [System research in power engineering]. Novosibirsk: Nauka = Science. 1979. 416 p. (in Russian)
13. Metody i modeli soglasovaniya ierarhicheskikh reshenij. Pod. red. A.A. Makarova [Methods and models for harmonizing hierarchical solutions. Under. Ed. A.A. Makarov] Novosibirsk: Nauka = Science. 1979. 239 p. (in Russian)
14. Mantzos L., Capros P. The PRIMES. Version 2. Energy System Model: Design and features. Available at: <http://www.e3mlab.ntua.gr/manuals/PRIMESld.pdf> (accessed: 01.01.2016).
15. SCANER. Model'no-informacionnyj kompleks [Model-information complex]. M.: INJel RAN = Moscow: ERI RAS Publ. 2011. 72 p. (in Russian).
16. The National Energy Modeling System / Industrial Demand Module Washington: Energy Information Administration.
Available at: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/industrial.pdf> (accessed: 01.01.2016).

Acknowledgments. The results were obtained with the partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 16-06-00230 A and No. 16-06-00091 A).



УДК 004.822:620.9

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УГРОЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Ворожцова Татьяна Николаевна

к.т.н., вед. инженер, e-mail: tnn@isem.irk.ru

Пяткова Наталья Ивановна

к.т.н., зав. лабораторией, e-mail: nata@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. Предлагаемая в статье онтологическая модель угроз энергетической безопасности является частью разрабатываемого в ИСЭМ СО РАН онтологического пространства знаний предметной области энергетики. Онтологии используются для систематизации и формализованного представления знаний исследователей, являющихся экспертами в соответствующей предметной области. Выполненный онтологический инжиниринг, как процесс выявления базовых понятий и взаимосвязей между ними является основой при разработке интеллектуальных инструментальных средств для поддержки принятия решений в исследованиях энергетики. Представленная онтологическая модель угроз энергетической безопасности базируется на работах специалистов ИСЭМ СО РАН, занимающихся исследованиями данной проблемы, и предназначена для структуризации, формализации и обмена знаниями между исследователями-энергетиками и специалистами в области информационных технологий.

Ключевые слова: онтологический инжиниринг, онтология, моделирование знаний, энергетическая безопасность, метаонтология.

Введение. Исследования проблемы энергетической безопасности (ЭБ) России и ее регионов являются одним из важных направлений в ИСЭМ СО РАН. Такая работа выполняется специалистами-энергетиками в рамках исследований проблем надежности систем энергетики [7]. Накопленные знания и опыт исследователей в данном направлении представлены в виде баз данных, математических моделей, алгоритмов и методических подходов к решению задач. В современных условиях в связи с концепцией развития интеллектуальной энергетики расширяется круг задач, требующих более широкой информационной и интеллектуальной поддержки. В лаборатории информационных



технологий в энергетике ИСЭМ СО РАН разрабатывается комплекс инструментальных средств, базирующихся на семантическом подходе к моделированию знаний. В частности, предлагается использование принципов и методов ситуационного управления для поддержки принятия решений в энергетике [4, 5]. Под процессом принятия стратегических решений понимается обоснование выбора направлений деятельности по поддержанию бездефицитного снабжения потребителей необходимыми топливно-энергетическими ресурсами. Это непосредственно связано с выявлением и классификацией угроз ЭБ, оценкой этих угроз и разработкой соответствующих мер профилактики и устранения угроз. Информационная и интеллектуальная поддержка таких исследований предполагает формализованное представление знаний в соответствующей предметной области. Один из возможных способов формализации – это разработка онтологий, которые выявляют взаимосвязи основных понятий, что способствует структурированию необходимых знаний для использования в программных инструментах, разрабатываемых для интеллектуальной поддержки принятия решений [2].

Угрозы энергетической безопасности. В ИСЭМ СО РАН в рамках исследований по ЭБ была выполнена работа по описанию основных терминов в этой области и выпущен сборник «Энергетическая безопасность. Термины и определения» [11], в котором дано следующее определение угроз ЭБ – это совокупность внутренних экономических, социально-политических, техногенных, природных, управленческо-правовых, а также внешнеполитических и внешнеэкономических условий и факторов, создающих опасность ослабления энергетической безопасности. Определение состава потенциально возможных угроз и формирование на этой основе сценариев возмущений для систем энергетики и ТЭК в целом является одной из задач исследования проблем энергетической безопасности. Выполненный специалистами анализ угроз ЭБ [9, 10] классифицирует их следующим образом:

- Экономические, обусловленные состоянием экономических отношений и экономической политики государства, а также дестабилизирующие факторы и диспропорции в энергетике производственно-экономического характера. К ним относятся дефицит инвестиционных ресурсов, задолженность предприятий ТЭК, экономически необоснованное ценообразование на топливно-энергетические ресурсы и другие.
- Социально-политические, обусловленные внутренними социальными и политическими процессами, в частности, трудовыми конфликтами и забастовками на предприятиях ТЭК, разногласием между региональными и федеральными властями,



противоправными действиями руководства предприятий – монополистов в предоставлении услуг и другими.

- Техногенные, обусловленные производственной деятельностью в энергетическом секторе, связанные с авариями и приводящие к снижению производительности энергетических объектов, сокращению энергетических резервов и длительным перерывам в энергоснабжении.
- Природные, обусловленные факторами и явлениями, неблагоприятными для нормального функционирования систем энергетики, такие как стихийные бедствия, длительное маловодье на реках с гидроэлектростанциями, аномально суровые зимы и другие.
- Управленческо-правовые, обусловленные неэффективностью государственного, корпоративного и технологического управления, неполнотой энергетического законодательства и ведущие к неэффективной энергосберегающей политике государства.
- Внешние (внешнеполитические и внешнеэкономические), обусловленные дискриминационными действиями иностранных государств и юридических лиц, критической зависимостью ТЭК от импорта энергетического оборудования, комплектующих и запасных частей.

В современных условиях к перечисленным группам угроз необходимо добавить киберугрозы, как наиболее важную группу угроз, обусловленных широким использованием компьютерных систем и интернета на разных уровнях управления энергетикой.

Разработка онтологии угроз ЭБ. Разработка онтологии угроз энергетической безопасности выполнена на основе классификации, представленной в работах [1, 6, 8], Графическое представление онтологии угроз ЭБ, выполненное с использованием инструмента SmartTools, показано на рисунке 1 и отражает в более наглядном виде описанную выше классификацию.



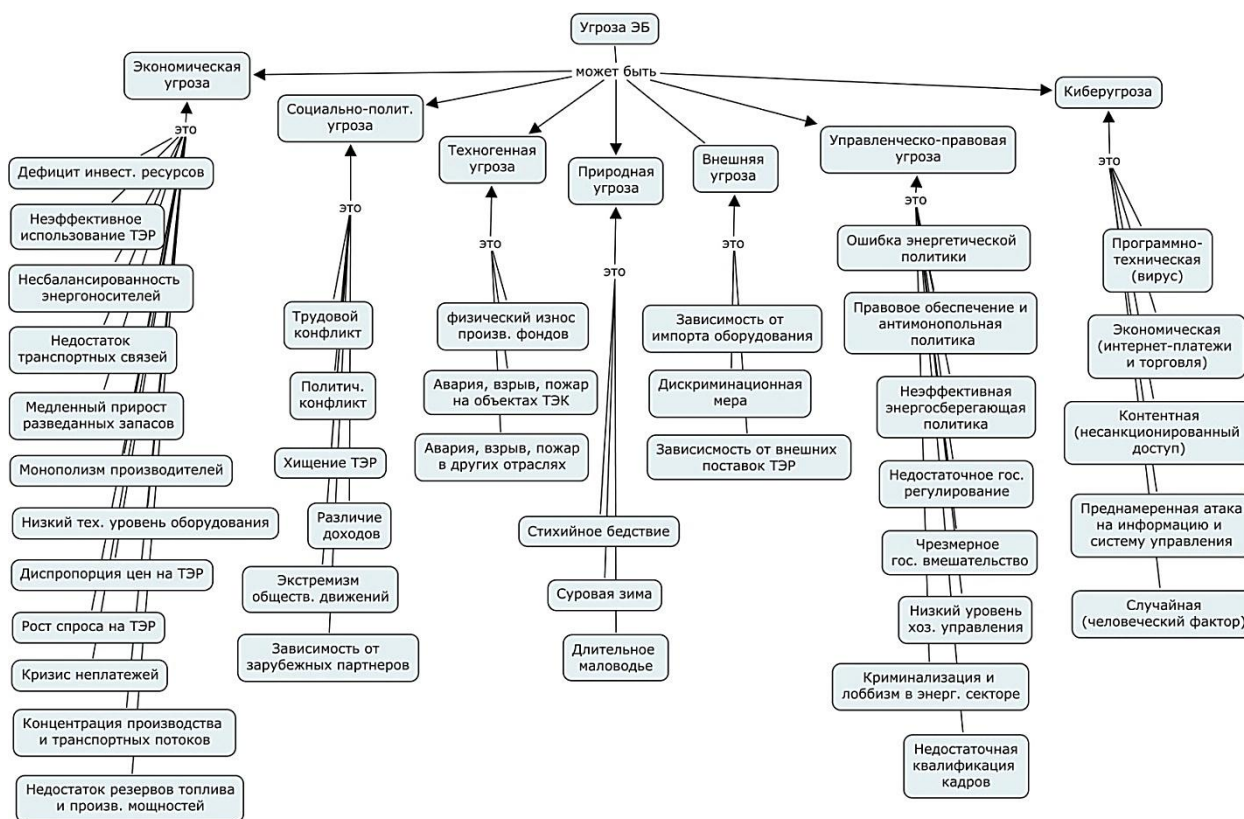


Рис. 1. Угрозы энергетической безопасности

Представленная схема взаимосвязей между понятиями демонстрирует только иерархическую структуру взаимосвязей между понятиями.

Любая из угроз имеет последствия, которые также необходимо анализировать и классифицировать для их предотвращения или устранения с помощью соответствующих мер. На рис. 2 представлены основные характеристики работы предприятий энергетического сектора, на которые могут оказать влияние описанные выше угрозы при их реализации. Эти проявления последствий связаны с разными подсистемами рассматриваемого объекта энергетики, такими как техническая, материально-энергетическая, финансовая и кадровая.



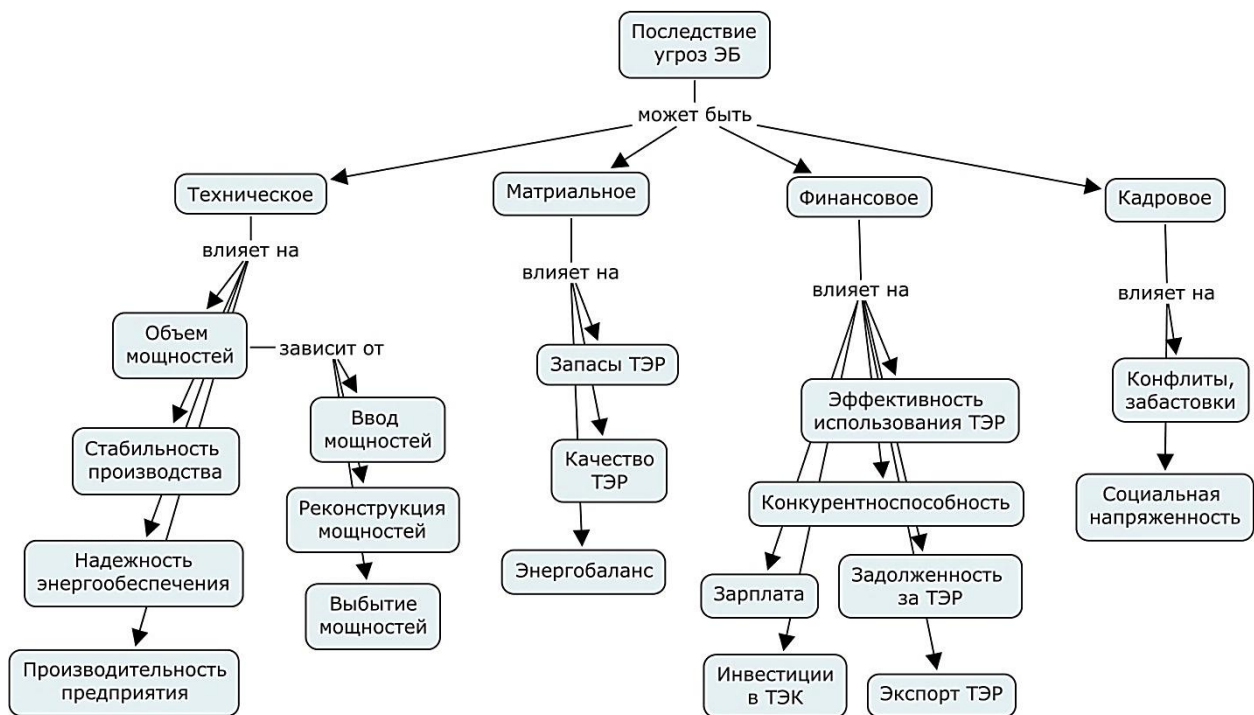


Рис. 2. Влияние последствий угроз ЭБ на показатели предприятий энергетики

Из всей совокупности возможных угроз энергетической безопасности специалисты выделяют особую группу стратегических угроз, которые чреваты долговременным и масштабным сдерживанием темпов развития национальной экономики. Стратегическая компонента энергетической безопасности рассматривается как состояние защищенности страны или ее региона от угроз, массового нарушения бесперебойности энергоснабжения из-за физической или экономической недоступности энергоресурсов необходимого качества. На рис. 3 представлены стратегические угрозы энергетической безопасности.





Рис. 3. Стратегические угрозы энергетической безопасности

Систематизация угроз ЭБ является исходным этапом для их идентификации, т.е. определения, где, когда и с какой интенсивностью может проявиться конкретная угроза. Это определяется с помощью системы показателей – индикаторов ЭБ [3, 6]. Индикативный анализ базируется на оценке ситуации с помощью количественных показателей, которые характеризуют степень угроз энергетической безопасности. Вычисленные индикаторы сравниваются с пороговыми значениями, а пороговые значения разделяют ситуации в зависимости от уровня критичности на три основных качественных состояния:

- Нормальное (обеспечивается приемлемое значение всех или большинства индикаторов)
- Предкризисное (угрозы начинают приобретать существенную значимость, но этот процесс может быть преодолен принятием соответствующих превентивных мер)
- Кризисное (характеризуется существенными негативными тенденциями, которые угрожают развитию системы и требуют мер со значительными затратами).



Принятие стратегических решений, связано с оценкой ситуации на объектах энергетики и топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в целом, а также с выбором основных направлений их дальнейшего функционирования и развития. На рис. 4 представлены основные индикаторы ЭБ регионального уровня.

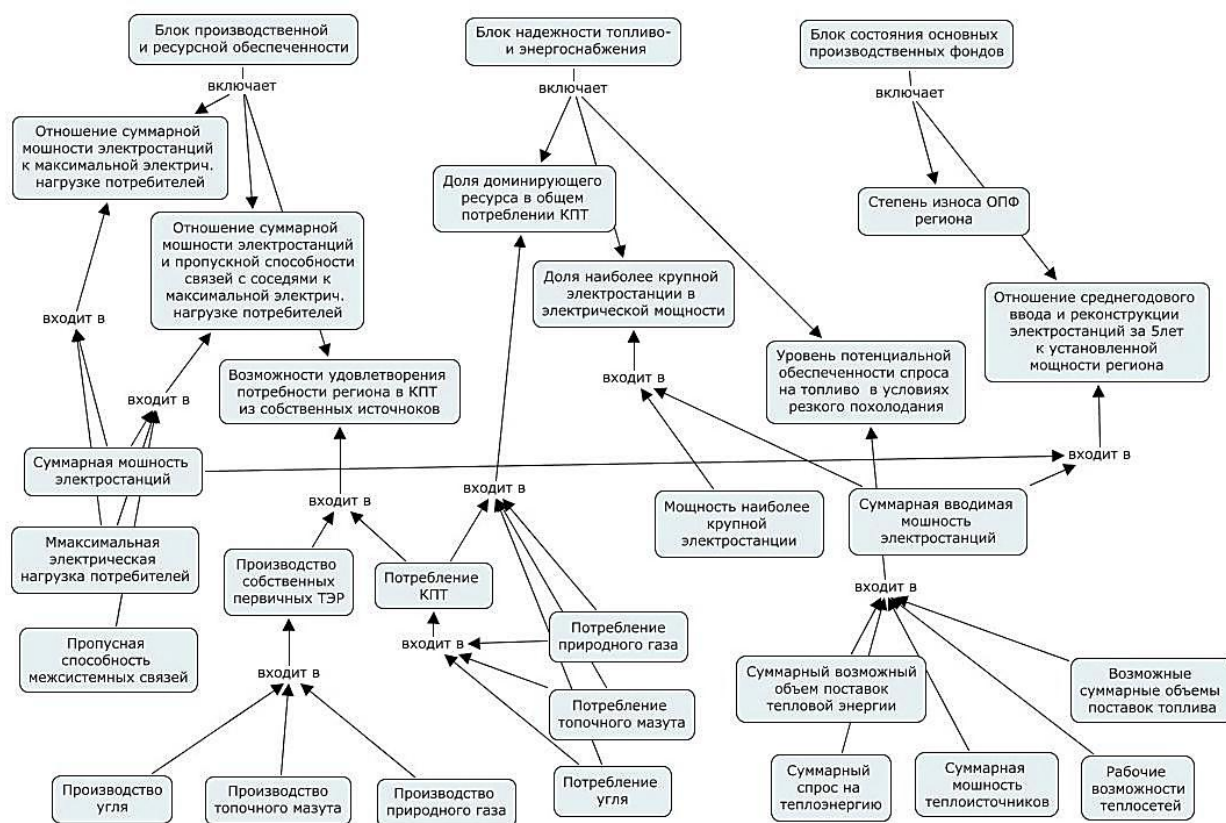


Рис. 4. Индикаторы ЭБ регионального уровня

Индикаторы отражают три основные группы показателей, характеризующих блоки: производственной и ресурсной обеспеченности, надежности топливно- и энергоснабжения и состояния основных производственных фондов. Данная схема отражает также основные показатели работы предприятий, которые участвуют в вычислении индикаторов и соответственно влияют на состояние ЭБ.

Заключение. Предлагаемая совокупность онтологий угроз ЭБ, последствий угроз ЭБ, а также индикаторов ЭБ, является частью пространства знаний, необходимых для «Информационные и математические технологии в науке и управлении» 2017 № 3 (7)



реализации методов ситуационного управления в энергетике [12], в частности, при разработке интеллектуальных инструментальных средств для поддержки принятия решений. Использование онтологической модели угроз ЭБ предполагается при реализации разрабатываемого прототипа интеллектуальной системы для стратегического ситуационного управления развитием критических инфраструктур на примере энергетической инфраструктуры [5]. Данные онтологии также являются необходимой составной частью общего онтологического пространства знаний, являющихся базой при разработке портала знаний в области энергетики.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-07-00474 и № 16-07-00569.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропай Н.И., Сендеров С.М.. Энергетическая безопасность: Сущность, основные проблемы, методы и результаты исследований // Материалы открытого семинара «Экономические проблемы энергетического комплекса». Москва. ИНП РАН. 2011. 89 с.
2. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Макагонова Н.Н. Методологические аспекты ситуационного управления на основе системы онтологий // Труды XX Байкальской всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Т.3. Иркутск. ИСЭМ СО РАН. 2015. С. 124–131.
3. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Онтология проектирования. 2017. № 1 (23). С. 66–76.
4. Массель Л.В., Массель А.Г. Технологии и инструментальные средства интеллектуальной поддержки принятия решений в экстремальных ситуациях энергетике // Вычислительные технологии. 2013. Т.18. С. 37–44.
5. Массель Л.В. Проблемы создания интеллектуальных систем семиотического типа для стратегического ситуационного управления в критических инфраструктурах // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. №1. С. 7–27.
6. Методические рекомендации по оценке состояния энергетической безопасности Российской Федерации на федеральном уровне / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, Г.Б. Славин, Н.И. Пяткова, М.Б. Чельцов. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2013. 36 с.
7. Надежность систем энергетики: Проблемы, модели и методы их решения / А.Ф. Дьяков, В.А. Стенников, С.М. Сендеров и др.; Отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2014. 284 с.



8. Савельев В.А., Сендеров С.М., Батаева В.В. Анализ состояния топливно-энергетического комплекса и расчет показателей энергетической безопасности регионов: Учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново. 2010. 76 с.
9. Энергетическая безопасность России / В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, А.М. Мастепанов, Ю.К. Шафрани и др. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН. 1998. 302 с.
10. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н.И. Пяткова [и др.]; отв. ред. Н.И. Воропай, М.Б. Чельцов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2011. 198 с.
11. Энергетическая безопасность. Термины и определения / Отв. редактор чл.-корр. РАН Воропай Н.И. М.: «ИАЦ Энергия» 2005. 60 с.
12. Vorozhtsova T.N, Pjatкова N.I. Ontology engineering threats to energy security / Proceeding of International Workshop "Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-based, Cloud Computing and Cyber Security (CI: CM/IACC.CS - 2017)". Иркутск. ИСЭМ СО РАН. 2017. Рр. 24–26.

UDK 004.822:620.9

ONTOLOGICAL MODEL OF ENERGY SECURITY THREATS

Tatyana N. Vorozhtsova

Ph. D., leading engineer, e-mail: tnn@isem/irk/ru

Natalya I. Pyatkova

Ph. D., Head of laboratory of Energy Systems Institute, e-mail: nata@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. The ontological model of energy security threats proposed in the article is part of developed ontological knowledge space of the energy subject domain at ISEM SB RAS. Ontologies are used to systematize and formalize the knowledge of researchers who are experts in the relevant subject area. Made ontological engineering as the process of identifying underlying concepts and relationships between them is the basis for the development of intelligent tools for decision support in energy research. The presented ontological model of energy security threats is based on the work of ISEM SB



RAS specialists engaged in the research of this problem and is intended for structuring, formalizing and sharing knowledge between energy researchers and specialists in the field of information technologies.

Keywords: ontology engineering, ontology, knowledge modeling, energy security, metaontology.

References

1. Voropaj N.I., S.M. Senderov S.M. Energeticheskaya bezopasnost': Sushchnost', osnovnye problemy, metody i rezul'taty issledovanij [Energy security: Essence, main problems, methods and results of research] // Materialy otkrytogo seminar «EHkonomicheskie problemy ehnergeticheskogo kompleksa» = Materials of an open seminar "Economic problems of a power complex". Moskva. INP RAN. 2011. 89 p. (in Russian)
2. Massel' L.V., Vorozhcova T.N., Makagonova N.N. Metodologicheskie aspekty situacionnogo upravleniya na osnove sistemy ontologii [Methodological aspects of situational management based on the system of ontology] // XX Bajkal'skaya vsrossijskaya konferenciya «Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii»: Trudy = XX Baikal International Conference "Information and mathematical technologies in science and management: proceeding". T.3. Irkutsk. MESI SO RAN. 2015. Pp. 124–131. (in Russian)
3. Massel' L.V., Vorozhcova T.N., Pyatkova N.I. Ontologicheskij inzhiniring dlya podderzhki prinyatiya strategicheskikh reshenij v ehnergetike [Ontology engineering to support strategic decision-making in the energy sector] // Ontologiya proektirovaniya = Ontology of designing. 2017. № 1 (23). Pp. 66–76. (in Russian)
4. Massel' L.V., Massel' A.G. Tekhnologii i instrumental'nye sredstva intellektual'noj podderzhki prinyatiya reshenij v ehkstremal'nyh situacijah ehnergetike [Technologies and tools that support intelligent decision making in extreme situations energy] // Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies. 2013. T. 18. Pp. 37–44. (in Russian)
5. Massel' L.V. Problemy sozdaniya intellektual'nyh sistem semioticheskogo tipa dlya strategicheskogo situacionnogo upravleniya v kriticheskikh infrastrukturah [The problem of intelligent systems creating of a semiotic type for strategic situational management in critical infrastructures] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2016 № 1(27) Pp. 7–27. (in Russian)
6. Metodicheskie rekomendacii po ocenke sostoyaniya ehnergeticheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii na federal'nom urovne [Methodical recommendations for assessing the state of energy security of the Russian Federation at the federal level] / S.M. Senderov, V.I. Rabchuk, G.B. Slavin, N.I. Pyatkova, M.B. CHel'cov. Irkutsk: MESI SO RAN. 2013. 36 p. (in Russian)



7. Nadezhnost' sistem ehnergetiki: Problemy, modeli i metody ih resheniya [Reliability of energy systems: Problems, models and solution methods] / A.F. D'yakov, V.A. Stennikov, S.M. Senderov i dr.; Otv. red. N.I. Voropaj. Novosibirsk: Nauka = Science. 2014. 284 p. (in Russian)
8. Savel'ev V.A., Senderov S.M., Bataeva V.V. Analiz sostoyaniya toplivno-ehnergeticheskogo kompleksa i raschet pokazatelej ehnergeticheskoy bezopasnosti regionov: Ucheb. posobie [State analysis of the fuel and energy complex and calculation of the energy security indicators in the regions: Textbook] / GOUVPO «Ivanovskij gosudarstvennyj ehnergeticheskij universitet imeni V.I. Lenina»= State Educational Institution of Higher Professional Education Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin. Ivanovo. 2010. 76 p. (in Russian)
9. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii [Energy Security of Russia] / V.V. Bushuev, N.I. Voropaj, A.M. Mastepanov, YU.K. SHafrani i dr. Novosibirsk: Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN = Science. The Siberian publishing house of RAS. 1998. 302 p. (in Russian)
10. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i puti resheniya [Energy Security in Russia: Problems and Solutions] / N.I. Pyatkova [i dr.]; otv.red. N.I. Voropaj, M.B. CHel'cov; Ros. akad. nauk, Sib. otd-nie, In-t sistem ehnergetiki im. L.A. Melent'eva. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN = The publishing house of SB RAS. 2011. 198 p. (in Russian)
11. Energeticheskaya bezopasnost'. Terminy i opredeleniya [Energy security. Terms and Definitions] / Otv. redaktor chl.-korr. RAN Voropaj N.I. Moscow. «IAC EHnergiya» = The publishing center "Energy". 2005. 60 p. (in Russian)
12. Vorozhtsova T.N, Pjatkova N.I. Ontology engineering threats to energy security / Proceeding of International Workshop "Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-based, Cloud Computing and Cyber Security (CI: CM/IACC.CS - 2017)". Irkutsk. MESI SB RAS. 2017. Pp. 24–26.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАБОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КРУПНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Еделев Алексей Владимирович

к.т.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, e-mail: flower@isem.irk.ru

Еделева Ольга Алексеевна

к.т.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
64033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, e-mail: edel@isem.irk.ru

Нгуен Хоай Нам

заведующий лабораторией систем энергетики, Институт энергетической науки ВАНТ,
Хоанг Куок Вьет ул., А9, 18, г. Ханой, Вьетнам, e-mail: nhnam@ies.vast.vn

Аннотация. В статье рассмотрен подход к исследованию поведения топливно-энергетического комплекса при воздействии крупных возмущений на основе энергетических хабов. Модель сети энергетических хабов по сравнению с прочими моделями энергетики даёт более удобную схему представления территориально-производственной структуры энергетики страны для программного обеспечения, предназначенного для исследования поведения топливно-энергетического комплекса при воздействии крупных возмущений. Прототип модели, реализованный в виде программы на языке программирования VBA в электронных таблицах Microsoft Excel, был опробован на данных энергетики Вьетнама. Результаты показали адекватность разработанной модели топливно-энергетического комплекса в виде сети энергетических хабов.

Ключевые слова: система энергетики, топливно-энергетический комплекс, живучесть, энергетический хаб.

Введение. Методические работы по созданию экономико-математических моделей для исследования проблем долгосрочного развития систем энергетики, в том числе отраслевых, региональных систем и топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны в целом, успешно развивались с 60-х годов прошлого века в ряде научных организаций СССР [2, 7, 8]. В настоящее время среди современных отечественных моделей следует отметить динамическую модель ТЭК России [9], модельный комплекс для исследования энергетики SCANNER [6]. За рубежом разработан целый ряд моделей для анализа энергетической политики, прогнозирования и планирования развития энергетики на глобальном или локальном уровне [16].

Среди существующих моделей энергетики мало таких, которые позволяют проводить исследования живучести ТЭК [1]. В частности, среди подходящих для анализа поведения ТЭК при воздействии крупных возмущений можно выделить следующие модели:

- потоковая модель ТЭК [1], формулируемая как задача об однопродуктовом потоке минимальной стоимости в сети с выпуклыми функциями стоимости транспорта потока по дугам;
- интегрированная модель энергетики США [15], где системы газоснабжения, углеснабжения, нефтеснабжения и электроэнергетики представлены в виде обобщённой сети [10];
- балансовая экономико-математическая модель ТЭК [4], которая создавалась для анализа возможных последствий реализации крупных возмущений.

Общая схема исследования живучести ТЭК [1] базируется на взаимосогласованных многовариантных расчётах различных сценариев возмущений. В статье предлагается перейти с балансовой экономико-математической модели ТЭК на моделирование территориально-производственной структуры ТЭК в виде сети энергетических хабов, что упрощает архитектуру соответствующего программного обеспечения.

1. Подход к моделированию сети энергетических хабов. Рост числа зависимостей между интегрированными системами энергоснабжения вследствие их развития определил появление за рубежом идеи “энергетического хаба” [14]. Энергетическим хабом называется объединение производственных мощностей по преобразованию и аккумулированию нескольких энергоресурсов. Он является связующим звеном между различными энергетическими инфраструктурами и потребителем, обеспечивая последнего энергоресурсами требуемого качества. Например, на вход энергетического хаба, подключенного к соответствующим распределительным сетям, поступают электроэнергия и природный газ, а на выходе потребитель обеспечивается электроэнергией, теплом, холодом и сжатым воздухом.

Концепция энергетического хаба обеспечивает основу для моделирования и анализа взаимодействия произвольного набора систем энергоснабжения. Основной упор делается на рассмотрение взаимосвязей систем, что помогает обнаружить уязвимости, которые сложно выявить в условиях, когда каждая система исследуется отдельно.

Первоначально была предложена нелинейная модель для оптимизации работы и структуры энергетических хабов [13]. Позже была разработана эквивалентная линейная постановка, использованная для исследования крупномасштабных сетей энергетических хабов [12].

1.1 Моделирование энергетического хаба. Большинство общих схем энергетических хабов могут быть построены на базе пяти типов элементарных блоков: входов, входных хранилищ энергоресурсов, преобразователей энергоресурсов, выходных хранилищ энергоресурсов и выходов (рис. 1).

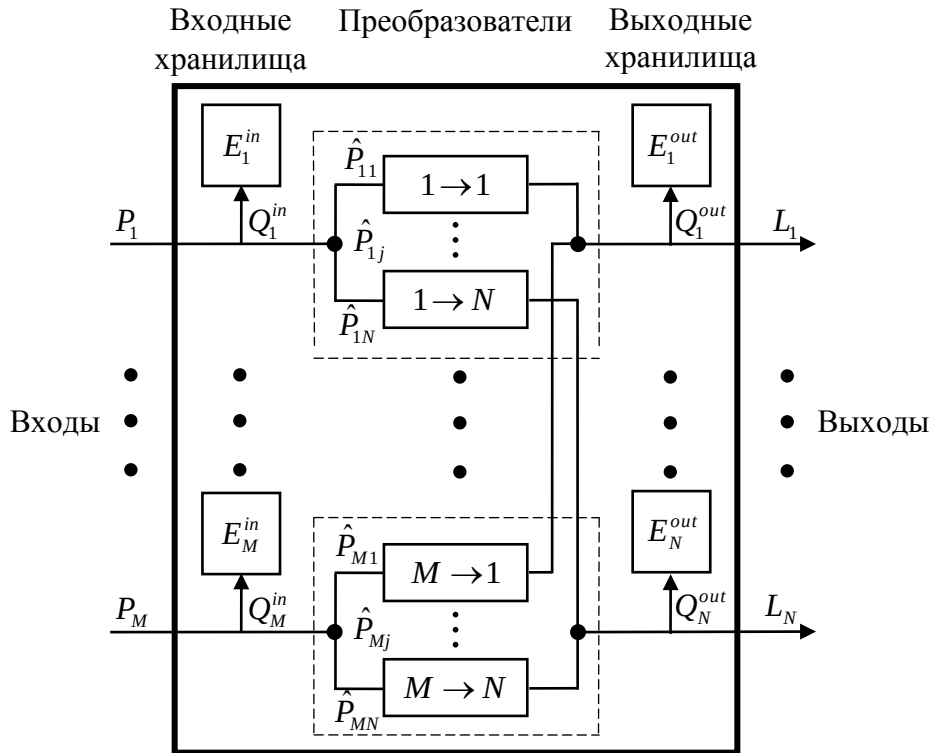


Рис. 1. Общая схема энергетического хаба, состоящая из входов, входных накопителей, преобразователей, выходных накопителей и выходов

Для моделирования потоков энергоресурсов в хабе от его M входов $\mathbf{P}$ к его N выходам $\mathbf{L}$ необходимо сначала описать, как входные потоки распределяются на потоки $\mathbf{Q}^{in}$ входных хранилищ (с запасом энергоресурсов $\mathbf{E}^{in}$) и потоки $\hat{\mathbf{P}}$ к преобразователям энергоресурсов, затем, как $\hat{\mathbf{P}}$, пройдя процесс преобразования, суммируются и с учётом потоков $\mathbf{Q}^{out}$ выходных хранилищ (с запасом энергоресурсов $\mathbf{E}^{out}$) образуют выходные потоки.

Пусть $h \in H$ является хабом из рассматриваемого множества хабов и h имеет M входов и N выходов. Тогда, согласно рис. 2, поток P_i от входа $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ разделяется на поток входного хранилища Q_i^{in} и потоки $\hat{P}_{ij}$ к преобразователям j

$$P_i = Q_i^{in} + \sum_{j=1}^{K_i} \hat{P}_{ij} \quad (1)$$

где K_i – число преобразователей хаба h , связанных со входом i , $K_i \leq M$.

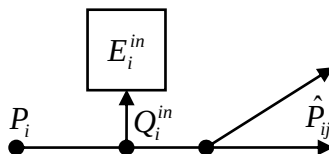


Рис. 2. Переток энергоресурса в энергетическом хабе от входа к преобразователям

Образование потока L_n на выходе $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ показано на рис. 3. Преобразователь энергоресурса C_{ijn} конвертирует поток j на пути от входа i к выходу n в хабе h . Принимая во внимание поток выходного хранилища Q_n^{out} , баланс потоков на выходе n хаба h можно записать как

$$\sum_i \sum_{j \in D(i,n)} C_{ijn} \hat{P}_{ij} = Q_n^{out} + L_n \quad (2)$$

где $D(i,n)$ - множество потоков от входа i , которые могут быть преобразованы на пути к выходу n , $|D(i,n)| \leq K_i$.

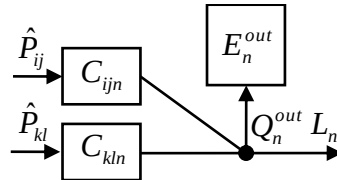


Рис. 3. Переток энергоресурса в энергетическом хабе от преобразователей к выходу

Для хранилищ энергоресурсов необходимо рассматривать несколько временных периодов, так как для хранилища p его запас энергоресурса в период времени $t+1$ зависит от величин накопления и сработки энергоресурса в предыдущий период времени t

$$E_p(t+1) = E_p(t) + \eta_{c,p} Q_{c,p}(t) + \frac{1}{\eta_{d,p}} Q_{d,p}(t) \quad (3)$$

$$Q_p(t) = Q_{c,p}(t) + Q_{d,p}(t) \quad (4)$$

$$(z_p(t) - 1) \underline{Q}_p \leq Q_{d,p}(t) \leq 0 \quad (5)$$

$$0 \leq Q_{c,p}(t) \leq z_p(t) \bar{Q}_p \quad (6)$$

$$0 \leq E_p(t) \leq \bar{E}_p \quad (7)$$

где $Q_p(t)$ – поток энергоресурса, связанный с хранилищем p в период t , $z_p(t) \in \{0, 1\}$ определяет направление потока Q_p в период t , $Q_{c,p}(t)$ – поток энергоресурса в хранилище p в период t , $Q_{d,p}(t)$ – поток энергоресурса из хранилища p в период t , $\underline{Q}_p$ и $\bar{Q}_p$ – соответственно, нижний и верхний показатели мощности хранилища p , $\bar{E}_p$ – это предел ёмкости хранилища p , $\eta_{c,p}$ – показатель эффективности процесса накопления энергоресурса, $\eta_{d,p}$ – показатель эффективности процесса отдачи энергоресурса.

Таким образом, $z_p(t) = 0$ обозначает, что хранилище p находится в состоянии сработки в период t , так как $Q_{c,p}(t) = 0$, а $z_p(t) = 1$ подразумевает, что хранилище p находится в состоянии накопления ($Q_{d,p}(t) = 0$) в период t .

В качестве экологических ограничений можно записать следующее соотношение между выбросами вредных веществ и потоком $\hat{P}_{ij}$ преобразователя j , связанного с входом i хаба h :

$$\hat{e}_{ij} = \beta_{ij} \hat{P}_{ij} \quad (8)$$

где $\hat{e}_{ij}$ – величина выбросов вредных веществ (например, CO_2 , NO_x , SO_x и др.), β_{ij} – коэффициент удельных выбросов, с помощью которого поток $\hat{P}_{ij}$ преобразуется в выбросы.

Объединяя выбросы от всех преобразователей одного хаба (или множества хабов), можно ограничить выбросы в течение периода времени t величиной $\bar{e}_k$

$$e(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{K_i} \hat{e}_{ij}(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{K_i} \beta_{ij} \hat{P}_{ij}(t) \leq \bar{e}_k(t) \quad (9)$$

1.2 Сети энергетических хабов. Энергетические хабы объединяются в сеть, соединяясь между собой с помощью сетей систем энергоснабжения, поставляющих потребителям энергоресурсы из множества K . Каждая система энергоснабжения представляет собой граф $G_k = (V_k, E_k)$, где V_k – множество узлов, E_k – множество ориентированных дуг. На граф G_k могут накладываться дополнительные ограничения, описывающие физические законы движения энергоресурса k по сети.

Если через $C_k, D_k \in V_k$ обозначить наборы узлов соответственно производства и потребления энергоресурса k , то остальные узлы G_k , не являясь производителями или потребителями, называются промежуточными и служат местами пересечения потоков энергоресурса в сети. Каждый узел i сети G_k должен удовлетворять условию баланса b_{ki} входящих в него и исходящих из него потоков энергоресурса k

$$\sum_{j \in \Omega_{ki}^V} f_{kij} = b_{ki} = \begin{cases} S_{ki}, & i \in C_k \\ -O_{ki}, & i \in D_k \\ 0, & i \in V_k \cap (C_k \cup D_k) \end{cases} \quad (10)$$

где $\Omega_{ki}^V \subseteq V_k$ – подмножество узлов, соединённых с узлом $i \in V_k$, f_{kij} – поток по дуге $(i, j) \in E_k$, S_{ki} – количество энергоресурса k , поставленного в сеть узлом $i \in C_k$, O_{ki} – количество энергоресурса k , отобранного из сети узлом $i \in D_k$.

Если учитывать энергетические хабы, соединённые с G_k в узле i , то (10) записывается как

$$\sum_{j \in \Omega_{ki}^V} f_{kij} + \sum_{l \in H_k(i)} P_l - \sum_{m \in H_k(i)} L_m = b_{ki} \quad (11)$$

где $H_k(i)$ – множество хабов, соединённых с G_k в узле i , P_l – вход хаба l , L_m – выход хаба m , а b_{ki} определяется как в (10).

1.3 Задача оптимизации функционирования и развития сети хабов. Задача оптимизации функционирования и развития сети хабов рассматривается на интервале времени, состоящем из T временных периодов, $t = \{1, \dots, T\}$. Целью оптимизации функционирования является удовлетворение потребностей в энергии при минимальных затратах на эксплуатацию хабов и систем энергоснабжения:

$$\sum_{t=1}^T F(P(t), L(t), E(t)) + \sum_{t=1}^T \sum_{k \in K} F(b_{ki}(t), f_{kij}(t)) \rightarrow \min \quad (12)$$

где ограничения выступают уравнения (3)–(7), (9), (11).

Целью оптимизации развития является удовлетворение потребностей в энергии при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах на хабы и системы энергоснабжения:

$$\sum_{t=1}^T F(P(t), L(t), E(t), I) + \sum_{t=1}^T \sum_{k \in K} F(b_{ki}(t), f_{kij}(t), I) \rightarrow \min \quad (13)$$

где I – множество бинарных переменных, которые отвечают за возможность существования определённого элемента хабов или систем энергоснабжения. Ограничениями задачи оптимизации развития выступают уравнения (3)–(7), (9), (11) с включёнными в них элементами множества I .

2. Переход от балансовой экономико-математической модели ТЭК к энергетическим хамам. Если сравнить модели, описанные в [4, 1, 15] и позволяющие проводить анализ поведения ТЭК при воздействии крупных возмущений, с помощью модели сети энергетических хабов, то можно выделить следующие их общие свойства:

- представление систем энергетики (СЭ), составляющих ТЭК, в виде графов,
- многопериодность,
- математическое описание в виде задачи линейного программирования (ЛП),
- поиск минимума затрат при покрытии потребностей в энергоресурсах.

Исходя из описания сопутствующего программного обеспечения [3, 5, 11, 18], можно увидеть, что архитектура программного обеспечения напрямую определяется принципами описания энергетических инфраструктур в модели ТЭК.

В пакете прикладных программ (ППП) «Корректива» [3] в начале расчёта территориально-производственная структура ТЭК отображается в расчётную схему на основе графов, которая затем преобразуется в задачу ЛП в формате MPS [17], который фактически является стандартом для описания задач ЛП.

Модель сети энергетических хабов напрямую отображает территориально-производственную структуру ТЭК в задачу ЛП, что позволит значительно упростить архитектуру ядра ППП «Корректива».

Балансовая экономико-математическая модель ТЭК [4] и модель сети энергетических хабов являются совместимыми на уровне исходных данных. В то же время в модели сети энергетических хабов имеются целочисленные переменные, отвечающие за выбор режима работы накопителей энергии, но при моделировании ТЭК режим работы хранилища энергоресурсов в течение каждого периода времени, скорее всего, будет задаваться однозначно. Поэтому целочисленная модель накопителя энергии может быть изменена таким образом, чтобы позволить модели сети энергетических хабов получить строго линейный и непрерывный характер [13].

3. Моделирование устойчивого развития ТЭК Вьетнама на основе энергетических хабов. Для проверки предположений, сделанных выше, был выполнен вычислительный эксперимент на базе модели ТЭК Вьетнама [3], разработанной в период 2011-2015 гг. в ходе исследований, проводимых совместно с Институтом энергетической науки Вьетнамской академии науки и технологий.

Территориально-производственная структура ТЭК Вьетнама представлена по восьми агрегированным регионам: дельта Красной реки, Северо-Восточный, Северо-Западный, Север центрального побережья, Юг центрального побережья, Центральное нагорье, Юго-

Восточный и дельта Меконга. Исходные данные включают в себя технико-экономические показатели энергоснабжения (затраты, стоимость и объёмы производства, импорта и экспорта), преобразования и транспорта энергоресурсов, потребления энергоресурсов.

Множество K для ТЭК Вьетнама состоит из следующих энергоресурсов: электроэнергия, природный газ, биотопливо, чёрный уголь, бурый уголь, нефть, топочный мазут, дизельное топливо, бензин, керосин, авиационный керосин, сжиженный газ (пропан-бутан).

Каждому из 8 регионов соответствуют 2 энергетических хаба: по производству нефтепродуктов (рис. 4) и генерации электроэнергии (рис. 5), где числами указаны номера преобразователей в хабе. Хаб генерации электроэнергии в регионе зависит от поставок топочного мазута и дизельного топлива с хаба производства нефтепродуктов.



Рис. 4. Хаб производства нефтепродуктов

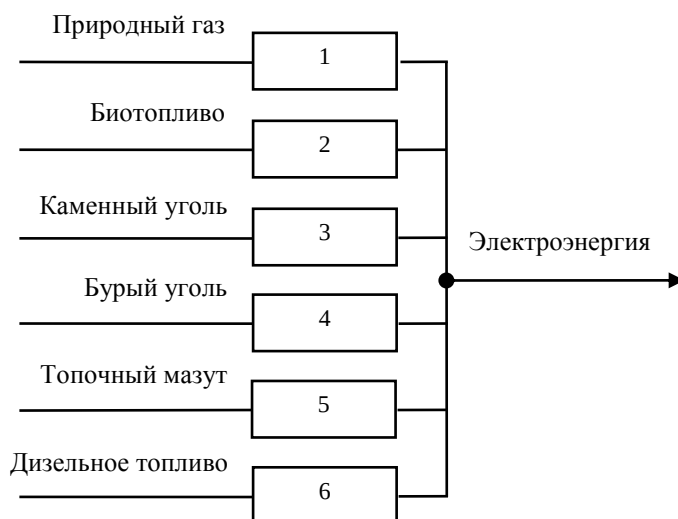


Рис. 5. Хаб выработки электроэнергии

В хабах не представлены хранилища, потому что в используемой модели ТЭК период времени равен году, а эффект от работы хранилищ энергоресурсов проявляется при исследовании работы ТЭК с периодом времени, равным одному сезону года и меньше.

Модель сети энергетических хабов была реализована в виде проекта на языке программирования VBA в электронных таблицах Microsoft Excel. Результаты расчётов были сопоставимы с результатами расчётов на ППП «Корректива». Был получен прототип модели сети энергетических хабов, которую можно использовать для проведения исследований по оценке поведения ТЭК при воздействии крупномасштабных возмущений. Результаты показали адекватность разработанной модели ТЭК на основе энергетических хабов.

Заключение. Для исследования поведения ТЭК в условиях крупномасштабных возмущений предложено использовать подход, основанный на описании структуры ТЭК в виде сети энергетических хабов. В данном случае в энергетический хаб объединяются региональные производственные мощности по преобразованию и хранению энергоресурсов. Модель ТЭК строится как множество энергетических хабов, соединённых между собой с помощью магистральных сетей транспорта энергоресурсов.

Программа моделирования сети энергетических хабов была реализована в виде прототипа на языке VBA в электронных таблицах Microsoft Excel, с его помощью проведён экспериментальный расчёт с данными модели ТЭК Вьетнама. Результаты расчётов на прототипе были сопоставимы с результатами расчётов на балансовой экономико-математической модели ТЭК, выполненных с помощью ППП «Корректива».

Модель сети энергетических хабов по сравнению с прочими моделями энергетики даёт более удобную схему представления территориально-производственной структуры ТЭК для программного обеспечения, предназначенного для исследования поведения ТЭК при воздействии крупных возмущений. Например, реализация данной модели позволит значительно упростить архитектуру ядра ППП «Корректива». К недостаткам текущей реализации модели следует отнести отсутствие возможности взаимозаменяемости различных видов топлива на электрических станциях, что важно при исследовании живучести ТЭК России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Г.Н., Черкесов Г.Н., Криворуцкий Л.Д. и др. Методы и модели исследования живучести систем энергетики. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1990. 285 с.
2. Гранберг А.Г. Оптимизация территориальных пропорций народного хозяйства. М.: Экономика. 1973. 248 с.
3. Еделев А.В., Пяткова Н.И., Чемезов А. В., Нгуен Хоай Нам. Программный комплекс «Корректива» для исследований долгосрочного развития топливно-энергетического комплекса Вьетнама // Программные продукты и системы. 2014. № 4. С. 211–216.
4. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения. М.: Наука. 1988. 144 с.
5. Козлов М.В., Малашенко Ю.Е., Рогожин В.С, Ушаков И.А., Ушакова Т.В. Моделирование живучести систем энергетики: методология, модель, реализация. Сообщения по прикладной математике. М.: ВЦ АН СССР. 1986. 58 с.
6. Макаров А.А., Веселов Ф.В., Елисеева О.А. и др. SCANNER. Суперкомплекс активной навигации в энергетических исследованиях. М.: ИНЭИ РАН. 2011. 144 с.
7. Макаров А.А., Мелентьев Л.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. Новосибирск: Наука. Сибирское отд.. 1973. 273 с.

8. Мелентьев Л.А. и др. Методические положения оптимизации топливно-энергетического хозяйства с использованием математических моделей Сибирский энергетический институт СО АН СССР, Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского МЭ и Э СССР, Энергосетьпроект МЭ и Э СССР, Центральный экономико-математический институт АН СССР. М.: [б. и.], 1967. 160 с.
9. Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Агафонов Г. В. Методы и модели разработки региональных энергетических программ. Новосибирск: Наука. 2003. 140 с.
10. Филипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: пер. с англ. М.: Мир. 1984. 496 с.
11. Almassalkhi M., Hiskens I. Optimization framework for the analysis of largescale networks of energy hubs // 17th Power System Computation. – Conf. Stockholm, Sweden, 2011. 7 p.
12. Almassalkhi M.R., Towle A. Enabling city-scale multi-energy optimal dispatch with energy hubs // In Power Systems Computation Conference (PSCC). 2016. Pp. 1–7.
13. Geidl, M. and Andersson, G. Optimal coupling of energy infrastructures// In Power Tech – IEEE Lausanne. 2007. Pp. 1398–1403.
14. Geidl M., Koeppel G., Favre-Perrod P., Klockl B., Andersson G., Frohlich K. Energy hubs for the future // IEEE power and energy magazine. 2007. № 5(1). Pp. 24–30.
15. Gil E.M., McCalley J.D. A US energy system model for disruption analysis: Evaluating the effects of 2005 hurricanes // IEEE Transactions on Power Systems. 2011. № 26(3). Pp. 1040–1049.
16. Herbst A., Toro F., Reitze F., Jochem E. Introduction to energy systems modeling // Swiss journal of economics and statistics. 2012. № 148(2). Pp. 111–135.
17. MPS file format. Режим доступа: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/mps-format.htm> (дата обращения: 9.08.2017).
18. Quelhas A., McCalley J.D. A multiperiod generalized network flow model of the US integrated energy system: Part II – Simulation results // IEEE Trans. on Power Syst, 2007. Vol. 22. Pp. 837–844.

**THE MODELING OF ENERGY SECTOR WITH IMPACT OF LARGE
PERTURBATIONS ON THE BASIS OF ENERGY HUBS**

Alexey V. Edelev

Ph. D., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: flower@isem.irk.ru

Olga A. Edeleva

Ph. D., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: edel@isem.irk.ru

Nguyen Hoai Nam

Associate Director on Sustainable Energy Systems, Institute of Energy Science of the Vietnam
Academy of Science and Technology, e-mail: hoainam.ies@gmail.com
18, Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Hanoi

Abstract. The article considers the approach to the investigation of the behavior of the fuel and energy complex under the influence of large disturbances based on energy hubs. The model of the power hub network in comparison with other energy models gives a more convenient diagram of the representation of the territorial-production structure of the country's energy for software intended for studying the behavior of the fuel and energy complex under the influence of large disturbances. The prototype of the model, implemented as a program in the VBA programming language in Microsoft Excel spreadsheets, was tested on Vietnamese energy data. The results showed the adequacy of the developed model of the fuel and energy complex in the form of a network of energy hubs.

Keywords: energy system, energy sector, survivability, energy hub.

References

1. Antonov G. N., Cherkosov G.N., Krivoruckij L.D. i dr. Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem jenergetiki [Methods and models for studying the survivability of energy systems]. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1990. 285 p. (in Russian)
2. Granberg A.G. Optimizacija territorial'nyh proporcij narodnogo hozjajstva. [Optimization of territorial proportions of the national economy]. M.: Jekonomika. 1973. 248 p. (in Russian)
3. Edelev A.V., Pjatkova N.I., Chemezov A. V., Nguen Xoaj Nam. Programmnyj kompleks «Korrektiva» dlja issledovanij dolgosrochnogo razvitija toplivno-jenergeticheskogo kompleksa V'etnama [The software package "Corrective" for research of long-term development of Vietnam's fuel and energy complex]. Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems, 2014, no. 4, Pp. 211–216. (in Russian)
4. Zorkal'cev V.I. Metody prognozirovaniya i analiza jeffektivnosti funkcionirovaniya sistemy toplivosnabzhenija [Methods for forecasting and analyzing the efficiency of the fuel supply system]. M.: Nauka. 1988. 144 p. (in Russian)

5. Kozlov M.V., Malashenko Ju.E., Rogozhin V. S, Ushakov I.A., Ushakova T.V. Modelirovanie zhivuchesti sistem jenergetiki: metodologija, model', realizacija. Soobshhenija po prikladnoj matematike [Modeling of survivability of energy systems: methodology, model, implementation]. M.: VC AN SSSR. 1986. 58 p. (in Russian)
6. Makarov A.A., Veselov F.V., Eliseeva O.A. i dr. SCANNER. Superkompleks aktivnoj navigacii v jenergeticheskikh issledovanijah [SCANNER. Supercomplex of active navigation in energy research]. M.: INJeI RAN. 2011. 144p. (in Russian)
7. Makarov A.A., Melent'ev L.A. Metody issledovanija i optimizacii jenergeticheskogo hozjajstva [Methods of research and optimization of energy facilities]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otd. 1973. 273 p. (in Russian)
8. Melent'ev L.A. i dr. Metodicheskie polozhenija optimizacii toplivno-jenergeticheskogo hozjajstva s ispol'zovaniem matematicheskikh modelej Sibirskij jenergeticheskij institut SO AN SSSR, Jenergeticheskij institut im. G.M. Krzhizhanovskogo MJe i Je SSSR, Jenergose'tproekt MJe i Je SSSR, Central'nyj jekonomiko-matematicheskij institut AN SSSR [Methodical provisions for optimizing the fuel and energy economy using mathematical models]. M.: 1967. 160 p. (in Russian)
9. Saneev B.G., Sokolov A.D., Agafonov G.V. Metody i modeli razrabotki regional'nyh jenergeticheskikh programm [Methods and models for the development of regional energy programs]. Novosibirsk: Nauka. 2003. 140 p. (in Russian)
10. Phillips D., Garsia-Dias A. Fundamentals of network analysis. Englewood Cliffs: N.J., Prentice Hall Publ. 1981. 474 p. (in Russian)
11. Almassalkhi M., Hiskens I. Optimization framework for the analysis of largescale networks of energy hubs // 17th Power System Computation. – Conf. Stockholm, Sweden, 2011. 7 p.
12. Almassalkhi M.R., Towle A. Enabling city-scale multi-energy optimal dispatch with energy hubs // In Power Systems Computation Conference (PSCC). 2016. Pp. 1–7.
13. Geidl, M. and Andersson, G. Optimal coupling of energy infrastructures// In Power Tech – IEEE Lausanne. 2007. Pp. 1398–1403.
14. Geidl M., Koeppel G., Favre-Perrod P., Klockl B., Andersson G., Frohlich K. Energy hubs for the future // IEEE power and energy magazine. 2007. № 5(1). Pp. 24–30.
15. Gil E.M., McCalley J.D. A US energy system model for disruption analysis: Evaluating the effects of 2005 hurricanes // IEEE Transactions on Power Systems. 2011. № 26(3). Pp. 1040–1049.
16. Herbst A., Toro F., Reitze F., Jochem E. Introduction to energy systems modeling // Swiss journal of economics and statistics. 2012. № 148(2). Pp. 111–135.
17. MPS file format. Available at: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/mps-format.htm> (accessed 9.08.2017).
18. Quelhas A., McCalley J.D. A multiperiod generalized network flow model of the US integrated energy system: Part II – Simulation results // IEEE Trans. on Power Syst, 2007. Vol. 22. Pp. 837–844.

УДК 620.9.002.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР ЭНЕРГЕТИКИ С
УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Пяткова Наталья Ивановна

К.т.н., зав. лабораторией «Развитие ТЭК с позиций энергетической безопасности»

e-mail: nata@isem.irk.ru

Береснева Наталья Михайловна

К.т.н., научный сотрудник лаборатории «Живучести систем энергетики»

e-mail: beresneva@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. В статье обоснована возможность исследования топливно-энергетического комплекса, объединяющего отраслевые системы энергетики, как критической инфраструктуры с позиций энергетической безопасности. Представлены разработанные модели для проведения исследований с учетом динамики, инструмент расчета и анализа состояний ТЭК в контексте критической инфраструктуры.

Ключевые слова: критическая инфраструктура, энергетическая безопасность, топливно-энергетический комплекс, энергетические системы, критически важные объекты (или критические объекты), пакет прикладных программ



1. Схема исследования критических инфраструктур энергетики с позиций энергетической безопасности. Исследования критических инфраструктур [1, 5, 7] в условиях высокого уровня развития информационных технологий стали одним из новых направлений исследований надежного энергоснабжения потребителей. В США энергетика рассматривается как один из секторов национальной критической инфраструктуры [5], в [7] предлагается рассматривать энергетику России как отдельную критическую инфраструктуру. Авторы считают, что, с учетом масштабов отраслевых систем энергетики России, имеет смысл рассматривать в качестве критических инфраструктур как топливно-энергетический комплекс (ТЭК) в целом, так и отдельные отраслевые системы энергетики. Исследования таких инфраструктур являются основной частью исследований проблем энергетической безопасности страны, под которой понимается сбалансированность спроса и предложения энергоресурсов [12]. Основное содержание задач исследований по обеспечению энергетической безопасности сводится к:

- прогнозированию условий функционирования и развития систем энергетики (СЭ, т.е. критических инфраструктур) и ТЭК (комплекса, состоящего из критических инфраструктур), с учетом возможных критических и чрезвычайных ситуаций (КС и ЧС);
- оценке состояния в этих условиях и выявлении потенциальных критически важных объектов (КВО) в системах топливо- и энергоснабжения потребителей;
- выбору альтернатив необходимых направлений и конкретных мер по предотвращению КС и ЧС в этих системах, по снижению их негативного воздействия с учетом дополнительных производственных и резервных возможностей СЭ и их способности по прохождению КС и ЧС (секционирование систем для локализации аварий, регулирование энергопотребления, отключение отдельных потребителей и др.).

Решаются эти задачи в рамках модельных сценарных исследований функционирования и развития СЭ и ТЭК в целом, учитывающих фактор ЭБ, ориентированных на линейные модели исследования большой размерности. Расчетные условия для этих исследований формируются на этапе качественного анализа информационной базы исследований. Проводятся эти исследования с помощью специализированных программ, основная задача которых – информационная поддержка моделирования состояний ТЭК в условиях КС и ЧС, с последующим расчетом и оценкой этих состояний. Важная компонента оценки состояний – выявление потенциальных КВО, определение степени их критичности в контексте исследуемых ситуаций. При этом под КВО понимают наиболее уязвимые элементы критических инфраструктур, нарушения в работе которых могут вызвать существенные сбои в надежном энергоснабжении потребителей. Это



соответствует данному в [10] определению, согласно которому КВО - “объекты, нарушение или прекращение функционирования которых приводит к потере управления экономикой Российской Федерации, субъекта Российской Федерации...необратимому негативному изменению или разрушению экономики Российской Федерации, субъекта Российской Федерации... либо существенному снижению безопасности жизнедеятельности населения...на длительный период”. Обязательное условие выделения КВО в ТЭК - учет условия максимально возможного удовлетворения потребителей в случае реализации нештатных ситуаций, связанный с:

- выявлением и нейтрализацией разного рода угроз устойчивому топливно- и энергоснабжению потребителей (включая угрозы террористических актов на объектах ТЭК);
- анализом и оценкой состояния отраслевых систем энергетики в условиях КС и ЧС, являющихся реализацией угроз ЭБ;
- заблаговременной подготовкой объектов и систем ТЭК к работе во время ЧС, вызванных реализацией угроз различного вида.

Моделируемые при этом нештатные ситуации, как правило, связаны с резким ростом потребления в условиях сильных похолоданий (природной угрозы) на значительной территории европейской части страны. При этом максимальные сезонные отопительные нагрузки регионов в зависимости от их климатических условий, от состава потребителей в них могут отклоняться от среднесезонных значений на значительную величину, вплоть до 20-30 %. Это может сопровождаться значительным ростом спроса на энергоресурсы как для единой климатической зоны, так и нескольких соседних регионов.

Не менее актуальна реализация техногенных угроз, связанных, в том числе, с износом и старением оборудования в отраслях энергетики. В отдельных отраслях энергетики проявления техногенных угроз может выражаться в аварийных ситуациях на транспорте, объектах добычи и производства энергоресурсов.

Так, в системе газоснабжения одним из наиболее опасных (по последствиям) фактором является возможность повреждения трансконтинентальных газопроводов, идущих из крупного газодобывающего района (Надым-Пур-Тазовский район Тюменской области) через Урал в европейскую часть России, поскольку природный газ в Европейской части России, на Урале и в Поволжье стал практически монопольным ресурсом в производстве электроэнергии и тепла. В системе нефтеснабжения таким сдерживающим фактором являются объекты системы, наиболее критичные с точки зрения поставок нефти на нефтеперерабатывающие заводы Поволжья. В угольной отрасли значительный вес имеют поставки экибастузских углей из Казахстана на отдельные электростанции юга уральского



федерального округа. В электроэнергетике значительные недопоставки могут быть вызваны разрывами связей между отдельными энергосистемами или аварийными ситуациями на конкретных электростанциях (например, крупная авария в Московской энергосистеме 2005 года на подстанции «Чагино», авария на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г., системная авария на энергообъектах Сибирского федерального округа (СФО) из-за сбоя на Братской ГЭС в июне 2017 г.).

Оценить функционирование систем в этих условиях в рамках модельных исследований можно с помощью аппарата двойственных оценок [2]. Двойственные оценки в этом случае могут служить мерой дефицитности какого-либо ресурса, показывая при этом, как изменение ограничения этого ресурса на единицу может привести к изменению значения целевой функции на величину двойственной оценки [9]. В нашем случае таким ресурсом могут являться производственные возможности рассматриваемых технологических способов (мощности по добыче, производству, транспорту энергоресурсов, запасов разного назначения). При этом должны анализироваться двойственные переменные. Для объектов, производственных мощностей которых достаточно для выполнения требуемых технологических операций, значение соответствующей двойственной переменной будет равно нулю, для потенциальных КВО значения двойственной переменной будут меньше нуля. Ранг выявленных объектов характеризует степень нарушения энергоснабжения потребителей (его частичное или полное нарушение). Оценку состояния систем в условиях критических и чрезвычайных ситуаций предполагается проводить на базе экономико-математических моделей и инструментальных средствах проведения исследований, описанных ниже. Обобщенная онтология модельных исследований критических инфраструктур энергетики с позиций обеспечения ЭБ приведена на рис. 1.



Рис. 1. Онтология модельных исследований критических инфраструктур энергетики

2. Система экономико-математических моделей ТЭК для исследования поведения критических инфраструктур с позиций энергетической безопасности. Возможные крупномасштабные последствия от нештатных ситуаций (КС и ЧС), складывающиеся при этом изменения, в том числе в отраслевой структуре, требуют специального анализа особенностей поведения критических инфраструктур (систем энергетики) вблизи их предельного состояния. Только иерархически построенная схема исследований и моделей может обеспечить условия для получения и согласования результатов исследований функциональных свойств отдельных СЭ и структурных соотношений в ТЭК, позволит совместно учесть физико-технические и технико-экономические характеристики рассматриваемых объектов. Онтология, представленная на рис. 2, иллюстрирует использование моделей функционирования и развития ТЭК, концептуально идентичных в содержательном аспекте, выраженном в выделении топливно-энергетических ресурсов, объектов (энергетических и экономико-организационных) и многоуровневых территориальных образований. Моделируемые объекты описываются технологическими и экономическими характеристиками, протекающими в них процессами (технологиями) преобразования ресурсов. Характер последних определяет тип объектов, идентифицирует энергетические (объекты добычи и переработки ресурсов, объекты их хранения и транспортировки) и организационно-экономические (различные категории потребителей, отраслевые



управленческие организации) объекты. Взаимодействие объектов, их объединение в группы и их территориальная привязка в моделях регламентируется управленческо-организационными связями, применимыми, в том числе, и к территориальным образованиям.

Рис. 2. Онтология моделей исследования ТЭК

Эти модели, различные по территориальной, временной и технологической иерархии, в контексте взаимосвязи задач функционирования и развития ТЭК имеют следующие особенности:

1. В моделях функционирования ТЭК имеет место детализированное представление объектов, работоспособность которых рассматривается в трех временных интервалах (сутки, месяц, квартал). Необходимость такой градации вызвана особенностями функционирования отдельных СЭ в условиях нештатных ситуаций при максимальной загрузке их производственных мощностей, особенно в отопительный период (например, учет декабрьского максимума нагрузки в электроэнергетической системе и учет суточных отборов газа из ПХГ в конце отопительного сезона). При этом территориально рассматриваются административные единицы страны (как правило, субъекты РФ).



2. В моделях развития ТЭК на технологическом уровне выделяются группы или типы объектов ТЭК, привязанные к федеральным округам страны. При этом прогнозирование ведется по временным интервалам в годовом разрезе.

В основе такой системы моделей лежит модель оценки территориально-производственной структуры ТЭК с учетом требований ЭБ, подробно рассмотренная в [8, 12]. Эта модель может использоваться в двух режимах:

- в режиме определения оптимального развития энергетических технологий (с учетом структурной избыточности в виде резервов мощностей, запасов топлива, взаимозаменяемости энергоресурсов) и оптимального распределения потребляемых энергоресурсов,

- в режиме определения недопоставок энергоресурсов (дефицитов ТЭР) в целом по стране и по отдельным регионам.

Модель оценки структуры ТЭК состоит из отраслевых подсистем энергетического комплекса (газовой, угольной, нефтеперерабатывающей (в части мазутоснабжения) отраслями, электро- и теплоэнергетикой), поддерживает территориальную и временную иерархию. В нее включен финансовый блок, описывающий инвестиционные затраты на реконструкцию, модернизацию действующих мощностей, вывод устаревшего оборудования, ввод новых мощностей на объектах энергетических отраслей. В ней же реализован учет динамики развития ситуации [6], который позволил отследить такие особенности многошагового процесса развития ТЭК, как:

- ввод новых производственных мощностей;
- демонтаж и консервацию старых объектов,
- реконструкцию объектов с изменением технологической схемы.

Реализован учет динамики в модели в виде T самостоятельных статических блоков, каждый из которых описывает все территориальные и технологические связи ТЭК применительно к этапу t расчетного периода. Динамические связи между блоками строятся с помощью уравнений, формулирующих для всех x_i объектов ТЭК условие преемственности их производительностей на различных этапах расчетного периода. Для первого этапа это условие записывается как

$$, \quad (1)$$

а для последующих этапов в виде уравнений

$$, \quad (2)$$

где $\dots$ к началу расчетного периода,



- производительность новой части технологии (объекта i) на этапе $t-1$,
- производительность действующей части технологии (объекта i) на этапе t ,
- консервация части объекта i на этапе t ,
- ликвидация части объекта i на этапе t .

Для удобства формирования связей уравнение (2) разбито на две части

,

,

Где Z_{it-1} – промежуточная переменная, характеризующая полную производительность объекта i в начале этапа t . Она учитывает выбытие мощностей на этапе t и ввод новых мощностей на временном этапе $t+1$.

В целом модель используется для определения следующих характеристик (показателей):

- размеров недопоставок (дефицита) в отдельных видах энергоресурсов по рассматриваемым категориям потребителей, выделенным территориальным объединениям и в целом по стране, как величина невязки между заданной потребностью и возможностью производства данного вида энергоресурса (с учетом запасов, возможностей замещения этого вида энергоресурса у других потребителей и др.);

- изменений пропускных способностей межрайонных транспортных связей, определяемых путем сравнения соответствующих показателей рассматриваемого варианта с исходным;

- рекомендуемого рационального использования производственных мощностей энергетических объектов, а также распределения отдельных видов энергоресурсов по категориям потребителей.

3. Информационная поддержка исследований. Информационная поддержка исследований на динамической модели ТЭК реализована в модернизированном «универсальном» модуле распределенного ППП «Корректива» [3-4]. В нем реализованы жесткие структуры представления данных (таблицами исходных и результирующих данных, конфигурационными настройками подготовки информации), автоматическая сборка данных из источников (форм статистической отчетности и предметных баз данных), автоматическое формирование расчетных файлов модели, поиск узких мест с последующей их идентификацией (в том числе, картографической) в контексте полученных результатов



расчета. Регламент процедур подготовки данных в модуле прописан в правилах автоматической сборки состояний, описывающих основные технологии используемой модели с привязкой к источникам информации, в правилах задания динамических связей между соседними состояниями. Правила автоматической сборки состояний представлены блоком правил преобразования ресурсов внутри территорий, правилами транспортировки ресурсов между ними. Правила задания динамических связей между соседними состояниями ТЭК, в соответствии с основной концепцией организации динамического моделирования в модуле, представлены характеристиками этих состояний и характеристиками самих связей.

Суть концепции состоит в следующем:

1. Организация раздельного моделирования статических состояний ТЭК по опорным годам, отдельного моделирования динамических связей между сформированными статическими состояниями.
2. Применение уникальной единой кодировки для моделирования статических состояний ТЭК, расширяемой дополнительной идентификацией временной принадлежности состояний на этапе проведения расчетов.
3. Применение уникальной (отличной от представления состояний ТЭК) единой кодировки для моделирования динамических связей между состояниями. Поддержка типизации этих связей на всем временном интервале с привязкой к конкретным технологиям состояний.
4. Поддержка механизма задания динамических связей между соседними временными состояниями в виде «правил», описывающих ресурсы и технологии связываемых статических состояний, ресурсы и технологии динамических связей этих состояний, включающих вспомогательную переменную для ослабления жесткости связи для отладки модели.

Реализованная в модуле технология проведения исследований (рис. 3) представлена следующими ключевыми этапами:

1. Этап формирования исходных данных, включающий их автоматическую подготовку на базе имеющихся источников (предметные таблицы, предметные базы данных), экспертную корректировку собранных данных, в том числе возможную корректировку правил задания динамических связей.
2. Этап подготовки и проведения расчетов, включающий генерацию автономных состояний ТЭК по опорным годам, генерацию уравнений связи между ними, формирование единого файла в формате решателя для проведения последующих расчетов.



3. Представление и анализ результатов расчета в табличной и картографической форме.

Данная технология полностью отражает итерационный цикл исследований, позволяет получить существующее решение с учетом возможного регулирования жесткости динамических связей.

4. Экспериментальные исследования по оценке состояния в критических инфраструктурах энергетики в условиях нештатных ситуаций. С использованием разработанных моделей и программных средств в рамках исследования влияния угроз энергетической безопасности на надежное энергоснабжение потребителей был проведен ряд экспериментальных расчетов. Первый цикл касался оценки состояния отраслевых систем в комплексе при реализации природной угрозы – похолодание в отдельных регионах и при одновременном наступлении похолодания в двух соседних регионах. Следующий цикл расчетов касался оценки недопоставок природного газа в регионы из центров добычи в условиях нештатных ситуаций, осложненных перекасами топливно-энергетического баланса европейских регионов в сторону этого ресурса.

Анализ готовности обеспечить спрос на котельно-печное топливо (КПТ), электрическую и тепловую энергию в условиях резких похолоданий был проведен на уровне федеральных округов по данным о производстве и потреблении за 2016 г. [11]. Месяц проведения такого ориентировочного анализа – январь, наиболее холодный по усредненным данным месяц в регионах России. Увеличение потребностей в энергоресурсах задается на 10% больше среднесуточной в обычных условиях. Рассматриваемый временной интервал реализации рассматриваемого резкого похолодания – сутки. Общая характеристика полученных результатов приведена в сводной таблице (табл. 1). Общая закономерность полученных результатов - появление дефицита у потребителей топлива европейских регионов страны, причем основную часть составляет природный газ, являющийся основным видом топлива в этих регионах. Повышенная потребность в электроэнергии погашалась за счет диверсификации выработки электроэнергии на разных типах электростанций и использовании резервов генерирующих мощностей при наличии топлива на тепловых электростанциях. При этом недостаток газа на ТЭС компенсировался резервами топочного мазута.



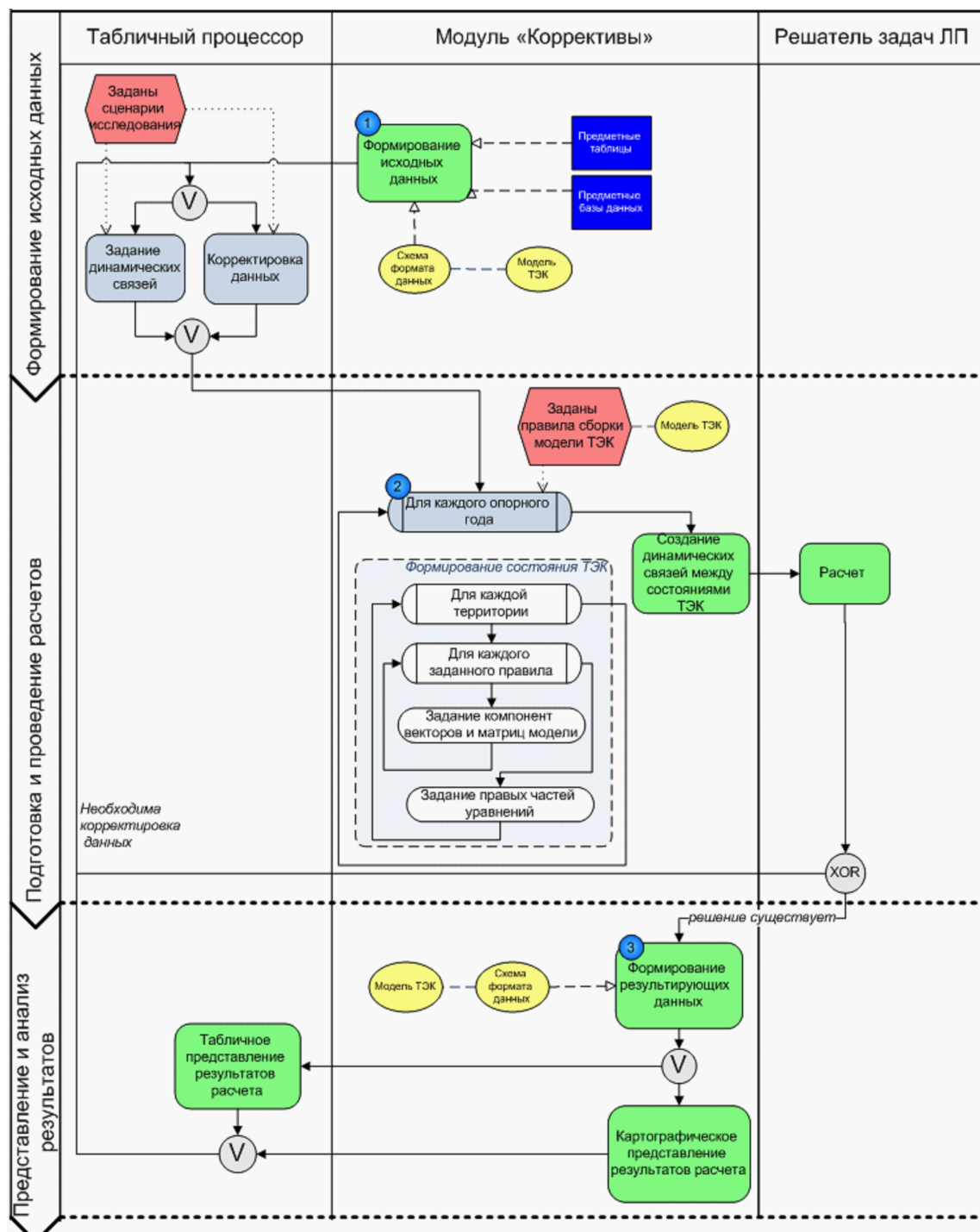


Рис. 3. Технология проведения исследований на динамической модели ТЭК

Поэтому следующим шагом стала оценка влияния важнейшей угрозы ЭБ - доминирующая роль природного газа в структуре топливно-энергетического баланса европейских регионов России. Действие этой угрозы усугублялось аварийностью, вызванной износом фондов объектов энергетики. Расчетными условиями проведения экспериментов стали:

- выбор временного интервала – первый квартал года, наиболее тяжелый с точки зрения состояния резервов и запасов в хранилищах (в т.ч. и газа в ПХГ);
- реализация аварийных ситуаций на отраслевых объектах (магистральные газопроводные коридоры, узловые компрессорные и насосные станции), связанных с территориями, наиболее чувствительными к потерям производственного потенциала отрасли.

Таблица 1. Дефицит КППТ и теплоэнергии при похолодании на территории отдельных округов (в % от суточного потребления)*

Федеральные округа	ВАРИАНТЫ ПОХОЛОДАНИЯ**										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Северо-Западный	-	1,5/1,2	0,4/0,3	-	5,0/4,1	5,0/5,0	1,5/1,2	1,6/1,2	1,9/1,6	0,8/0,5	1,7/1,3
Центральный	-	-	-	-	3,1/3,2	3,2/3,2	1,4/1,3	3,0/3,0	3,2/3,2	0,7/0,7	2,7/2,7
Приволжский	-	0,2/0,1	0,2/0,1	-	0,4/0,3	0,3/0,2	0,3/0,2	0,3/0,2	-	0,4/0,3	-
Северо-Кавказский	-	4,8/7,7	-	-	5,8/9,3	5,8/9,2	5,8/9,2	5,8/9,2	5,8/9,3	5,8/9,3	5,8/9,3
Южный	-	-	-0,5	-	-	-	-	-	-	-	0,4/0,4
Уральский	-	-	0,2/0,5	-	-	1,0/5,0	-	-	-	0,2/0,5	-
Сибирский	-	-	3,1/4,0	-	0,6/0,8	-	-	-	-	4,2/5,7	-
Дальневосточный	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4/0,7	-

* Числитель – дефицит КППТ, знаменатель – дефицит теплоэнергии.

** 1 – похолодание в Северо-Западном ФО; 2 – похолодание в Уральском ФО; 3 – похолодание в Сибирском ФО; 4 – похолодание в Дальневосточном ФО; 5 – похолодание в Приволжском и Уральском ФО; 6 – похолодание в Приволжском и Центральном ФО; 7 – похолодание в Приволжском и Южном ФО; 8 – похолодание в Северо-Западном и Приволжском ФО; 9 – похолодание в Северо-Западном и Центральном ФО; 10 – похолодание в Сибирском и Уральском ФО; 11 – похолодание в Северо-Западном и Уральском ФО



Как показывают расчеты, в результате аварии в Уральском ФО, характеризующемся высокой плотностью газотранспортных потоков, потенциальная недопоставка газа основным потребителям может составить около 14% за дни аварии. Наиболее весомо эта недопоставка может сказаться на потребителях Северо-Западного (недопоставка газа - 37%) и Центрального (недопоставка - 21%) федеральных округов. Эффект негативного воздействия аварии может быть компенсирован взаимозаменяемостью топлив. Анализ результатов показал, что с учетом возможностей замещения газа топочным мазутом и использования запасов и резервов в системах энергетики, недопоставка газа в целом по стране в этой ситуации составит 4,5% от потребностей рассматриваемого периода. Дефицит топочного мазута при этом составит 1,6%. В целом же эта аварийная ситуация может вызвать дефицит у потребителей топливно-энергетических ресурсов в размере 2,8% от суммарной квартальной потребности в них. На основе проведенных расчетов можно утверждать, что при сложившейся доле газа в ТЭБ европейской части страны более 70%, возможны негативные последствия, связанные с невозможностью компенсации недостающих объемов газа другими энергоресурсами при крупной аварии на магистральных газопроводах.

Заключение. Представленные в статье модельно-инструментальные средства позволяют проводить исследования по оценке различных нештатных ситуаций в критических инфраструктурах энергетики. Полученные с их помощью результаты подтверждают работоспособность созданных инструментальных средств, возможность их использования для оценки состояния систем энергетики и ТЭК, как критических инфраструктур, в нештатных ситуациях при различных вариантах их развития, и для выявления ограничений на объектах энергетики (транспорте, добычи, производстве, хранении), которые негативно влияют на надежное топливо- и энергоснабжение потребителей. Развитие исследований предполагает проработку методического аппарата по выявлению потенциально слабых звеньев (КВО) в ТЭК, способных существенно повлиять на надежное энергоснабжение потребителей, и проведения вычислительных экспериментов с использованием этого аппарата.

Результаты, приведенные в статье, получены при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН № I.33П и гранта РФФИ № 16-07-00474.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Защита критической инфраструктуры. Концепция основных мер защиты [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/sprachvarianten/Basisschutzkonzept_kritische_Infrastrukturen_russisch.html



(дата обращения: 10.09.2017.)

2. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения. М.: Наука. 1988. 144 с.
3. Еделев А.В., Пяткова Н.И., Чемезов А. В., Нгуен Хоай Нам. Программный комплекс «Корректива» для исследований долгосрочного развития топливно-энергетического комплекса Вьетнама // Программные продукты и системы. 2014. № 4. С. 211–216.
4. Еделев А.В., Сендеров С.М., Пяткова Н.И. Применение геоинформационных технологий для исследования проблем энергетической безопасности // Проблемы управления. 2015. № 2. С. 68–74.
5. Кондратьев А. Современные тенденции в исследовании критической инфраструктуры в зарубежных странах // Зарубежное военное обозрение. 2012. №1. С. 19–30.
6. Макаров А.А., Мелентьев Л.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. Новосибирск: Наука. 1973. 274 с.
7. Массель Л.В. Конвергенция исследований критических инфраструктур, качества жизни и безопасности // Информационные технологии и системы: Труды Шестой Международной научной конференции ИТиС. 2017. Челябинск: ЧелГУ. Науч. электрон. изд. ISBN 978-5-7271-1417-9. С. 170–175.
URL:<http://iit.csu.ru/content/docs/science/itis2017/itis2017.pdf> (дата обращения 10.09.2017)
8. Пяткова Н.И., Сендеров С.М., Пяткова Е.В. Методические особенности исследования проблем энергетической безопасности на современном этапе // Известия РАН. Энергетика. 2014. № 2. С.81–87.
9. Сакович В.А. Оптимальные решения экономических задач. Минск: Выш. школа. 1982. 272 с.
10. Сендеров С.М., Рабчук В.И., Еделев А.В. Особенности формирования перечня критически важных объектов газотранспортной сети России с учетом требований энергетической безопасности и возможные меры минимизации негативных последствий от чрезвычайных ситуаций на таких объектах // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 1. С. 70–78.
11. Статистические формы Росстата за 2016 год: 4 ТЭР, 11 ТЭР, 6 ТП
12. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н.И. Пяткова [и др.], отв. ред. Н.И. Воропай, М.Б. Чельцов; Рос. Акад. Наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2011. 198 с.



UDK 620.9.002.5

**MODELING OF CRITICAL ENERGY INFRASTRUCTURES
TAKING INTO ACCOUNT ENERGY SECURITY**

Natalia I. Pyatkova

PhD, Head of Laboratory «Energy development from the standpoint of energy security»

e-mail: nata@isem.irk.ru

Natalia M. Beresneva

PhD, Researcher of Laboratory «Energy systems survivability», e-mail: beresneva@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

130 str. Lermontova, Irkutsk, Russia, 664033

Abstract. The article substantiates the research capability of the fuel and energy complex, which includes the branch system energy as critical infrastructure from the standpoint of energy security. The developed model for research considering the dynamics of the tool, calculation and analysis of the state of FEC as a critical infrastructure is described.

Key words: critical infrastructures, energy security, fuel and energy complex, energy systems, critical important objects (or critical facilities), software package.

References

1. Zashchita kriticheskoy infrastruktury. Konceptiya osnovnyh mer zashchity [Protection of critical infrastructure. The concept of baseline protection] [Electronic resource]. Available at: http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/sprachvarianten/Basisschutzkonzept_kritische_Infrastrukturen_russisch.html (accessed 10.09.2017.) (in Russian)
2. Zorkaltsev V. Metody prognozirovaniya i analiza ehffektivnosti funkcionirovaniya sistemy toplivosnabzheniya [Methods of prediction and analysis of the effectiveness of the system of fuel supply] // M. Nauka = M. Science. 1988. 144 p. (in Russian)
3. Edelev A.V., Pyatkova N.I., Chemezov O.V., Nguyen Hoai Nam Programmnyj kompleks «Korrektiva» dlya issledovaniy dolgosrochnogo razvitiya toplivno-ehnergeticheskogo kompleksa V'etnama [Software complex "Adjustment" for studies of long-term development of the fuel and energy complex of Vietnam] // Programmnye produkty i sistemy = Software «Информационные и математические технологии в науке и управлении» 2017 № 3 (7)



- products and systems. 2014. № 4. Pp. 211–216 (in Russian).
4. Edelev A.V., Senderov S.M., Pyatkova N.I. *Primenenie geoinformacionnyh tekhnologij dlya issledovaniya problem ehnergeticheskoy bezopasnosti* [The application of GIS technology to study the problems of energy security] // *Problemy upravleniya = Problems of management*. 2015. № 2. Pp. 68–74. (in Russian)
 5. Kondratyev A. *Sovremennye tendencii v issledovanii kriticheskoy infrastruktury v zarubezhnyh stranah* [Modern trends in the study of critical infrastructure in foreign countries] // *Zarubezhnoe voennoe obozrenie = Foreign military review*. 2012. № 1. Pp. 19–30 (in Russian)
 6. Makarov A.A., Melent'ev L.A. *Metody issledovaniya i optimizacii ehnergeticheskogo hozyajstva* [Methods of investigation and optimization of the energy sector]. Novosibirsk: Nauka = Novosibirsk: Science. 1973. 274 p. (in Russian)
 7. Massel L.V. *Konvergencija issledovanij kriticheskikh infrastruktur, kachestva zhizni i bezopasnosti* [Convergence of critical infrastructure, quality of life and safety researches]. *Informacionnye tehnologii i sistemy : Trudy Shestoj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii ITIS = Information Technologies and systems: Proceedings of 6th International Science . Conference ITS*. 2017. Cheljabinsk: ChelGU. Nauch. jelektron. izd.= Science el. publ. ISBN 978-5-7271-1417-9. Pp. 170–175. URL: <http://iit.csu.ru/content/docs/science/itis2017/itis2017.pdf> (Access data 10.05.2017)
 8. Pyatkova N.I., Senderov S.M., Pyatkova E.V. *Metodicheskie osobennosti issledovaniya problem ehnergeticheskoy bezopasnosti na sovremennom ehtape* [Methodological features of research of problems of energy security at the present stage] // *Izvestiya RAN. Energetika = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2014. № 2. Pp. 81–87 (in Russian)
 9. Sakovich V.A. *Optimal'nye resheniya ehkonomicheskikh zadach = Optimal solutions of economic problems*. Minsk: Vysh. Shkola = Minsk: Enter. School. 1982. 272 p. (in Russian)
 10. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Edelev A.V. *Osobennosti formirovaniya perechnya kriticheski vazhnyh ob"ektov gazotransportnoj seti Rossii s uchetoм trebovanij ehnergeticheskoy bezopasnosti i vozmozhnye mery minimizacii negativnyh posledstvij ot chrezvychajnyh situacij na takih ob"ektah* [Features of formation of the list of critically important objects of the gas transport network of Russia with the requirements of energy security and possible measures to minimize adverse effects from emergency situations on such objects] // *Izvestiya RAN. Energetika = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2016. № 1. Pp. 70–78 (in Russian)



11. Statisticheskie formy Rosstata za 2016 god: 4 TER, 11 TER, 6 TP = Statistical form Rosstat for the year 2016: 4 TER, TER 11, 6 TP
12. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i puti resheniya [Energy security of Russia: problems and solutions] // N.I. Pyatkova [et al.], ed. N.I. Voropai, M.B. Cheltsov. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN = Novosibirsk: SB RAN Publ. 2011. 198 p. (in Russian)



УДК 621.396.67

**МНОГОВАРИАНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРАКТИЧЕСКОЙ
ОПТИМИЗАЦИИ СТЕРЖНЕВОГО КАРКАСА КРУПНОГАБАРИТНОГО
РЕФЛЕКТОРА**

Филиппова Юлия Федоровна

Младший научный сотрудник,

Лаборатория вычислительной и экспериментальной механики,

Институт вычислительных технологий СО РАН,

660049 г. Красноярск, пр. Мира 53, e-mail: filippofajf@ict.nsc.ru

Аннотация. В данной работе представлен многовариантный подход к моделированию стержневого каркаса, конструктивного улучшения расположения стержней для снижения весовых характеристик, показателя среднеквадратического отклонения поверхности зеркала при эксплуатационных нагрузках от теоретической поверхности параболоида. Приведен пример практической оптимизации стержневого каркаса рефлектора.

Ключевые слова: рефлектор, стержневой каркас, ферменные конструкции, конструктивная оптимизация, многовариантный анализ

Введение. Рассматриваемый силовой каркас рефлектора представляет собой ферменную конструкцию из полимерных композиционных материалов (ПКМ), в роли стержневых элементов которой выступают трубы круглого сечения и корпусные детали, образующих в сборе кольцевые ребра жесткости. Общий вид конструкции представлен на рис. 1а. Пространственный силовой каркас образуется вследствие сборки плоских радиально расположенных ферм посредством установки стержневых элементов, так называемых кольцевых элементов и раскосов.

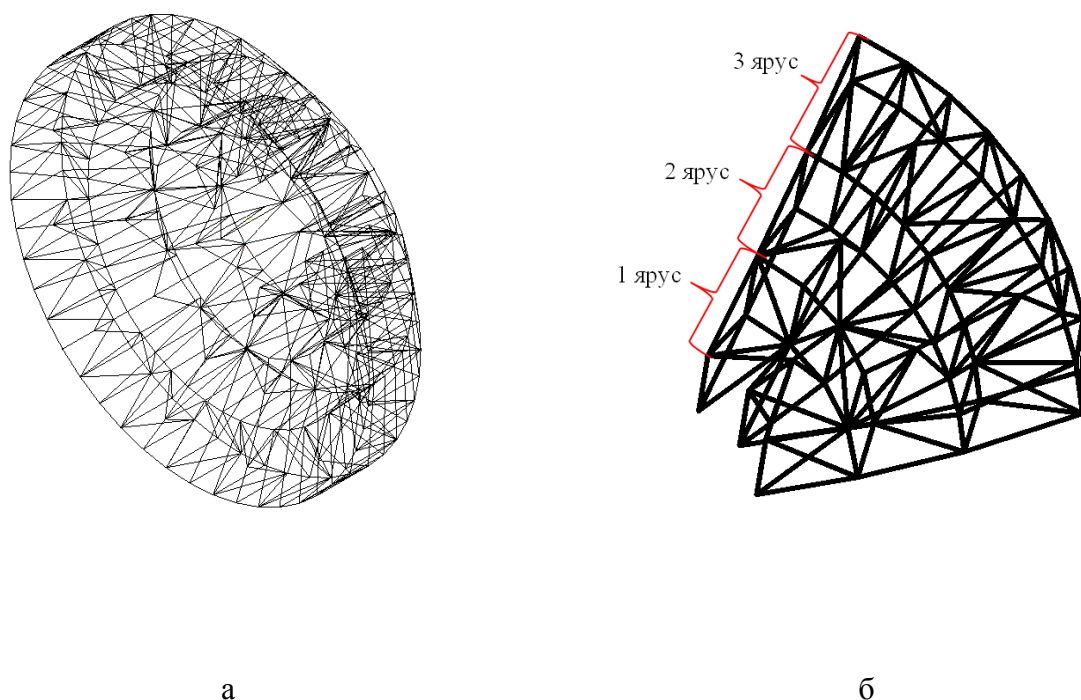


Рис. 1. Каркас силовой: а - пространственная конфигурация; б - стержневая система одного сектора (60°) каркаса

Поиск оптимальных решений связан с фундаментальными исследованиями отечественных и зарубежных ученых [3, 5, 8, 18 и др.], посвященными разработке принципов и методов решения нестандартных задач. Многочисленные работы позволили осуществить постановку и получить решения оптимизационных задач ряда конструктивных элементов (балок, пластин, оболочек) и составленных из них простейших систем [1, 2, 6, 7, 11, 15, 16, 19]. В гораздо меньшей степени развиты постановки и решения задач оптимизации конструкций реальных технических объектов [4, 10 и др.], что обусловлено сложностью и многовариантностью конструктивных форм, неопределенностью в исходных данных относительно условий нагружения конструкций.

Основные результаты по оптимизации конструктивных решений отечественных рефлекторов наземных параболических антенн, были получены Автандиляном Г.И., Бахрахом Л.Д., Бервалдсом Э.Я., Гусевым М.А., Калачевым П.Д., Соколовым А.Г., Поляком В.С. и другими авторами, обобщены в ряде монографий и справочников [9, 14]. Практическая реализация этих решений осуществлена преимущественно в изделиях ЦНИИПСК им Мельникова [13].

Однако следует отметить, что все эти решения были получены для рефлекторов с металлическим каркасом. Исследования в области оптимального проектирования

композитных конструкций [12 и др.] до настоящего времени не затрагивали каркасов рефлекторов из ПКМ. Вместе с тем, основные идеи в поиске оптимальных конструктивных решений рефлекторов с металлическим каркасом сводятся к следующему [9, 14].

1. Математическая постановка и решение задачи оптимального проектирования рефлектора со стержневым каркасом невозможна в силу как сложности конструктивных форм, так и технологических ограничений на непрерывность геометрических характеристик поперечных сечений стержней и характеристик жесткости и прочности применяемых материалов, поэтому рассматриваются стержневые системы, состоящие из стержней постоянного сечения. Определение наиболее жесткого каркаса возможно в результате решения прямой вариационной задачи методом параметрической оптимизации. Практически используемое решение с применением прямых методов предполагает введение вместо функциональных числовых параметров дискретных.

2. Единственным фактором, определяющим эффективность работы того или иного стержня каркаса, является его размещение в объеме каркаса, то есть «рисунок решетки» («узор строения») каркаса. Задача поиска оптимального размещения стержней каркаса не формализуема, поэтому базовым принципом поиска оптимальных решений является вариантное проектирование, условие успеха которого обоснованный выбор вариантов для сравнительного анализа. Сам анализ осуществляется как на базе рациональных рассуждений, так и с помощью инженерной интуиции.

3. Преимущественно используется двухуровневый подход к задачам практической оптимизации. На первом этапе ищется рациональный вариант конструктивной схемы («рисунок решетки») каркаса, далее выполняется обоснование рациональных геометрических характеристик сечений стержневых элементов.

4. Для выбранной структуры каркаса решаются задачи оптимизации распределения жесткости по критериям минимума массы, перемещений, среднеквадратического искажения формы, угловой ошибки направления радиолуча.

Постановка задачи. Для конструкций прецизионных рефлекторов рассматриваются две основные группы предельных состояний: по условиям жесткости (деформационный критерий) и по условиям отсутствия повреждений и разрушений (прочностной критерий). Из этого вытекает необходимость одновременного контроля нескольких важнейших характеристик (масса, среднеквадратичное отклонение (с.к.о.) поверхности зеркала, собственные частоты свободных колебаний) при вариантном поиске конструктивных решений, удовлетворяющих условиям обеих групп предельных состояний.

Для крупногабаритных прецизионных конструкций рефлекторов вопросы динамической жесткости каркаса являются обязательным условием и предпосылкой

реализации статической жесткости, обеспечивающей требуемые деформационные характеристики поверхности зеркала (с.к.о.). Интегральной характеристикой динамической жесткости являются низшие собственные частоты свободных колебаний.

Представим пространство проектных параметров рефлектора в виде множества Ω , где Ω_1 - множество варьируемых характеристик; Ω_2 - множество целевых функций; Ω_3 - множество ограничений:

где Ω_1 - множество параметров, описывающих топологию каркаса; Ω_2 - множество параметров поперечных сечений стержневых элементов; Ω_3 - множество параметров жесткости применяемых конструкционных материалов; Ω_4 - соответственно низшая собственная частота свободных колебаний, максимальные напряжения, масса каркаса, с.к.о. поверхности зеркала, критическая сила потери устойчивости. Значения в квадратных скобках соответствует допускаемым значениям величин.

С учетом вышесказанного сформулирована концепция многовариантного анализа конструкции наземного рефлектора, предполагающая выполнение двух циклов реализации многовариантных расчетов (рис. 2):

1) в качестве целевой характеристики рассматривается низшая частота свободных колебаний рефлектора. Поиск ее максимума осуществляется путем варьирования конфигурации каркаса (преимущественно), сечения стержневых элементов и жесткости материала с последующим модальным анализом. При этом ограничения учитываются постоянным контролем расчетных значений массы и с.к.о.;

2) в качестве целевых рассматриваются деформационные характеристики зеркала (с.к.о.) и каркаса (максимальные абсолютные деформации), показатели прочности и устойчивости (коэффициенты запаса по соответствующим критериям). Варьируются преимущественно сечения стержневых элементов. При этом осуществляется постоянный контроль собственных форм и частот свободных колебаний с целью недопущения их выхода за допускаемые значения.

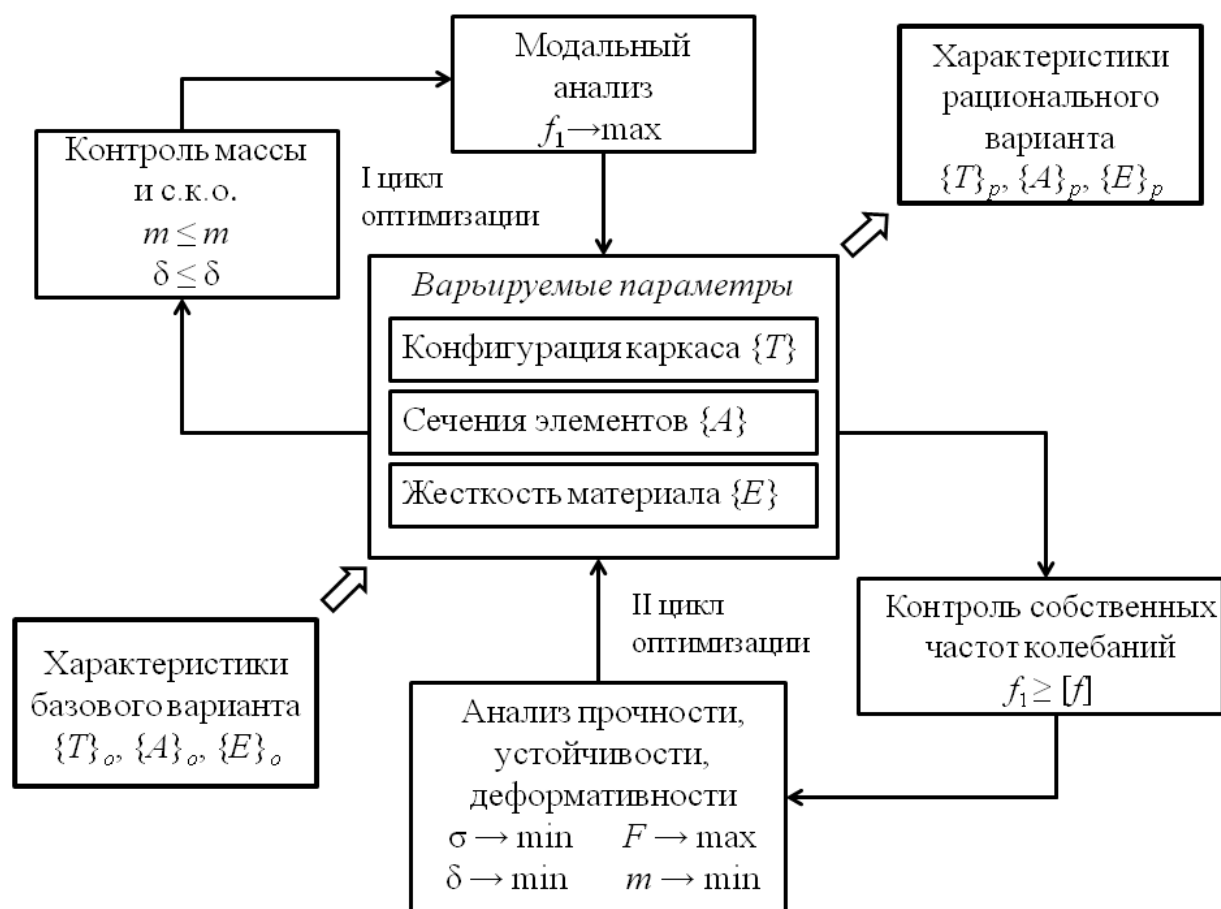


Рис. 2. Логическая схема многовариантного численного анализа конструкции рефлектора

На первом цикле оптимизации осуществляется сравнительный анализ и выбор одного (или нескольких) конструктивных вариантов каркаса, приемлемых по низшим частотам колебаний, на втором осуществляется более тщательное обоснование распределения жесткости и массы элементов каркаса в пределах занимаемого им объема пространства.

Результаты и обсуждение. Реализация первого цикла вычислительных экспериментов направлена на поиск рациональных конфигураций стержневого каркаса. В

качестве первоначального («базового») рассматривается конструктивный вариант, включающий в себя четыре типа радиальных ферм, соединенных в единую пространственную конструкцию с помощью кольцевых стержневых элементов и раскосов (рис. 1б).

Численная оценка с.к.о. осуществлялась при следующих условиях: угол наклона фокальной оси к горизонту составляет 60° (это один из самых неблагоприятных случаев нагружения при действии ветровых нагрузок), ветровое давление распределено равномерно по поверхности зеркала, действует нагрузка собственного веса.

Целенаправленный поиск путей формообразования каркаса осуществлялся посредством последовательного введения в расчетную схему и исключения из нее отдельных типов структурных элементов. При этом анализировалось изменение собственных частот, обусловленное введением и исключением указанных элементов.

В качестве первого для сравнительного анализа рассматривается конструктивный вариант, содержащий минимальный набор функционально необходимых для работы пространственной конструкции элементов радиальных и кольцевых ферм (варианты 1.1-1.4, отличающиеся высотой каркаса). Для конструктивных вариантов 1.1-1.4 вследствие исключения из расчетной схемы большого количества стержневых элементов по сравнению с базовым вариантом ожидаемо и существенно снизились показатели массы и с.к.о., тогда как низшие частоты снизились в гораздо меньшей степени. Это показывает низкую эффективность исключенных раскосов в обеспечении динамической жесткости каркаса.

Рассматривая конструктивные варианты 1.1-1.4, оказываемся в ситуации выбора между четырьмя альтернативными вариантами по трем критериям (масса, с.к.о., низшие значения собственных частот свободных колебаний). Предполагаем равноценность (равный вес) этих критериев. Варианты 1.3 и 1.4, несколько выигрывая по одному критерию (масса), существенно проигрывают по двум другим (с.к.о. и низшие значения собственных частот свободных колебаний). Тогда для дальнейшего рассмотрения используем варианты 1.1. и 1.2. С позиций теории принятия решения имеем дело с задачей упорядочивания объектов по предпочтению при многокритериальном выборе на конечном множестве альтернатив. Одним из методов решения такой задачи является метод анализа иерархий, в основе которого лежит использование сопоставительных оценок объектов по критериям с применением парных сравнений [17].

Вариант 1.1 предпочтительнее варианта 1.2 по критерию с.к.о. (в рассматриваемом интервале жесткостей материала отличие составляет 4,3-4,8 %). По критерию массы, напротив, предпочтительнее вариант 1.2 (отличие 8,3 %). По критерию низших значений собственных частот свободных колебаний варианты 1.1 и 1.2 следует считать равноценными:

при варьировании жесткости материала по разным формам колебаний предпочтение смещается то к варианту 1.1, то к варианту 1.2, причем количественная разница не превышает 4,1 %.

С учетом равноценности критериев отдадим предпочтение варианту 1.2, поскольку он обеспечивает наибольшее улучшение по одному из критериев (массы) при незначительном ухудшении по второму критерию (с.к.о.) при безразличном отношении к третьему критерию (низшие значения собственных частот свободных колебаний). Таким образом, оставляем вариант 1.2 для дальнейшего развития.

Далее (конструктивный вариант 2) в развитие поиска рационального конструктивного варианта оценим влияние направления наклона раскосов радиальных ферм. Для этого изменено направление наклона отдельных раскосов на противоположное. Это привело к ухудшению всех рассматриваемых характеристик по сравнению с вариантом 1.2, в связи с чем дальнейшее развитие варианта 2 не производилось.

Для подавления изгибной и крутильной форм колебаний целесообразно повышение пространственной жесткости в области ступицы. Это достигается введением стержней поясов и раскосов, образующих фермы, названные «диагональными» и дополнительно связывающие радиальные и кольцевые фермы (вариант 3).

Вариант 3 характеризуется существенным улучшением всех рассматриваемых характеристик (уменьшение с.к.о. и массы, повышение низших частот). Этот вариант может быть использован для дальнейшего развития.

В варианте 4 рассмотрено влияние раскосов в кольцевых фермах. Это влияние выражается в значительном ухудшении с.к.о. при отсутствии улучшений с низшими частотами. Этот вариант следует считать неэффективным.

Вариант 5 представляет собой попытку улучшения варианта 3 путем изменения направления раскосов в диагональных фермах. Это привело к незначительному снижению массы при незначительном же ухудшении с.к.о. и первой частоты. Это вариант в дальнейшем не развивается.

Итак, наибольшей эффективностью характеризуется попытка повышения пространственной жесткости в области ступицы. Ее развитие предпринято в следующих конструктивных вариантах.

В варианте 6 в околоступичной области верхние и нижние пояса радиальных и кольцевых ферм связаны стержневыми элементами, образующими пространственную «звезду», в качестве центра которой введен дополнительный стержень-стойка. Дальнейшее повышение жесткости этой структуры обеспечивается введением дополнительных раскосов, связывающих верхние и нижние пояса ферм.

Рассматриваются две модификации варианта 6: 6.1 характеризуется лучшими показателями и может быть основой для дальнейшего развития. Вариант 7 построен на базе варианта 6.1, но с увеличением количества стержневых элементов в области ступицы. Этот вариант оказался неэффективным: увеличилась масса и снизилась первая частота.

Дальнейшее развитие конструктивного варианта 6.1 связано с варьированием характеристик поперечных сечений стержней каркаса. В конструктивных вариантах базовом, а также с первого по седьмой, использовались предпочтительные значения: диаметр стержня – 60 мм с толщиной стенки 1,4 мм. Для назначения различных исполнений стержней рассмотрим 3 яруса стержней каркаса: к первому ярусу относятся стержни, расположенные между ступицей и первой (ближней к ступице) кольцевой фермой; второй ярус составляют стержни, расположенные между первой и второй кольцевой фермами; третий ярус образован стержнями между второй и периферийной кольцевой фермами (рис. 3).

Вариант 8 построен на базе варианта 6.1, отличается от него использованием стержней двух исполнений (с различными поперечными сечениями), и рассматривается в нескольких модификациях:

8.1 – диаметр 60 мм, толщина стенки 2,1 мм (первый ярус), диаметр 60 мм, толщина стенки 1,4 мм (второй и третий ярусы);

8.2 – диаметр 80 мм, толщина стенки 1,4 мм (первый ярус), диаметр 80 мм, толщина стенки 0,7 мм (второй и третий ярусы);

8.3 – диаметр 80 мм, толщина стенки 2,1 мм (первый ярус), диаметр 80 мм, толщина стенки 0,7 мм (второй и третий ярусы);

8.4 – диаметр 80 мм, толщина стенки 1,4 мм (первый ярус), диаметр 80 мм, толщина стенки 1,4 мм (второй и третий ярусы).

В результате сравнительного анализа расчетных показателей наиболее эффективным следует признать вариант 8.3.

В результате эволюции конструктивной формы каркаса (рис. 3) найден вариант 8.3, отличающийся от базового снижением массы, повышением первой частоты с незначительным ухудшением с.к.о. Наибольшее значение первой частоты среди всех рассмотренных вариантов явилось определяющим фактором выбора варианта 8.3, поскольку именно на повышение динамической жесткости был направлен выполненный анализ.

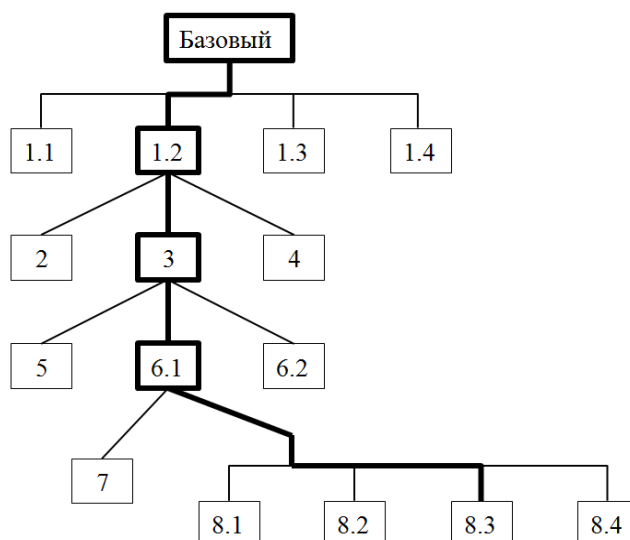


Рис. 3. Дерево эволюции конструктивной формы каркаса

Использование метода анализа иерархий для сравнительной оценки альтернатив, описанных деревом эволюции конструктивной формы каркаса (рис. 3), позволило установить предпочтительность конструктивного варианта 8.3.

Заключение. Исследования напряженно-деформированных и предельных состояний рефлекторов для оптимизации их конструктивных решений, позволили обосновать наиболее рациональную конфигурацию каркаса крупногабаритного рефлектора.

Благодарности. Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Министерства образования и науки России). Договор № 02.G25.31.0147.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баничук Н.В. Введение в оптимизацию конструкций. М.: Наука. 1986. 301 с.
2. Баничук Н.В. Оптимизация форм упругих тел. М.: Наука. 1980. 256 с.
3. Иоффе А.Д., Тихомиров В.М. Теория экстремальных задач. М.: Наука. 1974. 481 с.
4. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. М. Стройиздат. 1979. 319 с.

5. Лурье К.А. Оптимальное управление в задачах математической физики. М.: Наука. 1975. 480 с.
6. Мажид К.И. Оптимальное проектирование конструкций. М.: Высшая школа. 1979. 237 с.
7. Малков В.П., Угодчиков А.Г. Оптимизация упругих систем. М.: Наука. 1981. 288 с.
8. Математическая теория оптимальных процессов / Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. М.: Наука. 1983. 393 с.
9. Металлические конструкции / Под ред. Н.П. Мельникова. М.: Стройиздат, 1980. 776 с.
10. Методы оптимизации авиационных конструкций / Баничук Н.В., Бирюк В.И., Сейранян А.П., Фролов В.М., Яремчук Ю.Ф. М.: Машиностроение. 1989. 296 с.
11. Ольхофф Н. Оптимальное проектирование конструкций. М.: Мир, 1981. 277 с.
12. Оптимизация элементов конструкций из композиционных материалов / Баничук Н.В., Кобелев В.В., Рикардс Р.Б. М.: Машиностроение. 1988. 224 с.
13. Поляк В.С. Эволюция разработки прецизионных конструкций радиотелескопов для радиоастрономии, дальней и спутниковой космической связи // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 5. С. 14-16.
14. Поляк В.С., Бервалдс Э.Я. Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов: Опыт создания, проблемы анализа и синтеза. Рига: Зинатне. 1990. 526 с.
15. Прагер В. Основы теории оптимального проектирования конструкций. М.: Мир, 1977. 109 с.
16. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 1. М.: Мир. 1986. 350 с.
17. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь. 1989. 316 с.
18. Саати Т.Л. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы. М.: Мир. 1973. 304 с.
19. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции. М.: Мир. 1983. 478 с.

UDK 621.396.67

**MULTIVARIATE MODELING FOR PRACTICAL OPTIMIZATION
OF THE SKELETON FRAMES LARGE-SIZED REFLECTOR**

Julia F. Filippova

Junior Researcher, Laboratory of Computational and Experimental Mechanics

Institute of Computational Technologies
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
53, Mira avenue, 660049, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: filippofajf@ict.nsc.ru

Abstract. This paper presents a multivariate approach for the modeling of the skeleton frame, the constructive improvement of which allows us to identify factors that affect the reduction in weight characteristics, the index of the mean square deviation the mirror under operational loads from the theoretical surface of the paraboloid. An example of practical optimization skeleton frame reflector is presented.

Keywords: reflector, skeleton frame, truss construction, constructive optimization, multivariate analysis

Acknowledgements. This work was done during the complex project and was financially supported by the Russian Federation Government (Ministry of Education and Science of the Russian Federation). Contract № 02.G25.31.0147

References

1. Banichuk N.V. Vvedenie v optimizaciju konstrukcij [Introduction to Structural Optimization]. Moscow. Nauka Publ. 1986. 301 p. (in Russian)
2. Banichuk N.V. Optimizacija form uprugih tel [Optimization of the forms of elastic bodies]. Moscow. Nauka Publ. 1980. 256 p. (in Russian)
3. Ioffe A.D., Tihomirov V.M. Teorija jekstremal'nyh zadach [The theory of extreme problems]. Moscow. Nauka Publ. 1974. 481 p. (in Russian)
4. Lihtarnikov Ja.M. Variantnoe proektirovanie i optimizacija stal'nyh konstrukcij [Variant design and optimization of steel structures]. Moscow. Stroyizdat Publ. 1979. 319 p. (in Russian)
5. Lur'e K.A. Optimal'noe upravlenie v zadachah matematicheskoy fiziki [Optimum control in problems of mathematical physics]. Moscow. Nauka Publ. 1975. 480 p. (in Russian).
6. Mazhid K.I. Optimal'noe proektirovanie konstrukcij [Optimal design of structures]. Moscow. Graduate School Publ. 1979. 237 p. (in Russian)
7. Malkov V.P., Ugodchikov A.G. Optimizacija uprugih sistem [Optimization of elastic systems]. Moscow. Nauka Publ. 1981. 288 p. (in Russian)
8. Matematicheskaja teorija optimal'nyh processov [The mathematical theory of optimal processes] / Pontrjagin L.S., Boltjanskij V.G., Gamkrelidze R.V., Mishhenko E.F. Moscow. Nauka Publ. 1983. 393 p. (in Russian)

9. Metallicheskie konstrukcii [Metal constructions] / Pod red. N.P. Mel'nikova. Moscow. Stroyizdat Publ., 1980. 776 p. (in Russian)
10. Metody optimizacii aviacionnyh konstrukcij [Methods of optimization of aeronautical structures] / Banichuk N.V., Birjuk V.I., Sejranjan A.P., Frolov V.M., Jaremchuk Ju.F. Moscow. Mechanical engineering Publ. 1989. 296 p. (in Russian).
11. Ol'hoff N. Optimal'noe proektirovanie konstrukcij [Optimal design of structures]. Moscow. Mir Publ. 1981. 277 p. (in Russian).
12. Optimizacija jelementov konstrukcij iz kompozicionnyh materialov [Optimization of structural elements from composite materials] / Banichuk N.V., Kobelev V.V., Rikards R.B. Moscow. Mechanical engineering Publ. 1988. 224 p. (in Russian)
13. Poljak V.S. Jevoljucija razrabotki precizionnyh konstrukcij radioteleskopov dlja radioastronomii, dal'nej i sputnikovoj kosmicheskoj svjazi [Evolution of the development of precision designs for radio telescopes for radio astronomy, long-range and satellite space communications] // Industrial and civil construction. 2005. no. 5. Pp. 14-16. (in Russian)
14. Poljak V.S., Bervalds Je.Ja. Precizionnye konstrukcii zerkal'nyh radioteleskopov: Opyt sozdaniya, problemy analiza i sinteza [Precision constructions of mirror radio telescopes: Experience of creation, problems of analysis and synthesis]. Riga. Zinatne Publ. 1990. 526 p. (in Russian)
15. Prager V. Osnovy teorii optimal'nogo proektirovanija konstrukcij [Fundamentals of the theory of optimal design of structures]. Moscow, Mir Publ., 1977. 109 p.
16. Reklejtis G., Rejvindran A., Rjagsdel K. Optimizacija v tehnike [Optimization in technology]: V 2-h kn. Kn. 1. Moscow. Mir Publ. 1986. 350 p. (in Russian).
17. Saati T.L. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij [Making decisions. Method for analyzing hierarchies]. Moscow. Radio and Communications Publ. 1989. 316 p. (in Russian).
18. Saati T.L. Celochislennye metody optimizacii i svjazannye s nimi jekstremal'nye problemy [Integer optimization methods and related extreme problems]. Moscow. Mir Publ. 1973. 304 p. (in Russian)
19. Hog Je., Arora Ja. Prikladnoe optimal'noe proektirovanie. Mehanicheskie sistemy i konstrukcii [Applied optimal design. Mechanical systems and structures]. Moscow. Mir Publ. 1983. 478 p. (in Russian)

УДК 629.734/.735, 519.635.4

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ НИЖНЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ НИЗКОЛЕТЯЩЕГО КРЫЛА, ПОЛУЧЕННОЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ
РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ АНАЛИТИЧЕСКИМ И
ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДАМИ**

Скоробогатова Марина Викторовна

Старший преподаватель Кафедры естественнонаучных дисциплин,
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего
Образования «Московский Государственный Технический Университет Гражданской
Авиации» (Иркутский филиал), 664047, г. Иркутск, ул. Коммунаров 3,
e-mail: skorobogatova.mv@if-mstuca.ru

Аннотация. В целях улучшения эксплуатационных характеристик низколетящего летательного аппарата необходимо проектировать крыло, которое является несущей поверхностью, так приспособленное к полету на малых отстояниях от границы раздела сред, чтобы обеспечивать высокое качество аппарата в целом. Конфигурация такого крыла должна будет доставлять при заданных ограничениях экстремум указанному аэродинамическому коэффициенту. Для этого необходимо решить задачу оптимизации. Задачи оптимизации геометрии крыла обычно решают классическими методами вариационного исчисления, однако характерной особенностью таких задач является то, что они в подавляющем большинстве случаев имеют избыток граничных условий, накладываемых на экстремаль, так, что их число превышает порядок дифференциального уравнения необходимого условия экстремума. Альтернативным путем решения оптимизационных задач, аналитическое решение которых трудно или невозможно, – использовать численные методы оптимизации. Целью настоящей работы является исследование задач экстремизации ряда различных аэродинамических коэффициентов для улучшения эксплуатационных характеристик летательных аппаратов.

Ключевые слова. Теория оптимизации несущей поверхности, несущая поверхность, подъемная сила летательного аппарата, аэродинамические коэффициенты, метод Ритца, низколетящее крыло.

Введение. Особенности движения крыла на малых отстояниях от границы раздела сред является повышенное аэродинамическое качество, при этом основной вклад в



аэродинамические характеристики такого крыла вносит его нижняя поверхность [5]. Нижнюю поверхность низколетящего крыла можно выполнить в виде ровной пластины. Достоинство такой формы заключается в том, что ее изготовление проще с технологической точки зрения, однако с точки зрения аэродинамического качества подобная форма не может считаться наилучшей. В целях улучшения эксплуатационных характеристик необходимо проектировать крыло, которое специальным образом будет приспособлено к полету на малых отстояниях от границы раздела сред и сможет обеспечить высокое качество аппарата в целом. Конфигурация такого крыла должна будет доставлять при заданных ограничениях экстремум указанному аэродинамическому коэффициенту. Для этого необходимо решить задачу оптимизации.

1. Эффективность крыла летательного аппарата, предназначенного для движения вблизи границы раздела сред различной плотности. Крыло – это несущая поверхность летательного аппарата, предназначенная для создания аэродинамической подъемной силы, необходимой для обеспечения полета и маневров. Основной вклад в аэродинамические характеристики низколетящего крыла вносит его нижняя поверхность, поэтому верхняя поверхность подбирается таким образом, чтобы удовлетворить условию его замкнутости.

Эффективность крыла определяется набором его аэродинамических характеристик (АДХ). АДХ крыла вблизи границы раздела сред очень чувствительны к изменению формы его нижней поверхности, профилируя которую возможно получить существенный выигрыш в характеристиках. С точки зрения аэродинамики наилучшим считается такое крыло, которое обладает способностью создавать наибольшую подъемную силу при наименьшем лобовом сопротивлении. Лобовое сопротивление – это сопротивление движению крыла летательного аппарата в воздухе ($X_{кр}$).

С точки зрения аэродинамики наиболее выгодным будет такое крыло, которое обладает способностью создавать наибольшую подъемную силу при наименьшем лобовом сопротивлении.

В связи с этим перед проектировщиками ставятся задачи выбора специальной конфигурации летательных аппаратов и формы его основных несущих элементов.

Например, для улучшения эксплуатационных характеристик аппаратов некоторых компоновочных схем важно, например, спроектировать крыло с максимальным градиентом подъемной силы по отстоянию. Увеличение подъемной силы крыла неизбежно сопровождается ростом его аэродинамического качества, а это приводит к повышению экономичности всего летательного аппарата в целом.



С практической и теоретической точек зрения представляют интерес задачи экстремизации и ряда других аэродинамических коэффициентов.

2. Математический аппарат и проблема проектирования эффективного крыла.

На стадиях предэскизного и эскизного проектирования эффективной несущей поверхности летательного аппарата необходимо решить задачу оптимизации. Методы решения задач оптимизации формы низколетящей несущей поверхности можно разделить на аналитические и численные.

К аналитическим методам решения задач оптимизации геометрии крыла относятся классические методы вариационного исчисления. Характерной особенностью таких задач является то, что они в подавляющем большинстве случаев имеют избыток граничных условий, накладываемых на экстремаль, так, что их число превышает порядок дифференциального уравнения необходимого условия экстремума.

Для гидродинамики низколетящего крыла характерно появление сингулярных возмущений при уменьшении относительного отстояния крыла от границы раздела сред. Одним из принципиальных решений, которое использует конструктивное условие малости отстояния от границы раздела сред, стала квадрупольная теория крыла (КТК), разработанная А.Н. Панченковым в 70-х годах прошлого века [6–14]. Эта теория основывается на предельном вырождении ($h \rightarrow 0$, здесь h – относительное отстояние несущей поверхности от границы) интегральных уравнений теории несущей поверхности вблизи границы раздела сред в дифференциальные. Так как при выводе интегрального уравнения поверхность крыла-следа и их зеркальных отражений заменяются распределенным слоем диполей с вертикальными осями, то при $h \rightarrow 0$, по существу, исследуется результат предельного сближения двух дипольных слоев, т.е. слой особенностей более высокого порядка – квадруполь, распределенных по границе раздела сред. Отсюда и пошло название теории. Квадрупольная теория крыла А.Н. Панченкова предназначена для решений задач, связанных с динамикой крыла на воздушной подушке. Основное ее преимущество заключается в понижении размерности решаемой задачи, и, как следствие, возможность получения простых асимптотических решений в большинстве сложных проблем околоэкранный аэродинамики.

Предельная модель первого приближения КТК оказалась достаточно простой, это обеспечило сравнительную простоту решения экстремальных задач, сформулированных на ее основе. В работах [6–9, 12–16] поставлены и решены задачи об оптимальном распределении циркуляции, об оптимальном удлинении крыла, об оптимальном профиле, о крыле с максимальной подъемной силой и другие. Их отличительной чертой явилась некорректность в том или ином смысле [3, 8, 17].



Теория оптимальной несущей поверхности (ТОНП) была разработана А.Н. Панченковым в 80-х годах прошлого века и предназначена для оптимизации геометрии крыльев летательных аппаратов. Методы ТОНП опираются на теорию потенциала ускорений, квадрупольную теорию крыла, асимптотическое программирование, результаты исследований экстремальных задач теории крыла в ограниченной жидкости. Большинство рассматриваемых в ТОНП проблем посвящено вопросам снижения гидроаэродинамического сопротивления при сохранении полезных свойств несущей системы. Так, геометрия крыла с максимальной подъемной силой была определена Л.В. Аршинским в результате исследований, проведенных с применением асимптотических подходов [1]. Им также были решены задачи о максимуме градиента подъемной силы по отстоянию, задачи о максимуме градиента подъемной силы по крену, задачи о максимуме градиента момента крена по крену. Результаты получены в приближении умеренных возмущений. Достоверность найденных геометрий была обоснована с помощью тестовых сравнений и экспериментальной проверки.

В качестве альтернативного пути решения оптимизационных задач, аналитическое решение которых трудно или невозможно, можно рассмотреть численные методы оптимизации.

3. Метод Релея-Ритца. Применение метода к решению задач оптимизации крыла.

Целью настоящей работы является исследование задач экстремизации ряда различных аэродинамических коэффициентов для улучшения эксплуатационных характеристик летательных аппаратов. Исходная экстремальная задача состоит из двух частей:

- гидродинамической, включающей в себя математическую модель обтекания крыла в первом приближении квадрупольной теории крыла;
- экстремальной, содержащей необходимый функционал и ограничения на допустимые значения вектора параметров оптимизации.

Общая схема численного решения оптимизационных задач заключается в сведении задачи к поиску минимума функции многих переменных.

В основе метода Ритца лежит построение минимизирующей последовательности функций [4]. Например, необходимо найти минимум функционала в классе функций M .

Предположим, что существует конечный инфимум значений функционала и в классе допустимых функций существуют функции, на которых функционал принимает конечные значения. Тогда должна существовать минимизирующая последовательность функций такая, что

Если существует предел этой последовательности,



она и будет решением исходной задачи, так как будет законен предельный переход

Общая идея построения минимизирующей последовательности заключается в том, что сначала необходимо выбрать некоторую систему функций, которую называют базисной:

К базисным функциям выдвигают два требования:

- базисные функции должны принадлежать классу M ;
- любая конечная линейная комбинация этих функций вида $\sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(x)$ при $c_i \in \mathbb{R}$ надлежит тому же классу M .

Для минимизации значения функционала вида

на множестве функций

фиксируется некоторая конечная

система линейно-независимых функций

, которая удовлетворяет однородным краевым

условиям

В итоге, вместо исходной задачи предстоит решить значительно более узкую задачу минимизации функционала на множестве линейных комбинаций

Методом Релея-Ритца были решены три задачи оптимизации геометрии несущей поверхности аппарата, движущегося вблизи радела сред различной плотности:

- определение геометрии крыла, максимизирующего подъемную силу [18];
- определение геометрии крыла с минимальным абсолютным значением коэффициента аэродинамической производной момента тангажа по отстоянию;
- определения геометрии крыла с максимальным значением коэффициента аэродинамической производной подъемной силы по отстоянию при фиксированном значении коэффициента аэродинамической производной момента тангажа по отстоянию.

Все полученные формы профиля нижней поверхности крыла оказались качественно подобны. Их геометрические формы, а также принятая система координат показаны на рисунках 1-4.



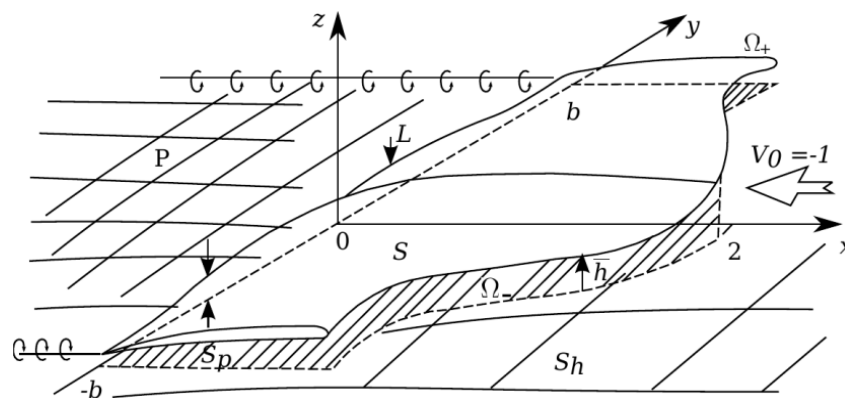


Рис. 1. Принятая система координат

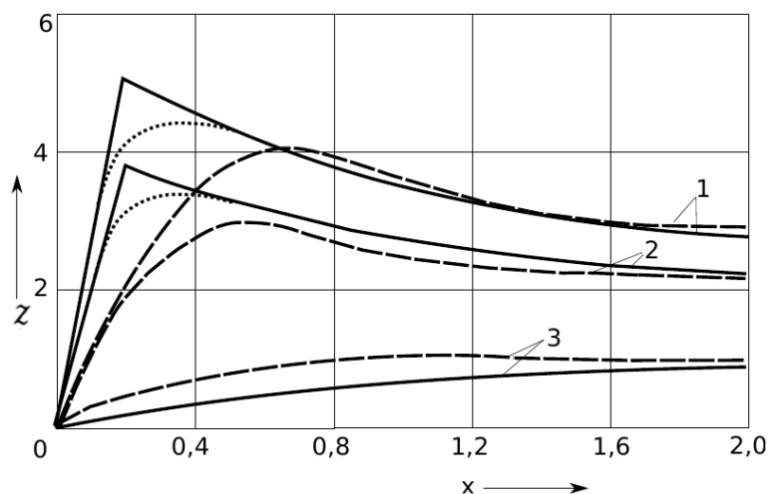


Рис. 2. Форма нижней поверхности крыла с максимальной подъемной силой в сечении $y=0$ (график 1), $y=0,5$ (график 2), $y=1$ (график 3) показана сплошной линией [1]. Точечной линией показан результат наложения ограничения на радиус кривизны поверхности крыла, полученного численно. Пунктирной линией показана поверхность крыла, полученная аналитически.



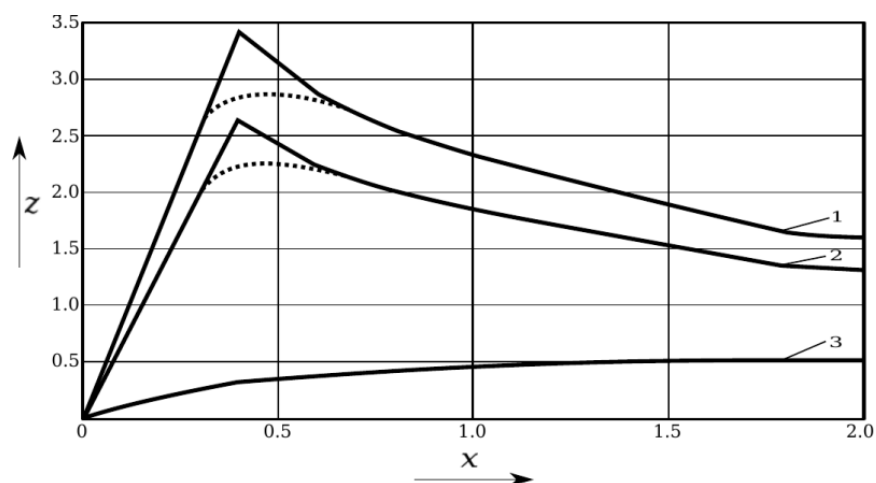


Рис. 3. Форма нижней поверхности крыла, полученного в результате решения задачи оптимизации распределения углов скоса потока по хорде методом Релея-Ритца, в сечении $y=0$ (график 1), $y=0,5$ (график 2), $y=1$ (график 3).

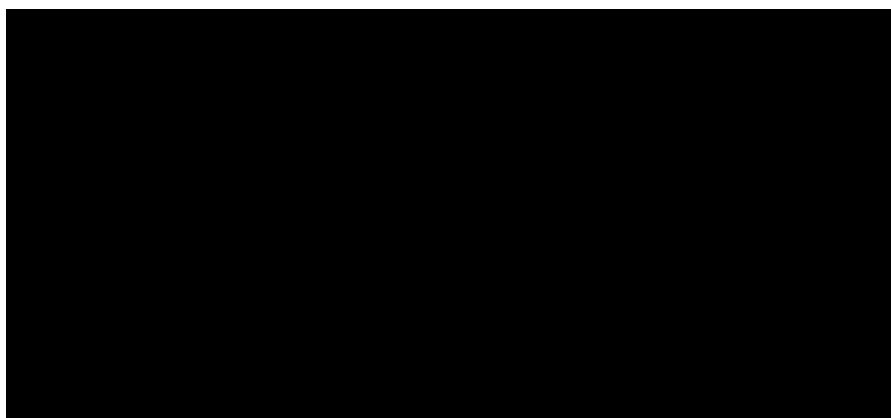


Рис. 4. Форма нижней поверхности крыла с максимальным значением коэффициента аэродинамической производной подъемной силы по отстоянию при фиксированном значении коэффициента аэродинамической производной момента тангажа по отстоянию в сечении $y = 0$ (график 1), $y = 0,5$ (график 2), $y = 1$ (график 3).

Решение задачи определения геометрии крыла, максимизирующего подъемную силу методом Релея-Ритца было выполнено с целью верификации разработанного алгоритма, в



силу того, что, как указывалось выше, эта же задача была решена ранее с применением асимптотических подходов и решение приводится в работе [1]. Экстремаль и геометрия несущей поверхности, полученные с использованием численного алгоритма, оказались почти идентичны экстремали и форме нижней поверхности крыла максимальной подъемной силы, полученной в работе [1].

Для подтверждения эффективности геометрии, полученной с использованием метода Релея-Ритца, был проведен вычислительный эксперимент в программном пакете компании ANSYS, Inc по сравнению некоторых АДХ крыла максимальной подъемной силы и геометрически близкого к нему плоского крыла.

Расчеты проводились в модуле ANSYS Fluent (лицензия №1062872 Иркутского филиала МГТУ ГА). В качестве модели турбулентности использовалась модель двух уравнений $k-\omega$ с опцией Realizable. Эта модель относится к уравнениям Навье-Стокса, осредненным по Рейнольдсу. Расчётная сетка смешанная, состоящая из комбинации тетраэдрических и гексаэдрических элементов (преимущественно тетраэдрической), с локальным сгущением в непосредственной близости к крылу. Исходные данные: удлинение крыла L , отстояние от экрана h .

В процессе эксперимента были получены коэффициенты подъемной силы C_L при различных углах атаки α . По результатам эксперимента построены зависимости C_L на различных углах атаки. Результаты эксперимента с оптимизированным крылом в Конечно-мерном расчетном комплексе ANSYS Fluent оказались аналогичны данным, полученным в ходе натурного эксперимента в аэродинамической трубе разомкнутого типа с закрытой рабочей частью, описанного в работе [1].

Заключение. Алгоритм, основанный на методе Релея-Ритца, может быть использован для оптимального проектирования внешней геометрии несущих комплексов летательных аппаратов, движущихся вблизи границы раздела сред. Такой подход позволит находить решения для задач, аналитическое решение которых трудно или невозможно.

Качественное подобие профилей, полученных в результате решения трех оптимизационных задач, а также совпадение результатов эксперимента, является доказательством того, что именно эта форма крыла является наиболее выигрышной с точки зрения его аэродинамического качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ



1. Аршинский Л.В. Оптимизация геометрии крыла вблизи опорной поверхности: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск. 1990. 190 с.
2. Аршинский Л.В., Борисюк М.Н. Оптимизация несущих поверхностей экранопланов / Панченков А.Н.: физик, математик, инженер / Сб.тр. под общей ред. проф. Данеев А.В. Иркутск. Изд-во ИрГТУ. 2005. С. 292–309.
3. Белецкая С.Б. Оптимизация конструктивных параметров несущих гидродинамических комплексов скоростных судов: дис. канд. техн. наук. Нижний Новгород. 1999. 188 с.
4. Калиткин Н.Н. Численные методы. Москва. Наука. 1978. 512 с.
5. Панченков А.Н., Драчев П.Т., Любимов В.И. Экспертиза экранопланов. Нижний Новгород. Поволжье. 2006. 656 с.
6. Панченков А.Н. Основы квадрупольной теории крыла вблизи твердой границы // Асимптотические методы в теории систем. Иркутск. 1974. С. 68–98.
7. Панченков А.Н. Исследование экстремальных задач квадрупольной теории методами асимптотического программирования // Асимптотические методы в теории систем. Иркутск. 1975. С. 40–57.
8. Панченков А.Н. Экстремальные задачи квадрупольной теории крыла // Асимптотические методы в теории систем. Иркутск. 1978. С. 5–41.
9. Панченков А.Н. Квадрупольная теория крыла // Асимптотические методы в динамике систем. Новосибирск: Наука. 1980. С. 5–116.
10. Панченков А.Н. Некоторые обобщения квадрупольной теории крыла вблизи твердой границы // Асимптотические методы в теории систем. Иркутск. 1980. С. 5–26.
11. Панченков А.Н. Об одном классе некорректных экстремальных задач // Асимптотические методы в механике. Иркутск. 1981. С. 4–38.
12. Панченков А.Н. Асимптотические методы в экстремальных задачах механики. Новосибирск: Наука. 1982. 215 с.
13. Панченков А.Н. Результаты исследования одного класса некорректных экстремальных задач // Асимптотические методы в теории систем. 1982. С. 5–45.
14. Панченков А.Н. Теория оптимальной несущей поверхности. Новосибирск: Наука. 1983. 256 с.
15. Панченков А.Н., Борисюк М.Н. Некоторые результаты численного исследования экстремальных задач квадрупольной теории // Асимптотические методы в механике. Иркутск. 1981. С. 38–57 с.



16. Панченков А.Н., Борисюк М.Н., Янчевский А.М. Задача об оптимальном крыле с постоянной мореходностью // Методы возмущений в механике. Новосибирск: Наука. 1982. С. 29–47.
17. Панченков А.Н. Исследование одного класса некорректных экстремальных задач // Некорректные задачи механики. Новосибирск: Наука. 1984. С. 5–43.
18. Скоробогатова М.В. Применение метода Релея-Ритца для определения формы несущей поверхности крыла Мунка с максимальным коэффициентом подъемной силы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск: ИрГУПС. 2016. №3 (51). С. 203–207.

UDK 629.734/.735, 519.635.4

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE OPTIMAL GEOMETRY OF THE LOWER
SURFACE OF THE LOW-WINGING WING OBTAINED BY THE SOLUTION OF THE
OPTIMIZATION PROBLEM WITH ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS**

Marina V. Skorobogatova

Senior Lecturer of the Department of Natural Science Disciplines "Moscow State Technical
University of Civil Aviation" (Irkutsk branch), 664047 Irkutsk, Communards 3,
e-mail: skorobogatova.mv@if-mstuca.ru

Abstract. In order to improve the operational characteristics of a low-flying aircraft, it is necessary to design a wing that is a bearing surface so adapted to fly at small distances from the interface of media to ensure a high quality of the apparatus as a whole. The configuration of such a wing should deliver, under given constraints, an extremum to the specified aerodynamic coefficient. For this it is necessary to solve the optimization problem. The problems of optimization of the wing geometry are usually solved by classical methods of the calculus of variations, but a characteristic feature of such problems is that in most cases they have an excess of boundary conditions imposed on the extremum, so that their number exceeds the order of the differential equation of the necessary extremum condition. An alternative way to solve optimization problems, the analytical solution of which is difficult or impossible, is to use numerical optimization methods. The purpose of this paper is to study the problems of the extremization of a number of different aerodynamic coefficients to improve the operational characteristics of aircraft.



Keywords. The theory of optimization of the bearing surface, the bearing surface, the lift of the aircraft, aerodynamic coefficients, the Ritz method, the low-flying wing.

References

1. Arshinsky L.V. Optimizaciya geometrii kryla vblizi opornoj poverhnosti: dis. ... kand. fiz.-mat. Nauk [Optimization of geometry covered near a basic surface: Cand. diss. Physical and mathematical sciences]. Irkutsk. 1990. 190 p. (in Russian)
2. Arshinsky L.V., Borisyuk M. N. Optimizaciya nesushhix poverxnostej ekranoplanov [Optimization of the bearing surfaces ekranoplanov] / Panchenkov A.N.: physicist, mathematician, engineer / The collection of works under the general editorship of the prof. Daneev of A.V. Irkutsk: Publishing house of IRGTU. 2005. Pp. 292–309. (in Russian)
3. Beletskaya S.B. Optimizaciya konstruktivnyx parametrov nesushhix gidrodinamicheskix kompleksov skorostnyx sudov: [Optimization of design data of the bearing hydrodynamic complexes of high-speed vessels: The manuscript of the thesis for a degree of Cand.Tech.Sci.: 05.08.01, 05.08.03.] Nizhny Novgorod. 1999. 188 p. (in Russian)
4. Kalitkin N.N. Chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow: Science. 1978. 512 p. (in Russian)
5. Panchenkov A. N., Drachev P.T., Lyubimov V. I. Ekspertiza ekranoplanov [Examination of ekranoplan]. Nizhny Novgorod: The Volga region. 2006. 656 p. (in Russian)
6. Panchenkov A.N. Osnovy kvadropolnoj teorii kryla vblizi tverdoj granicy [Bases of the kvadropolny theory of a wing near firm border] // Asymptotic methods in the theory of systems. Irkutsk. 1974. Pp. 68–98. (in Russian)
7. Panchenkov A.N. Issledovanie ekstremalnyx zadach kvadropolnoj teorii metodami asimptoticheskogo programmirovaniya [A research of extreme tasks of the kvadropolny theory by methods of asymptotic programming] // Asymptotic methods in the theory of systems. Irkutsk. 1975. Pp. 40–57. (in Russian)
8. Panchenkov A. N. Ekstremalnye zadachi kvadropolnoj teorii kryla [Extreme tasks of the kvadropolny theory of a wing] // Asymptotic methods in the theory of systems. – Irkutsk, 1978. Pp. 5–41. (in Russian)
9. Panchenkov of A.N. Kvadropolnaya teoriya kryla [Kvadropolnaya the theory covered]//Asymptotic methods in dynamics of systems. Novosibirsk: Science. 1980. Pp. 5–116. (in Russian)



10. Panchenkov A.N. Nekotorye obobshheniya kvadрупolnoj teorii kryla vblizi tverdoj granicy [Some generalizations of the kvadрупolny theory of a wing near firm border] // Asymptotic methods in the theory of systems. Irkutsk. 1980. Pp. 5–26. (in Russian)
11. Panchenkov A.N. Ob odnom klasse nekorrektnyx ekstremalnyx zadach [About one class of incorrect extreme tasks] // Asymptotic methods in mechanics. Irkutsk. 1981. Pp. 4–38. (in Russian)
12. Panchenkov A.N. Asimptoticheskie metody v ekstremalnyx zadachax mexaniki [Asymptotic methods in extreme problems of mechanics]. Novosibirsk: Science. 1982. 215 p. (in Russian)
13. Panchenkov A.N. Rezultaty issledovaniya odnogo klassa nekorrektnyx ekstremalnyx zadach [Results of a research of one class of incorrect extreme tasks] // Asymptotic methods in the theory of systems. 1982. Pp. 5–45. (in Russian)
14. Panchenkov A.N. Teoriya optimalnoj nesushhej poverxnosti [The theory of the optimum bearing surface]. Novosibirsk: Science. 1983. 256 p. (in Russian)
15. Panchenkov A.N., Borisyuk M.N. Nekotorye rezultaty chislennogo issledovaniya ekstremalnyx zadach kvadрупolnoj teorii [Some results of a numerical research of extreme tasks of the kvadрупolny theory] // Asymptotic methods in mechanics. Irkutsk. 1981. Pp. 38–57. (in Russian)
16. Panchenkov A.N., Borisyuk M.N., Yanchevsky A.M. Zadacha ob optimalnom kryle s postoyannoj morexodnostyu [Zadacha about an optimum wing with constant seaworthiness] // Methods of indignations in mechanics. Novosibirsk: Science. 1982. Pp. 29–47. (in Russian)
17. Panchenkov A.N. Issledovanie odnogo klassa nekorrektnyx ekstremalnyx zadach [Research of one class of incorrect extreme tasks] // Incorrect problems of mechanics. Novosibirsk: Science. 1984. Pp. 5–43. (in Russian)
18. Skorobogatova M.V. Primenenie metoda Releya-Ritca dlya opredeleniya formy nesushhej poverxnosti kryla Munka s maksimalnym koefitsientom podemnoj sily [Application of the Releya-Rittsa method for definition of a form of the bearing surface of a wing of Munch with the maximum coefficient of carrying power] // Modern technologies. System analysis. Modeling. Irkutsk: ИпГУПИС, 2016. № 3 (51). Pp. 203–207. (in Russian)



УДК 519.6

АЛГОРИТМЫ АППРОКСИМАЦИИ И КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ ГЕОМОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ЦУНАМИ

Быков Артем Александрович

Аспирант, Институт космических и информационных технологий Сибирского
федерального университета, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского 26 к. 1,
e-mail: oxymoron13@hotmail.com

Курако Михаил Александрович

Старший преподаватель, Институт космических и информационных технологий
Сибирского федерального университета,
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского 26 к. 1,
e-mail: mkurako@gmail.com

Симонов Константин Васильевич

Д.т.н., профессор, Институт вычислительного моделирования СО РАН,
660036 г. Красноярск, ул. Академгородок 50/44, e-mail: simonovkv@icm.krasn.ru

Аннотация. Исследование посвящено разработке алгоритмического обеспечения для обработки и сравнительного анализа различных моделей оценки параметров источника цунами, которые имеют в своей основе данные геомониторинга процесса подготовки цунамигенного землетрясения для выделенной очаговой области. Адекватная оценка параметров источника цунами от ожидаемого цунамигенного землетрясения и, соответственно, предвычисление распространения цунами обеспечивают предварительную оценку опасности цунами. В рамках информационного обеспечения решения поставленной задачи рассмотрены классические способы оценки параметров источника цунами на основе анализа форшокового процесса, блочно-клавишной и поршневой моделей. Для поиска и анализа вариантов конфигурации и местоположения изучаемого источника предлагаются алгоритмы и методика расчетов, включающая нелинейную регрессию для построения аппроксимационных функций и метод построения упругих сеток для кластеризации пространственных данных.

Ключевые слова: геодинамические модели, аппроксимация, кластеризация, источник цунами, оценка параметров.

Введение. Как известно, одним из ключевых моментов в моделировании, оценке конкретных высот волн вдоль побережья и прогноза цунами в целом являются начальные условия в источнике цунами. Эта проблема даже сегодня не вполне решена в силу малой возможности заблаговременного наблюдения зарождения цунами непосредственно в очаговой области.

Согласно распространенному представлению [5], сеймотектонические цунами вызываются вертикальными смещениями морского дна, происходящими во время подводного землетрясения на больших площадях. На основании сейсмических данных

механизм очагов землетрясений определяется с точностью до двух равновероятных плоскостей, перпендикулярных друг другу. Идентификация одной из плоскостей в качестве истинной требует выбора типа механизма между крутым взбросом и пологим надвигом. Оба основных механизма (пологий надвиг и крутой взброс) создают примерно одинаковые вертикальные смещения дна в эпицентральной области. Рассмотрим классические модели, позволяющие оценивать параметры источника цунами.

1. Поршневая модель. Поршневая модель, основанная на решении уравнений статической теории упругости для однородного полупространства с внутренним распределенным источником дислокационного типа исследована в работах Гусякова [2, 3]. Исходными данными для расчетов начальных смещений в очагах цунами являются положение и параметры пространственного дислокационного источника, моделирующего очаг подводного землетрясения: длина разрыва L , ширина разрыва b , глубина верхнего края разрыва h , угол простира́ния (азимут) разрыва α , угол падения плоскости разрыва β , направление подвижки в плоскости разрыва ϕ , смещение противоположных крыльев разрыва (подвижки) u .

Значения параметров L , b , h , углы α и β выбираются на основе информации, полученной из анализа произошедших ранее землетрясений и по результатам анализа сейсмотектонических особенностей региона, угол простира́ния (азимут) разрыва принимается равным углу простира́ния глубоководной впадины или ориентации береговой линии в районе очага землетрясения. Использование расчетных смещений дна в очаговой области такого типа в качестве аппроксимации очага стало стандартной схемой для построения компьютерных моделей исторических и гипотетических цунами. Такие смещения обычно рассчитываются по формулам, выведенным Окадой [10]. Многочисленные проверки показали полную идентичность результатов расчетов по формулам, полученным в этих работах, при любых наборах параметров модельных очагов.

2. Блочно-клавишная модель. Способ оценки параметров сейсмического очага на основе блочно-клавишной модели возникновения землетрясений в зонах субдукции, позволяющий определять место, время и структуру очага возможного сильнейшего землетрясения, способного генерировать цунами, активно и успешно развивается под руководством Лобковского [4, 9]. Ее суть заключается в следующем: выступ островных дуг состоит из отдельных крупных сегментов, образованных поперечными разломами, проникающими вплоть до кровли пододвигаемой плиты. Эти разломы определяют границы сейсмогенных блоков (клавиш) выступа, представляющих собой более мелкие элементы взаимодействия между нависающей и пододвигаемой плитами.

Ключевым моментом в расчетах генерации волн цунами подводным землетрясением является характер и особенность движения океанского дна в сейсмическом источнике, поскольку батиметрия океанского дна, используемая при расчетах распространения волны в открытом океане, как правило, достаточно хорошо известна. Клавишная модель дает чёткое определение очага землетрясения и позволяет объяснить возможность появления

аномальных волн цунами. Для проведения численного моделирования важно понять, каким образом определяются размеры, направления, и интенсивность этого сейсмического очага.

В тоже время необходимо заметить, что процессы, происходящие в сейсмическом очаге (взброс или сброс), в конечном итоге пересчитываются на вертикальное смещение, что приводит к гидродинамической задаче. Усложнение формы сейсмического очага и увеличение количества блоков-клавиш, позволяет смоделировать непрерывное формирование очага цунами в течение всего сейсмического процесса.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ результатов моделирования на основе описанных выше моделей на примере Японского цунами 2011 г. [7]. В итоге можно сказать, что обе модели дают адекватные результаты при численном моделировании. На глубоководных датчиках DART расчетные фазовые соотношения в волне согласуются с наблюдательными данными (данными датчиков).

Таблица 1. Сравнительный анализ результатов моделирования

Пункты	Координаты пунктов (реальные (NOAA) /расчетные данные)	Реальные данные		Вариант 1		Вариант 2	
		1		2		3	
		Первая волна, м.	Вторая волна, м.	Первая волна, м.	Вторая волна, м.	Первая волна, м.	Вторая волна, м.
DART21419	155,7000 44,5000 155,6959 44,5151	+0,7	-0,2	+0,35	-0,63	+0,75	-0,3
DART21401	152,6000 42,6000 152,6096 42,6131	+0,8	-0,2	+0,90	-0,60	+0,50	-0,3
DART21418	148,7000 38,7000 148,7059 38,7090	+2,0	-1,0	+1,87	-0,88	+1,20	-0,5
DART21413	152,1000 30,5000 152,1091 30,5005	+0,7	-0,2	+0,30	-0,24	+0,40	-0,3

3. Модель на основе анализа форшоков. Еще одним способом оценки параметров источника морских катастрофических волн цунами является методика анализа форшоковой активности процесса подготовки сильного цунамигенного землетрясения для выделенной очаговой области на основе быстрой нелинейной регрессии [6, 8].

Методика предназначена для оперативного синтеза по большим массивам эмпирическим данным аналитических моделей. Синтезируемые аналитические модели приближенно воспроизводят характерные для исходного объекта причинно-следственные связи, в той мере в какой эти связи проявили себя при сборе эмпирических данных. Имея аналитическую модель, можно вместо экспериментов с исходным объектом прибегать к численным экспериментам с моделью.

Процедура оценки основных параметров ожидаемого цунамигенного землетрясения основывается на выявлении в форшоковой последовательности сейсмических событий очаговой области так называемого «прогностического клина». Дополнительной прогностической временной характеристикой в форшоковой последовательности является

появление «энергетического предвестника» – резкого снижения регистрируемого уровня магнитуд за несколько часов до главного толчка. Магнитуда основного землетрясения оценивается по разности значений экстремальных магнитуд в форшоковой последовательности наблюдаемого сейсмического процесса.

В качестве примера рассмотрим результаты анализа пространственно-временного распределения форшоковой последовательности (в период с 2003–2004 гг.) в очаговой области землетрясения 26 декабря 2004 г. в районе Суматры (рис. 1). Сейсмическая катастрофа готовилась 4 года. В конце 2003 г. очаг «сработал» с магнитудой 7.5, а затем наступило «затишье» с активизацией в середине 2003 и 2004 гг. По диаграмме развития форшокового процесса в координатах «магнитуда–время» для сейсмических событий из области 2–8 град. с.ш. с глубинами гипоцентра до 50 км выделяется прогностический клин для оценки времени наступления ожидаемого сильного землетрясения и вероятного цунами (рис. 2). На основе рассмотренной методики анализа данных становится возможным контроль за поведением выделенной очаговой области подготовки сильного землетрясения. Построение соответствующих аппроксимационных функций позволяет автоматизировать исследование изучаемого сейсмического процесса и выделить признаки, имеющие прогностический характер.

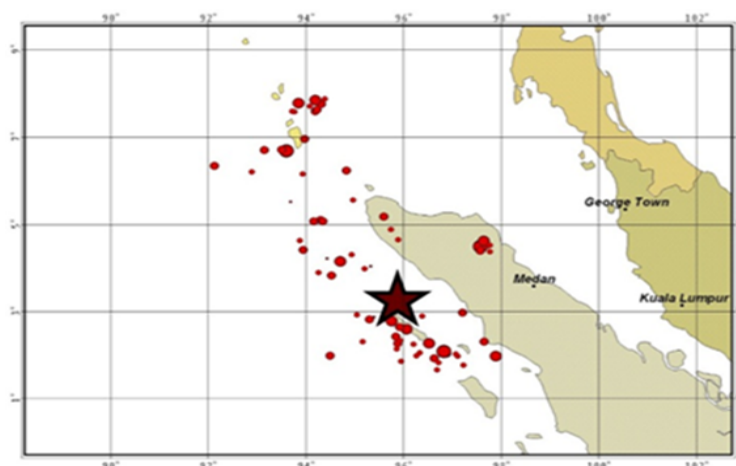


Рис. 1. Область подготовки землетрясения 26 декабря 2004 г., звездой обозначен эпицентр землетрясения, кругами – форшоки

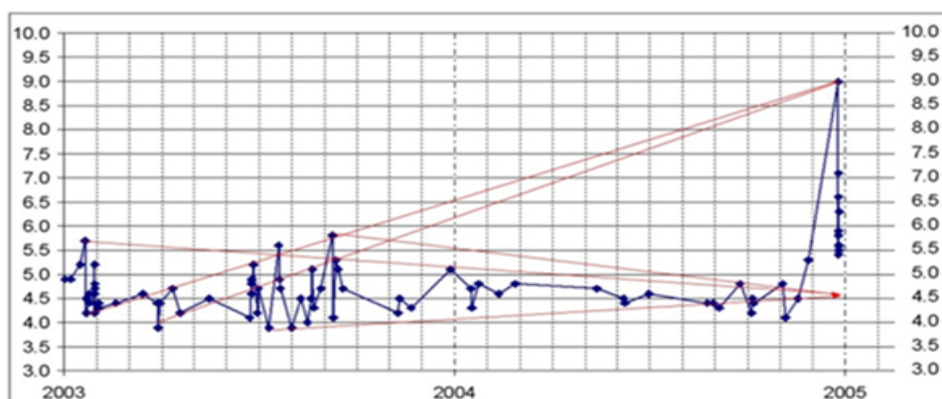


Рис. 2. Выделение «прогностического клина» по форшоковой последовательности очаговой области землетрясения

4. Кластеризация. Следующим способом оценки параметров источника цунами является метод кластеризации пространственных данных геомониторинга очаговой области подготовки сильного цунамигенного землетрясения на основе упругих карт [1]. Для описания карты используется вектор-функция от двух координат x и y , называемых внутренними координатами. Линии, вдоль которых одна из внутренних координат принимает постоянное значение, задают внутреннюю координатную сетку. Сетка должна обладать следующими свойствами: свойством растяжения (обеспечивает равномерность сетки); свойством гладкости; свойством близости к точкам данных. Для этого необходимо в минимизируемый критерий добавить меру суммарного растяжения сетки, меру суммарного изгиба и меру суммарной близости.

Алгоритм построения упругой сетки выглядит следующим образом:

0. Узлы сетки так или иначе располагаются в пространстве данных.

1. При заданных положениях узлов сетки производится разбиение множества данных на таксоны – подмножества

2. При заданном разбиении множества точек данных на таксоны производится минимизация функционала.

Процедуры 1 и 2 повторяются до тех пор, пока функционал не перестанет изменяться в пределах точности. Процесс сходится, поскольку на каждом этапе минимизации значение функционала, очевидно, будет уменьшаться; вместе с тем оно ограничено снизу нулём. Более того, оно сходится за конечное число шагов, так как число вариантов разбиения точек данных на таксоны конечно (хотя и может быть весьма велико).

Рассмотрим применение описанной расчётной схемы к реальным сейсмическим событиям на примере сильнейших землетрясений, произошедших в районе Средних Курил 15 ноября 2006 г. ($M=8.3$) и 13 января 2007 г. ($M=8.1$). На рисунках 3-4 приведена процедура визуализации данных сейсмического мониторинга для очаговых областей в районе Средних Курил в период с сентября 2006 г. по январь 2007 г. Представлен процесс кластеризации форшоков во времени для каждой из изучаемых очаговых зон. Также на рисунке 3 показан пример построения сетки узлов. Каждый узел обозначен зелёным кружком, причём его радиус зависит от суммарной энергии всех землетрясений, попавших в соответствующий таксон. Построение указанных сеток позволяет быстро строить изолинии, то есть каждой точке карты присваивается свой цвет, чем «теплее» цвет, тем выше интенсивность сейсмических событий (рис. 4).

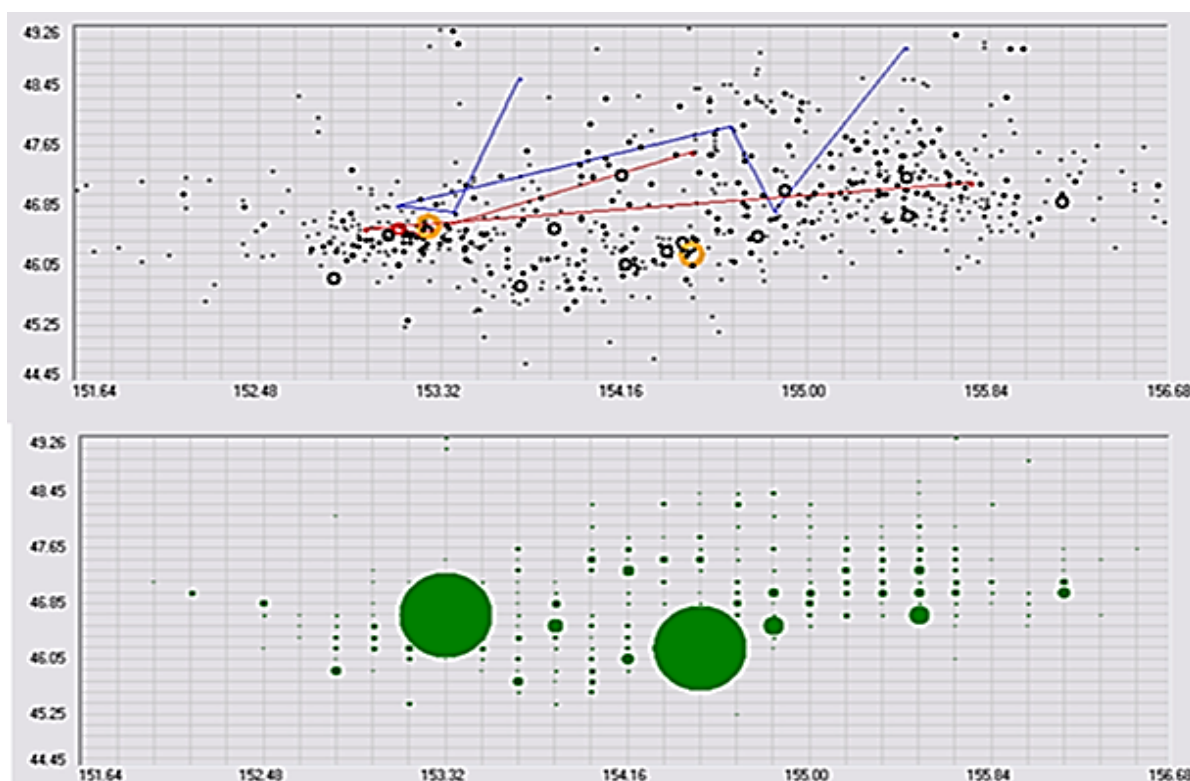


Рис. 3. Наложение точек данных на сетку на примере Средних Курил в период с сентября 2006 г. по апрель 2008 г.

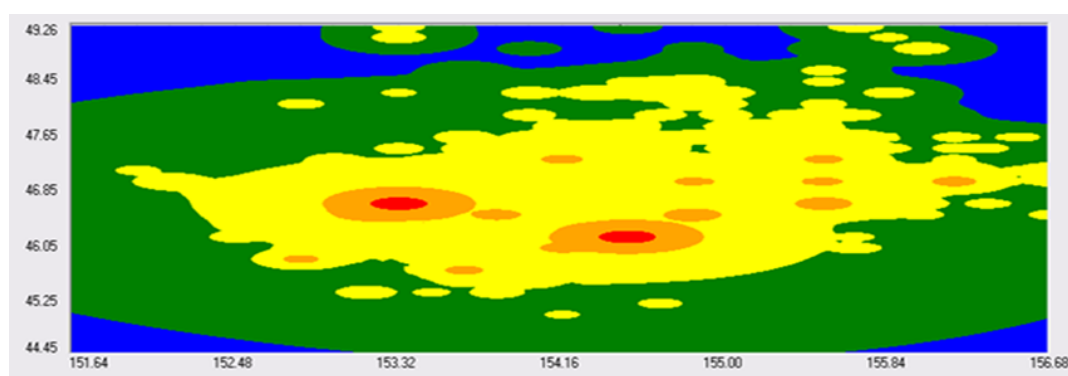


Рис. 4. Построение изолиний на примере анализа данных для очаговой области в Средних Курил в период 09.2006 г. – 04.2008 г.

Заключение. В работе рассмотрены классические способы оценки параметров источника цунами на основе анализа форшокового процесса, блочно-клавишной и поршневой моделей. В рамках исследования предложена методика расчетов, включающие способ построение аппроксимационных функций при помощи нелинейной регрессии и метод построения упругих сеток для кластеризации пространственных данных геомониторинга. Показано, что все вышеперечисленные модели адекватно отражают реальную физическую ситуацию, но для повышения точности конечных результатов для каждой геодинимической модели следует проводить различные модификации с целью обеспечения корректности процесса описания начальных условий в источнике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбань А.Н., Зиновьев А.Ю., Питенко А.А. Визуализация данных методом упругих карт // Информационные технологии. 2000. № 6. С. 26–35.
2. Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений: сб. науч. тр. Новосибирск: ВЦ СО РАН. 1978. С. 23–51.
3. Гусяков В.К., Чубаров Л.Б. Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. Т. 21. № 11. С. 53–64.
4. Лобковский Л.И., Баранов Б.В. Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Доклады АН СССР. 1984. Т. 275. С. 843–847.
5. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами // Л.: Гидрометеиздат. 1981. 342 с.
6. Симонов КВ., Чубаров Л.Б., Перетокин С.А., Щемель А.Л. Нелинейный регрессионный анализ и вейвлет-преобразования данных сейсмического мониторинга // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8. Часть 3. (совм. вып., КазНУ). С. 134–138.
7. Baranova N., Baranov B., Lobkovsky L., Mazova R. New approach to the analysis of strongest earthquake Tohoku 2011 // International Workshop «Mega Earthquakes and Tsunamis in Subduction Zones—Forecasting Approaches and Implications for Hazard Assessment». Rhodes Isl. Greece. 6-8 Oct. 2014. Pp. 23–24.
8. Lavrentiev M.M., jr., Shchemel A.L., Simonov K.V. Inverse Tasks in the Problem Tsunami: Nonlinear Regression with Inaccurate Input Data // The First Intern. Conf. «Inverse Problem: Modeling and Simulation» (on July 14-21, 2002 at Fethiye). Abstracts. Turkey. 2002. Pp. 111–112.
9. Lobkovsky L.I., Kerchman V.I., Baranov B.V., Pristavakina E.I. Analysis of seismotectonic processes in subduction zones from the standpoint of a keyboard model of great earthquakes // Tectonophysics. 1991. Vol. 199. Pp. 211–236.
10. Okada, Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seismol. Soc. Am. 1992. Vol. 82. Pp. 1018–1040.

/

UDK 519.6

GEOMONITORING DATA APPROXIMATION AND CLUSTERING ALGORITHMS FOR TSUNAMI SOURCE PARAMETERS ESTIMATION

Artem A. Bykov

Graduate student, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University
26 block 1, Akademika Kirenskogo Str, 660074, Krasnoyarsk, Russia,
e-mail: oxymoron13@hotmail.com

Mikhail A. Kurako

Senior lecturer, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University
26 block 1, Akademika Kirenskogo Str, 660074, Krasnoyarsk, Russia,

Abstract. The study is devoted to the development of algorithmic support for the data processing and comparative analysis of various models of tsunami source parameter estimation, which are based on the geomonitoring data of the tsunamigenic earthquake preparation for the selected source area. An adequate assessment of the tsunami source parameters from the expected tsunamigenic earthquake and, accordingly, the precomputation of tsunami distribution provide a preliminary assessment of the tsunami hazard. Within the information support framework for the solution of the problem, classical methods for tsunami source parameters estimation are analyzed, based on foreshock process analysis, block-key and piston source models. For the search and analysis of configuration options and the location of the source, algorithms and calculation techniques are proposed, including nonlinear regression for constructing approximation functions and a method for constructing elastic grids for clustering spatial data.

Keywords: geodynamic models, approximation, clustering, tsunami source, parameters estimation.

References

1. Gorban A.N., Zinovyev A.Ju. Pitenko A.A. Vizualizatsiya dannyh metodom uprugih kart [Data visualisation by the elastic maps method] // Informatcionnye tehnologii = Information technologies. 2000. № 6. Pp. 26–35 (in Russian)
2. Gusakov V.K. Ostatochnye smeshcheniya poverhnosti uprugogo poluprostranstva [Residual displacements of the elastic semispace] // Uslovno-korrektnye zadachi matematicheskoy fiziki v interpretacii geofizicheskikh nabljudeniy: Trudy = Conditionally-correct problems of mathematical physics in the interpretation of geophysical observations: Proceedings. Novosibirsk: VC SO RAN = Computing Center of the SB RAS. 1978. Pp. 23–51 (in Russian)
3. Gusakov V.K., Chubarov L.B. Chislennoe modelirovanie vozbuzhdeniya i rasprostraneniya tsunami v pribrezhnoy zone [Numerical simulation of tsunami excitation and propagation in the coastal zone] // Izvestija AN SSSR. Fizika Zemli = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth. 1987. № 11. Pp. 53–64 (in Russian)
4. Lobkovsky L.I., Baranov B.V. Klavishnaya model silnykh zemletryaseniy v ostrovnnykh dugah i aktivnykh kontinentalnykh okrainah [The key model of strong earthquakes in island arcs and active continental peripheries] // Doklady SA USSR = Reports of the USSR Academy of Sciences. 1984. Pp. 843–847 (in Russian)
5. Murty T.S. Sejsmicheskie morskije volny cunami [Seismic sea waves: tsunamis] // St.P. Hydrometeoizdat. 1981. 342 p. (in Russian)

6. Simonov K.V., Chubarov L.B., Peretokin S.A., Schemel A.L. Nelineynyi regressionnyi analiz b veivlet-preobrazovanie dannyh seismicheskogo monitoring [Nonlinear regression analysis and wavelet transform of seismic monitoring data] // Vychislitelnye tehnologii = Computational Technologies. 2003. V. 8. Vol. 3. Pp. 134–138 (in Russian)
7. Baranova N., Baranov B., Lobkovsky L., Mazova R. New approach to the analysis of strongest earthquake Tohoku 2011 // International Workshop «Mega Earthquakes and Tsunamis in Subduction Zones–Forecasting Approaches and Implications for Hazard Assessment», Rhodes Isl., Greece, 6-8 Oct. 2014. Pp. 23–24.
8. Lavrentiev, M.M., jr. Inverse Tasks in the Problem Tsunami: Nonlinear Regression with Inaccurate Input Data / M.M. Lavrentiev, jr., A.L. Shchemel, K.V. Simonov // The First Intern. Conf. «Inverse Problem: Modeling and Simulation» (on July 14-21, 2002 at Fethiye). Abstracts. Turkey. 2002. Pp. 111–112.
9. Lobkovsky L.I., Kerchman V.I., Baranov B.V., Pristavakina E.I. Analysis of seismotectonic processes in subduction zones from the standpoint of a keyboard model of great earthquakes // Tectonophysics. 1991. Vol. 199. Pp. 211–236.
10. Okada, Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seismol. Soc. Am. 1992. Vol. 82. Pp. 1018–1040.

УДК 519.23

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПО
КОМПЛЕКСУ РАЗНОТИПНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

Гвоздев Владимир Ефимович

Д.т.н., профессор, зав. кафедрой Технической кибернетики, e-mail: wega55@mail.ru

Христодуло Ольга Игоревна

Д.т.н., профессор, зав. кафедрой Геоинформационных систем,
e-mail: o-hristodulo@mail.ru

Блинова Дарья Викторовна

К.т.н., доцент кафедры Технической кибернетики, e-mail: blinova.darya@gmail.com

Набиева Айгуль Азаматовна

Магистрант,

Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет,
450007, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

Аннотация. Необходимым условием управления состоянием территориальных систем является учет того, что любая геотехническая система является уникальной. Уникальность систем приводит к тому, что территории описываются различными наборами как измерительных, так и экспертных характеристик. Управление состоянием территориальных систем на стратегическом и тактическом уровнях обуславливают выделение в качестве самостоятельной задачи разработку методов сравнительного анализа и сопоставления уникальных территорий. В настоящей работе рассматривается подход к формированию безразмерного интегрального показателя состояния, что делает возможным сравнительный анализ уникальных геотехнических систем. В основе данного подхода лежит системное сочетание метода идеальной точки, статистических индексов и балльных шкал, конструируемых как для измерительных, так и для экспертных данных. Описаны основные принципы построения балльных шкал, реализация которых позволяет строить балльные шкалы для параметров различного масштаба и единиц измерения, что делает возможным сопоставление различных территорий. В качестве примера приводятся результаты комплексного анализа состояния пожарной безопасности районов Республики Башкортостан.

Ключевые слова: территориальная система, статистический индекс, метод идеальной точки

Введение. Урбанизированная территориальная система (ТС) является сложным геотехническим объектом, обладающим уникальным сочетанием природной и техногенной составляющей [7]. Уникальность сочетания природных и техногенных составляющих приводит к тому, что различные ТС характеризуются разным набором показателей состояния. Исследование состояния территориальных систем – задача важная и актуальная, позволяющая анализировать влияние различных факторов и своевременно осуществлять необходимые возможные меры по их изменению. Одним из важнейших принципов управления территориальными системами является принцип комплексности, согласно которому управление должно осуществляться с учетом единства компонентов системы [2]. Согласно [5], необходимо постоянно повышать результативность и эффективность управления для достижения поставленных целей. Вместе с тем, для повышения обоснованности принятия управленческих решений, направленных на обеспечение безопасности (техногенного, природного, социального характера) территориальных систем в условиях ограниченности ресурсов, необходимо разрабатывать показатели состояния, позволяющие комплексно оценить состояние ТС и обеспечить сопоставимость данных, полученных различным способом (измерительных и экспертных) и имеющих различную размерность. Методической основой решения этой задачи является формирование интегральных характеристик состояния.

Целью настоящей работы является разработка метода, позволяющего выполнить сравнительный анализ состояния ТС по комплексу различных по единицам измерения признаков.

1. Анализ состояния ТС на основе концепции формирования обобщенных параметров. Каждая территориальная система является уникальным объектом со своим набором характеристик и своим набором проблемных ситуаций, но для решения различных задач управления, связанных с реализацией принципа комплексности, необходимо сравнивать ТС и интегрально оценивать их состояние. Одним из способов сравнения систем с различными наборами характеристических признаков является использование нормированных показателей, позволяющих привести значения признаков к безразмерному виду.

Территориальная система ограничена в пространстве и включает в себя объекты как природного, так и технического характера. Ей может быть поставлена в соответствие

информационная модель, элементами которой являются соответствующие определенному моменту времени характеристические показатели: .

Для того, чтобы получить комплексную оценку состояния ТС по совокупности параметров состояния, имеющих различную размерность, необходимо выполнить преобразование вида:

где A – оператор формирования обобщенной характеристики состояния на основе признаков, имеющих различную размерность;

$Q(t)$ – комплексный безразмерный показатель, характеризующий состояние ТС

Одним из методов, позволяющих произвести переход от размерных к безразмерным величинам, является использование балльных шкал [1, 8]. Основополагающие принципы построения балльных шкал:

1. Реализуемость.
2. Сопоставимость признаков, имеющих различную размерность.
3. Простота практического использования.

Реализация первого принципа предполагает, что для всех ТС, для которых i -й признак относится к категории характеристических, выбираются максимум и минимум фактически имеющих место на аналогичных территориях значений параметров. Ориентация на фактически достигнутые результаты является основанием обеспечения их достижимости. Значения балльных показателей, соответствующих исследуемой территории, рассчитываются на основе максимального и минимального значений показателей, соответствующих аналогичным территориям.

Реализация второго принципа заключается в формировании шкал с одинаковым числом классов для разных характеристических признаков, что обеспечивает сопоставимость степени влияния различных характеристических параметров на $Q(t)$.

В основе реализации третьего принципа заложено то, что в условиях неопределенности, обусловленной недостатком измерительных данных, следует использовать простые в применении методы. Эти методы должны быть простыми и понятными в освоении специалистам различных предметных областей, не имеющим глубокой подготовки в области обработки измерительных данных.

Территориальная система является слабоструктурированной системой, это приводит к тому, что оценка ее состояния с использованием только лишь измерительных данных не представляется возможной, значительную роль играет качественное оценивание значений признаков на основе мнений экспертов. В связи с этим необходимо разработать процедуру, позволяющую представить в виде балльных оценок субъективные оценки различных

экспертов, что обеспечивает возможность совместного использования результатов как мягких, так и жестких измерений [4].

В качестве одного из средств визуализации результатов анализа состояния ТС с использованием балльной шкалы можно использовать радарные диаграммы. На рис. 1 приведен пример сравнительного анализа состояния территорий некоторых районов Республики Башкортостан по различным признакам, связанным с пожарами на территории рассматриваемых объектов по данным двух лет. Для всех характеристик была задана 10-балльная шкала и по ней оценены значения параметров. Балл ассоциируется с порядковым номером интервала шкалы.

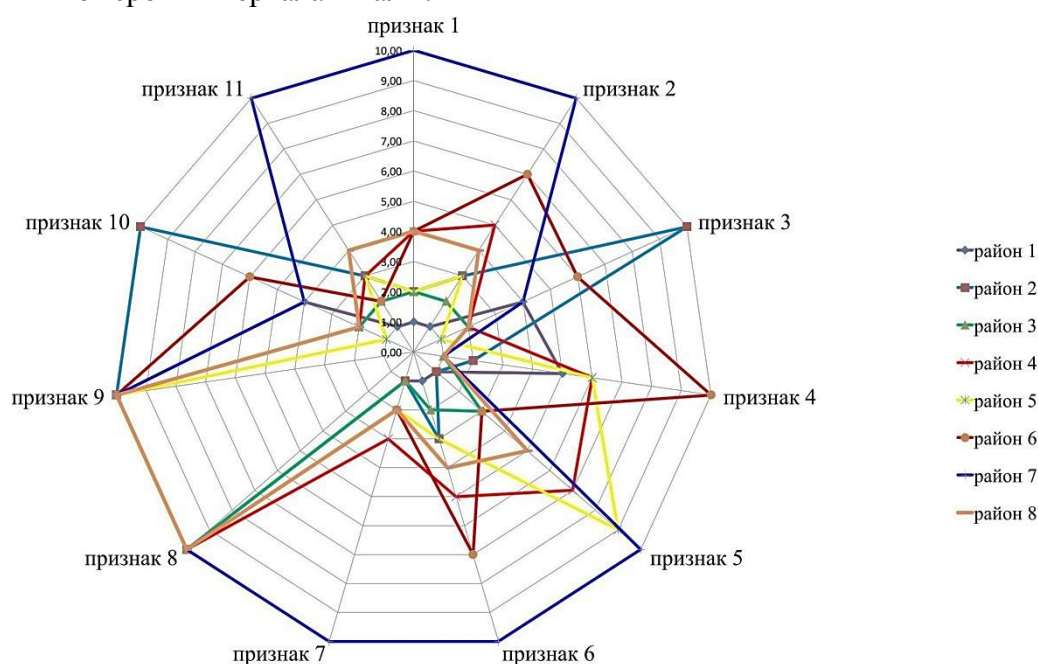


Рис. 1. Радарная диаграмма, отражающая состояние территорий по различным признакам на основе балльной шкалы

Использование радарных диаграмм позволяет наглядно отобразить состояние исследуемых территорий.

2. Комплексный анализ состояния ТС. После того, как произведен переход к безразмерным величинам, характеризующим состояние системы, можно проводить сравнение систем между собой по отдельным признакам, а также выполнять комплексный анализ состояния систем.

Для решения управленческих задач, связанных с целенаправленным изменением состояния ТС, важное значение имеет задача моделирования состояния ТС. Кроме анализа текущего состояния системы, часто требуется оценить, насколько состояние системы далеко от целевого состояния.

При решении данной задачи возможно использовать разновидность метода «идеальной точки», хорошо зарекомендовавший себя при решении экономических задач. Суть метода заключается в том, что для рассматриваемого класса территорий по всем параметрам оцениваются наилучшие значения характеристик, после чего формируется «идеальный» объект с этими характеристиками и каждый участок ТС сравнивается с «идеалом». Набор параметров, участвующих в анализе состояния, предопределен заранее и обусловлен правовой системой сбора данных. Класс территорий выделяется в зависимости от целей решаемых задач: например, классы «города», «районы», «лесничества». Предлагаемый подход обеспечивает реализацию базового свойства целей – достижимости [6].

Существуют разные способы получения комплексной оценки объекта по набору характеристических признаков, зависящих от объема и достоверности исходных данных, целей исследования, способов получения данных. Формирование нормированных показателей сводится к использованию аппарата статистических индексов, позволяющего для каждого класса ТС определить свою схему свертки.

Использование статистических индексов позволяет:

- а) обеспечить сопоставимость и сцепление данных одной размерности, но получаемых в разных условиях;
- б) сравнивать изменчивость данных разных размерностей при изменении условий регистрации данных;
- в) конструировать на основе совокупности данных разных размерностей интегрального показателя состояния объекта.

Использование данного подхода обеспечивает реализацию второго базового требования к цели – измеримости.

В данной работе для комплексной оценки состояния ТС предлагается использовать свертку, основанную на евклидовой метрике:

(1)

где – значение k -го признака в баллах в соответствии с балльной шкалой;

– наилучшее (наихудшее) значение признака в баллах;

n – количество рассматриваемых признаков.

Получение измерительных данных – сложная, затратная задача. Для объективной оценки состояния территории необходимо использовать минимально-достаточное количество характеристических признаков. Если оценка характеристики определяется по нескольким признакам, то выбирается тот, который требует минимальных финансовых, временных и других затрат. Реализация этого принципа обеспечивает получение набора независимых характеристик.

Для рассмотренного на рис 1 примера оценивается влияние негативных факторов, поэтому наилучшее значение признаков принимается равным нулю, наихудшее – десяти. Следовательно, для данного случая выражение (1) преобразуется к виду:

Состояние территории, значение комплексной характеристики которой минимально, оценивается как наилучшее среди рассматриваемых, а состояние территории с наибольшим значением – как наихудшее.

На рис. 2 приведен пример классификации территории Республики Башкортостан по комплексу характеристик состояния на основе использования балльной шкалы.

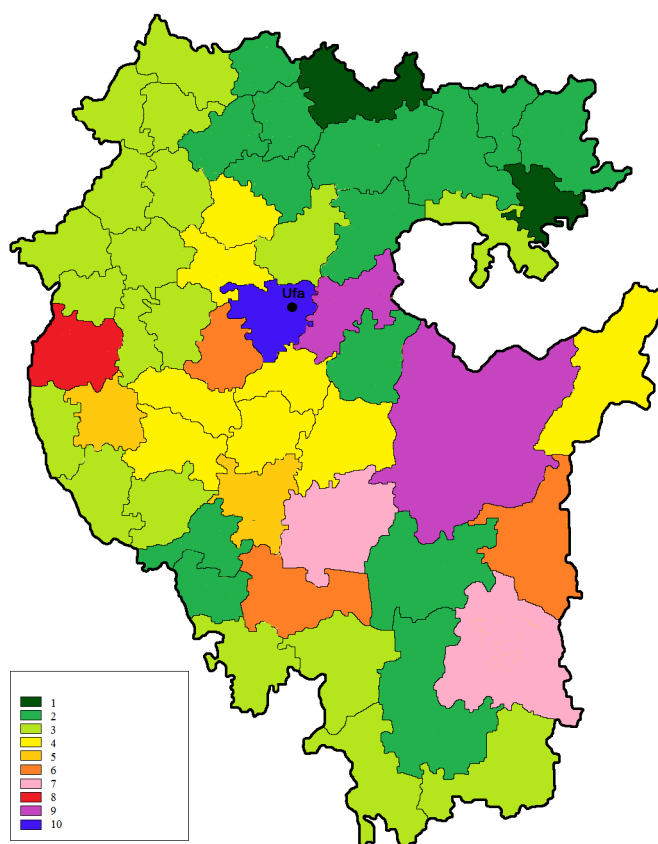


Рис. 2. Классификация районов РБ по комплексу признаков

Использование ГИС-технологий создает платформу для разноаспектного анализа измерительных данных на единой топологической основе [3, 9].

Заключение. В настоящей работе предложен метод комплексного анализа состояния территориальных систем по набору разнотипных показателей. Основу метода составляет системное сочетание методов «идеальной точки», статистических индексов и балльных шкал, что позволяет получить обобщенный параметр, характеризующий состояние системы по комплексу разнотипных признаков. Описаны основные принципы построения балльных шкал, приводится пример комплексного анализа состояния районов Республики Башкортостан на основе признаков, характеризующих пожарную безопасность территорий.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-1758.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука. 1976. 280 с.
2. Гвоздев В.Е., Гузаиров М.Б., Ильясов Б.Г., Колоденкова А.Е. Статистическое исследование территориальных систем: монография. М.: Машиностроение. 2008. 187 с.
3. Гвоздев В.Е., Семененко Д.В. Информационная поддержка анализа состояния территориальных систем по разнотипным признакам // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 12. № 1. С. 9–16.
4. Горский В.Г., Орлов А.И., Гриценко А.А. Метод согласования кластеризованных ранжировок // Автоматика и телемеханика. 2000. № 3. С. 159–167
5. ГОСТ Р ИСО 9004 – 2010. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества. Введ. 2010-11-23. М.: Стандартиформ. 2011. 41 с.
6. Каплан Р., Нортон Д. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию. М.: Олимп-Бизнес. 2006. 304 с.
7. Реймерс Н.Ф. Природопользование: словарь-справочник. М.: Мысль. 1990. 637 с.
8. Салтыков С.А. Экспериментальное сопоставление методов взвешенной суммы, теории полезности и теории важности критериев для решения многокритериальных задач с балльными критериями // Управление большими системами. 2010. Выпуск 29. М.: ИПУ РАН. С. 16–41.
9. Христуло О.И. Интеграция и генерализация разнородной территориально распределенной пространственной информации на основе многомерных моделей данных для задач, связанных с управлением природными ресурсами // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15. № 2 (42). С. 39–44.

UDK 519.23

**MODELING OF THE TERRITORIAL SYSTEMS STATE
ON A COMPLEX OF INDICATORS DIFFERENT TYPES**

Vladimir E. Gvozdev

Dr., Professor, Head of Technical Cybernetic Department, e-mail: wega55@mail.ru

Olga I. Khristodulo

Dr., Professor, Head of GIS Department, e-mail: o-hristodulo@mail.ru

Darya V. Blinova

PhD, Assistant professor Of Technical Cybernetic Department,
e-mail: blinova.darya@gmail.com

Aygul A. Nabieva

Student,

Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marks Str., 450007, Ufa, Russia

Abstract. A necessary proviso for managing of the territorial system's condition is the considering of the fact that any geotechnical system is unique. The uniqueness of systems leads to the fact that territories are described by various sets of measurement and expert characteristics. Management of a condition of territorial systems at the strategic and tactical levels determines development of methods of the comparative analysis and comparison of unique territories as an independent task. In this paper is considering the approach to the formation of the dimensionless integral indicator of condition that allows a comparative analysis of the unique geotechnical systems. The basis of this approach is the systemic combination of methods of ideal point, statistical indexes and mark scales, constructed for measuring and for expert data. Described the basic principles of mark scales creation, realization of which allows to build mark scales for parameters of various scale and units of measure that does possible comparison of various territories. As an example, the results of the complex analysis of the fire safety status of the areas of Republic of Bashkortostan are given.

Keywords: complex analysis, territorial system, mark scale, ideal point.

References

1. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij [Planning of an experiment in the search of optimal conditions]. Moscow. Nauka = Science. 1976. 280 p. (in Russian)
2. Gvozdev V.E., Guzairov M.B., Iluasov B.G., Kolodenkova A.E. Statisticheskoe issledovanie territorial'nyh sistem: monografija [Statistical Research of Territorial Systems: Monography]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2008. 187 p. (in Russian)
3. Gvozdev V.E., Semenenko D.V. Informacionnaja podderzhka analiza sostojanija territorial'nyh sistem po raznotipnim priznakam [Information support of state analyses of territorial systems by multi-type signs]. Vestnik UGATU = Bulletin of the USATU. 2009. Vol. 12. № 1. Pp. 9–15. (in Russian)
4. Gorski V.G., Orlov A.I., Gricenko A.A. Metod soglasovanija klasterizovannyh ranzhirovok [The method of matching the clustered rankings]. Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control. 2000. № 3. Pp. 159–167 (in Russian)
5. GOST R ISO 9004 – 2010. Menedzhment dlja dostizhenija ustojchivogo uspeha organizacii. Podhod na osnove menedzhmenta kachestva [ISO 9004 - 2010. Management to achieve sustainable success of the organization. An approach based on quality management]. To come in. 2010-11-23. Moscow: Standartinform. 2011. 41 p. (in Russian)
6. Kaplan R., Norton D. The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action. Harvard Business Review Press. 1996. 336p.
7. Reimers N.F. Prirodopol'zovanie: slovar'-spravochnik [Environmental Management: dictionary]. Moscow. Mysl' = Thought Publ. 1990. 637 p.(in Russian)
8. Saltykov S. A. Experimental'noe sopostavlenie metodov vzveshannoi summi, teorii poleznosti i teorii vazhnosti kriteriev dlja reshenija mnogokriterial'nyh zadach s bal'nimi kriterijami [Experimental comparison of methods of weighted sum, utility theory and criteria importance theory for the solution of multicriterial problems with score criteria] // Upravlenie bolshimi sistemami = Management of Big Systems. 2010. № 29. Pp. 16–41. (in Russian)
9. Khristodulo O.I. Integracija i generalizacija raznorodnoi territorial'no raspredelennoi prostranstvennoi informacii na osnove mnogomernih modelei dannih dlja zadach, svjazannyh s upravleniem prirodnimi resursami [Integration and generalization of heterogeneous geographically distributed spatial information on the basis of multidimensional data model for natural resource management tasks] // Vestnik UGATU = Bulletin of the USATU. 2011. Vol. 15. № 2 (42). Pp. 39–44. (in Russian)

УДК 51-8+793.7

**ПРИМЕНЕНИЕ СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА
ИМИТАЦИОННЫХ ДЕЛОВЫХ ИГР В ОБРАЗОВАНИИ**

Алексеев Александр Олегович

К.э.н., доцент, e-mail: alekseev@cems.pstu.ru

Алексеева Ирина Евгеньевна

К.э.н., доцент, e-mail: alekseeva@cems.pstu.ru

Спирина Варвара Сергеевна

Аспирант, e-mail: spirina@cems.pstu.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

Аннотация. Описана архитектура ситуационного центра имитационных деловых игр Пермского национального исследовательского политехнического университета и возможности его использования в образовательном процессе. Приводятся сведения о серии разработанных авторами деловых имитационных игр «Инвестиции в рынок недвижимости», «Управление коммерческой недвижимостью» и «Управление жилой недвижимостью», используемых как активный метод обучения при подготовке магистров по программам «Технологии управления недвижимостью» и «Риск-менеджмент в строительстве».

Ключевые слова: ситуационный центр, имитационное моделирование, игровое моделирование, деловые игры, обучение, тренинги.

Введение. В Пермском национальном исследовательском политехническом университете при подготовке магистров, обучающихся по программам «Технологии управления недвижимостью» и «Риск-менеджмент в строительстве», используется активный метод обучения – игровое имитационное моделирование с помощью серии деловых имитационных игр «Инвестиции в рынок недвижимости», «Управление коммерческой недвижимостью» и «Управление жилой недвижимостью», основу которых составляют компьютерные симуляторы предметной деятельности выпускников. Обучение проходит в Ситуационном центре имитационных деловых игр, оснащённом уникальным мультимедийным оборудованием и современным специализированным программным обеспечением, часть из которого разработана при участии авторов.



Описание Ситуационного центра имитационных деловых игр. Архитектура Ситуационного центра представлена (рис. 1): видео-стеной, состоящей из 9 жидкокристаллических панелей конфигурацией 3х3 с общим разрешением 5760х3240, размером 360х200 см.; видеосервером; рабочим местом лектора, представленном трибуной со встроенным персональным компьютером, интерактивной проекционной доской и проектором; 12-ю рабочими местами игроков и местом администратора игр (модератора), по два монитора Full HD со встроенными видеокамерами; аудиосистемой; ip-камерами видеонаблюдения. Аудитория Ситуационного центра рассчитана на 12 рабочих мест.

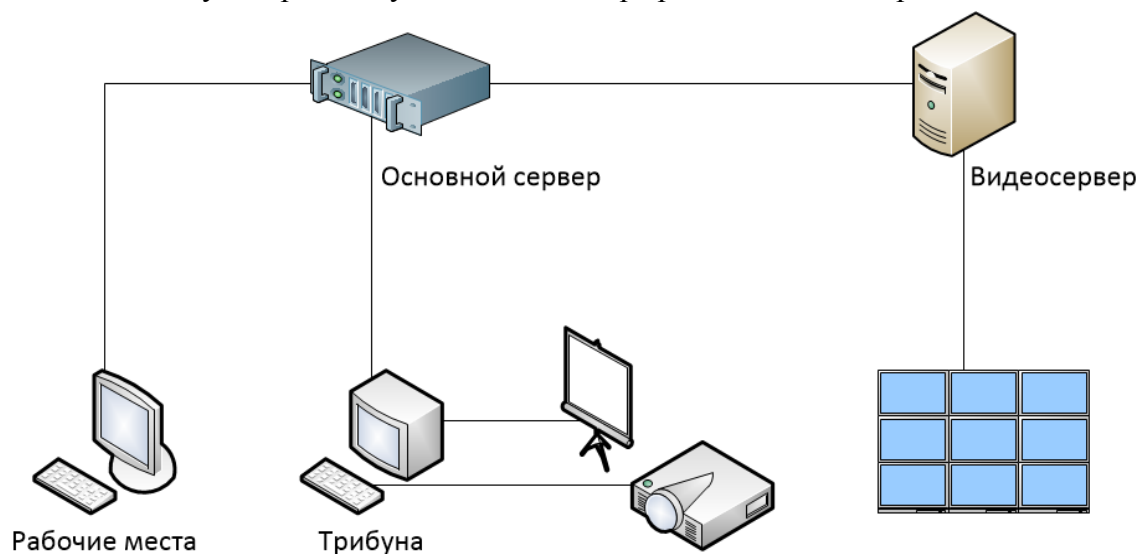


Рис. 1. Архитектура Ситуационного центра имитационных деловых игр ПНИПУ

Несомненными преимуществами имитационных деловых игр являются:

- отсутствие реальных последствий неверно принятых решений;
- возможность создания множества различных сценариев для отработки навыков эффективного поведения обучающихся;
- возможность оценки личностных качеств участников игры;



– заключение о степени сформированности компетенций делается на основе оценки эффективности принимаемых решений во время деловой игры при решении проблемно-практических задач, а не на основе знания терминов, определений и умения решать вычислительные задачи.

Обучающиеся во время деловых игр выполняют профессиональные роли и действуют по определённым правилам с заданными условиями игры целями и критериями их достижения, поэтому имитационные деловые игры при подготовке магистров по программам «Технологии управления недвижимостью» и «Риск-менеджмент в строительстве» используются во время учебной практики (практики по получению первичных умений и навыков профессиональной деятельности).

Общей целью имитационных деловых игр в образовательном процессе является формирование у обучающихся следующих компонентов дисциплинарных компетенций:

знания:

- принципов функционирования предметной деятельности;
- последствий принимаемых управленческих решений в предметной деятельности;

умения:

- анализировать сложившиеся ситуации в предметной области, например, на имитируемом рынке недвижимости;
- предугадывать (прогнозировать) типовое поведение участников предметной деятельности;
- обосновывать и принимать управленческие решения;
- оценивать последствия принимаемых управленческих решений;
- самостоятельно приобретать с помощью компьютерных имитационных деловых игр новые знания и умения о предметной области будущей профессиональной деятельности;
- оценивать результаты экспериментальных исследований, проводимых с участием людей, программных агентов, или в смешанном режиме;

владения:

- следующими методами принятия управленческих решений: интуитивным методом; методом суждений; бинарным методом; многовариантным методом; поисковым методом.

Деловая игра «Инвестиции в рынок недвижимости» [1, 2, 11]. Обучающиеся, участвующие в деловой игре «Инвестиции в рынок недвижимости», выступают в роли инвесторов, заинтересованных в получении индивидуального максимального эффекта (прибыли) от инвестирования денежных средств в рынок недвижимости. Игра проводится в соревновательном режиме. Прибыль используется в качестве критерия, по которому сравниваются достижения обучающихся во время практических занятий.



У каждого обучающегося имеется стартовый капитал, определённый правилами игры, и они могут приобретать любое доступное количество объектов недвижимости различных типов (в базовой версии игры: одна-, двух- и трёх-комнатные квартиры) с привлечением как собственных, так и заёмных средств.

Деловая игра «Управление коммерческой недвижимостью» [8, 9, 12]. Обучающиеся, участвующие в деловой игре «Управление коммерческой недвижимостью», выступают в нескольких ролях:

- управляющий коммерческой недвижимостью;
- арендаторы помещений коммерческой недвижимости.

Данная имитационная деловая игра подразумевает, что в роли управляющего и арендаторов выступают обучающиеся.

Потребители в данной деловой игре реализованы через программных агентов, с заданными правилами поведения.

В базовой версии деловой игры собственник представлен одним лицом, его роль задана в критерии эффективности работы управляющей компании – минимальном размере прибыли от сдачи торговых помещений в аренду.

Для различных потребительских групп отношение к одним и тем же параметрам привлекательности объекта коммерческой недвижимости может отличаться, например, размер паркинга является существенным фактором для потребителей, пользующихся личным автотранспортом, и несущественным для потребителей, пользующихся общественным транспортом. Индивидуальное или коллективное отношение потребителей к объекту коммерческой недвижимости и его параметрам может быть формализовано с помощью механизмов комплексного оценивания, которые будут описывать предпочтения потребительских групп.

Обучающиеся, принимая управленческие решения, должны ориентироваться на то, как их решения повлияют на моделируемое поведение потребителей – программных агентов.

В данной имитационной деловой игре управляющие коммерческой недвижимостью выступают в качестве управляющего субъекта. Арендаторы торговых помещений также являются участниками данной игры и выступают в качестве управляемых субъектов, которые способны активно влиять на управляющий субъект. В теории активных систем [5] и теории управления организационными системами [7] управляющий субъект называется Центром, а управляемые субъекты – активными элементами. Активные элементы обладают активностью и стремятся к достижению собственных целей. Управляющий (Центр) заинтересован в максимизации доходности коммерческой недвижимости, формируемой за счёт арендных платежей и процента от выручки (прибыли) арендаторов. Арендаторы



(активные элементы), в свою очередь, заинтересованы в максимизации своей прибыли, формируемой от продажи своих товаров конечным потребителям. Общим для всех участников игры является заинтересованность в увеличении посещаемости торговых помещений потенциальными покупателями, поскольку увеличение посещаемости теоретически ведёт к увеличению продаж арендатора. Это приводит к увеличению его выручки, что, в конечном счёте, ведёт к увеличению его способности платить большую арендную плату управляющему (Центру).

Обучающийся, выступающий в роли управляющего коммерческой недвижимостью (далее – Игрок-управляющий), может вкладывать деньги в продвижение торгового центра, улучшение эстетической привлекательности и на организацию развлекательных мероприятий для посетителей.

Игроки, выступающие в роли арендаторов (далее – Игроки-арендаторы), могут продавать товары различного качества, менять ассортимент, предлагать скидки, приобретать франшизу на брендовую продукцию, рекламируемую производителем, или вкладывать деньги в продвижение малоизвестного товара.

Игрок-управляющий сообщает информацию об арендной плате игрокам-арендаторам, которые с учётом информации о посещаемости их торговой точки, стремясь максимизировать собственную прибыль, принимают управленческие решения о том, какую продукцию они будут продавать, в каком ассортименте, по какой цене, с какой скидкой, и сколько они будут тратить денег на рекламу торговой точки. Эту информацию игроки-арендаторы сообщают модератору игры. У игрока-управляющего модератор запрашивает информацию о том, сколько он планирует вкладывать денег в продвижение всего торгового центра, в улучшение эстетической привлекательности и на организацию развлекательных мероприятий для посетителей.

Информация об общем количестве ожидаемых посетителей сообщается игроку-управляющему, который с учетом этой информации корректирует или оставляет арендные платежи без изменений. Персонализированная информация о количестве ожидаемых посетителей конкретной торговой точки сообщается каждому игроку-арендатору, с учетом которой они планируют свою коммерческую деятельность на следующий ход.

Целью базовой игры является обучение стратегическому поведению управляющих и арендаторов коммерческой недвижимости в условиях конфликта интересов. Конфликт интересов заключается в том, что повышение (снижение) арендных платежей приводит к росту (снижению) прибыли игрока-управляющего, в то время как арендные платежи относятся к затратной части игроков-арендаторов и рост (снижение) арендных ставок



приводит к уменьшению (увеличению) их прибыли, а это, в свою очередь, означает снижение (увеличение) способности платить аренду. Под стратегическим поведением понимается такое поведение участника данной мультиагентной системы, которое не приводило бы к ухудшению состояния других участников системы.

Деловая игра «Управление жилой недвижимостью» [3]. В имитационной деловой игре «Управление жилой недвижимостью» обучающиеся выступают в роли руководителей управляющих организаций, которые заинтересованы в максимизации персональной прибыли. Данная имитационная деловая игра в её базовой версии является первым приближением к рынку услуг по управлению многоквартирными домами.

Многоквартирный дом представляет собой систему, состоящую из определённого набора элементов: строительные конструкции, инженерные системы, придомовая территория и т.п. Количество многоквартирных домов на рынке считается постоянным и принимается допущение о том, что новые дома не строятся, а существующие дома не признаются аварийными. Новые управляющие организации на рынке не появляются, но существующие управляющие организации могут быть признаны банкротом и исключены из игры. При этом каждый многоквартирный дом за один ход ухудшается по всем элементам в силу износа и устаревания. В базовой версии игры считаем все износы и устаревания устранимыми, т.е. каждый игрок за один цикл игры может принять управленческое решение по улучшению любого элемента многоквартирного дома и управленческое решение игрока может касаться любого количества рассматриваемых в игре элементов многоквартирного дома. Улучшение любого элемента многоквартирного дома имеет определённые затраты и описывается затратными функциями.

Качество работы управляющей организации оценивается по состоянию управляемых многоквартирных домов с помощью механизма комплексного оценивания или некоторого функционала, приводящего информацию о качестве многоквартирных домов к одномерной положительноопределённой действительной шкале. Спрос на услуги управляющей организации прямо пропорционален качеству её работы и тарифу на жилищные услуги, а выручка игрока зависит от количества домов, находящихся в его управлении.

Прибыль управляющей организации составляет определённый правилами игры процент от выручки, и прибыль управляющей организации будем считать функцией полезности игрока. Бюджет управляющей организации на управление многоквартирными домами определяется разницей между выручкой и прибылью, а возможности игрока по улучшению состояния многоквартирного дома ограничиваются имеющимся у него бюджетом.

Целью базовой игры является достижение на рынке стабильности при условии рационального поведения игроков с точки зрения максимизации их функций полезности.



Под стабильностью на рынке понимается, что игроки будут принимать эффективные решения по управлению многоквартирными домами, находящимися в их управлении, что приведёт к ситуации, в которой собственники помещений многоквартирных домов не будут переходить от одной управляющей компании к другой.

Заключение. Практическое использование рассмотренного в статье Ситуационного центра показал, что применение имитационных деловых игр [4, 6, 10] в образовательном процессе является эффективным способом обучения и за сравнительно короткое время позволяет сформировать большинство требуемых компетенций. Отчасти это достигается благодаря наглядности причинно-следственных связей между принимаемыми решениями, действиями обучающихся и результатами их деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.О. Исследование возможности информационного управления поведением участников рынка недвижимости // Управление большими системами (УБС'2015) [Электронный ресурс] : мат. XII Всероссийской школы-конференции молодых ученых, 07-11 сент. 2015 г., Волгоград / под общ. ред. Д.А. Новикова, А.А. Воронина ; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова; Волгоград. гос. ун-т, – электрон. текст. дан. (104 файла: 110 Мб.) М.: ИПУ РАН, 2015. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). С. 157–168.
2. Алексеев А.О., Алексеева И.Е. Имитационное моделирование поведения неоднородных агентов в мультиагентных системах (на примере рынка недвижимости) // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XVII Межд. конф. (22-25 июня 2015 г., Самара, Россия) / под ред.: акад. Е.А. Федосова, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха. Самара: Самар. науч. центр РАН. 2015. С. 287–303.
3. Алексеев А.О., Саламатина А.С. Базовая имитационная деловая игра Конкуренция управляющих организаций на рынке услуг по управлению многоквартирными домами // Прикладная математика и вопросы управления. 2015. № 4. С. 77–86.
4. Баркалов С.А., Бабкин В.Ф, Щепкин А.В. Деловые имитационные игры в организации и управлении: учеб. пособие. М.: Изд-во АСВ. 2003. 200 с.
5. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтег. 1999. 128 с.
6. Деловые игры в принятии управленческих решений: учеб. пособие / В.Н. Бурков, А.Г. Ивановский, А.А. Малевич, А.Н. Немцева. М.: МИСиС. 1986. 106 с.
7. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Московский психолого-социальный институт. 2005. 581 с.



8. Спирина В.С. Имитационная деловая игра «Управление коммерческой недвижимостью» // Управление большими системами (УБС'2015) [Электронный ресурс] : мат. XII Всероссийской школы-конференции молодых ученых, 07-11 сент. 2015 г., Волгоград / под общ. ред. Д.А. Новикова, А.А. Воронина ; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова; Волгоград. гос. ун-т, – электрон. текст. дан. (104 файла: 110 Мб.). М.: ИПУ РАН. 2015. 1°электрон. опт. диск (CD-ROM). С. 320–328.
9. Спирина В.С., Алексеев А.О. Использование имитационной деловой игры «Управление коммерческой недвижимостью» в образовательном процессе [Электронный ресурс] // Прикладная математика, механика и процессы управления: III Всерос. науч.-техн. интернет-конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Пермь, 30 ноября – 5 декабря 2015 г. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. –URL:http://pmmpu.pstu.ru/media/paper_pdf_2015/Тезисы_Спирина_Алексеев_U4eaJxb.pdf
10. Щепкин А.В. Игровое моделирование активных систем // Человеческий фактор в управлении / Под. ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. М.: КомКнига. 2006. С. 475–486.
11. Alexander Alekseev Business simulation game «Investment in the real estate market» // European meeting on game theory (SING11-GTM2015). Collected abstracts of papers presented on the European Meeting on Game Theory / Editors Leon A. Petrosyan and Nikolay A. Zenkevish, July 08-10, 2015, Saint Petersburg, Russia. SPb.: Saint Petersburg State University. 2015. Pp. 175.
12. Spirina V.S. Description of the basic business simulation game “Management of commercial real estate” // Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности: материалы IV Международной научной конференции, г. Пермь, 21 апреля 2015 г. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. 2015.



UDK 51-8+793.7

**THE APPLICATION OF THE IMITATIVE BUSINESS GAMES
SITUATIONAL CENTER IN EDUCATION**

Aleksander O. Alekseev

Candidate of Economics, Associate Professor, e-mail: alekseev@cems.pstu.ru

Irina E. Alekseeva

Candidate of Economics, Associate Professor, e-mail: alekseeva@cems.pstu.ru

Varvara S. Spirina

Postgraduate Student, e-mail: spirina@cems.pstu.ru

Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Komsomolskiy av., 29

Abstract. The architecture of the Business simulation games center describes in this paper. This center founded in Perm National Research Polytechnic University and one use in the educational process. Provides information about the series developed by the authors of the business simulation games "Investments in the Real Estate Market", "Commercial Property Management" and "Residential Property Management" used as an active learning method in the preparation of master programs "Real Estate Property Management Technologies" and "Risk Management in Civil Engineering".

Keywords: situational center, simulation, gaming, business games, education, training.

References

1. Alekseev A.O. Issledovanie vozmozhnosti informatsionnogo upravleniia povedeniem uchastnikov rynka nedvizhimosti [Research of abilities informational control of real estate market participants behavior] // Upravlenie bol'shimi sistemami (UBS'2015): proceeded of XII All-Russian school-conference of young scientists, 07-11 September 2015, Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2015. Pp. 157–168. (in Russian)
2. Alekseev A.O., Alekseeva I.E. Imitatsionnoe modelirovanie povedeniia neodnorodnykh agentov v mul'tiagentnykh sistemakh (na primere rynka nedvizhimosti) [Simulation of heterogeneous agents behavior in multi-agent systems (by example of real estate market)] // Complex Systems: Control and Modeling Problems: proceeded of XVII international conference (22-25 June 2015, Samara, Russia). Samara, Samarskii nauchnyi tsentr rossiiskoi akademii nauk. 2015. Pp. 287–303. (in Russian)



3. Alekseev A.O., Salamatina A.S. Bazovaia imitatsionnaia delovaia igra Konkurentsia upravliaiushchikh organizatsii na rynke uslug po upravleniiu mnogokvartirnymi domami [Basic business simulation game "Competition of management organizations in the market of the management of apartment buildings"] // Prikladnaja matematika i voprosy upravlenija = Applied Mathematics and Control Sciences. 2015. №. 4. Pp. 77–86. (in Russian)
4. Barkalov S.A., Babkin V.F., Shchepkin A.V. Delovye imitatsionnye igry v organizatsii i upravlenii [Business simulation games in arrangement and management]. Moscow, Izdatel'stvo ASV = Publisher of Civil Engineering Universities Association. 2003. 200 p. (in Russian)
5. Burkov V.N., Novikov D.A. Teoriia aktivnykh system. Sostoianie i perspektivy [Theory of active systems. Statement and prospects]. Moscow. Sinteg. 1999. 128 p. (in Russian)
6. Burkov V.H., Ivanovskii A.G., Malevich A.A., Nemtseva A.N. Delovye igry v priniatii upravlencheskikh reshenii [Business games in decision making]. Moscow. MISIS = National University of Science and Technology. 1986. 106 p. (in Russian)
7. Novikov D.A. Teoriia upravleniia organizatsionnymi sistemami [Behavioral control theory]. Moscow. Moskovskij psihologo-social'nyj institut = Moscow psychology-social institute. 2005. 581 p. (in Russian)
8. Spirina V.S. Imitatsionnaia delovaia igra «Upravlenie kommercheskoi nedvizhimost'iu» [Business simulation game “Management of commercial real estate”] // Upravlenie bol'shimi sistemami (UBS'2015) [Elektronnyj resurs]: mat. XII Vserossijskoj shkoly-konferencii molodykh uchenykh, 07-11 sent. 2015 g., Volgograd = Management of large systems (UBS'2015) [Electronic resource]: proceedings XII All-Russian School-Conference of Young Scientists, 07-11 September 2015, Volgograd. Moscow. V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. 2015. Pp. 320–328.
9. Spirina V.S. Opisanie bazovoi imitatsionnoi delovoi igry «Upravlenie kommercheskoi nedvizhimost'iu» [Description of the basic business simulation game “Management of commercial real estate”] // Stroitel'stvo i arkhitektura. Opyt i sovremennye tekhnologii = Construction and architecture. Experience and modern technologies. 2014. №. 4. Available at: <http://sbornikstf.pstu.ru>. (in Russian)
10. Spirina V.S., Alekseev A.O. Ispol'zovaniye imitatsionnoy delovoy igry «Upravleniye kommercheskoy nedvizhimost'yu» v obrazovatel'nom protsesse [Use of the simulation business game "Management of commercial real estate" in the educational process] [Электронный ресурс] // Prikladnaya matematika, mekhanika i protsessy upravleniya: III Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya internet-konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Applied mathematics, mechanics and management processes: III All-Russian scientific and



- technical Internet conference of students, graduate students and young scientists], Perm, November 30 - December 5, 2015. Perm National Research Polytechnic University. 2015. –URL:http://pmmpu.pstu.ru/media/paper_pdf_2015/Тезисы_Спирина_Алексеев_U4eaJxb.pdf
11. Shchepkin A.V. Igrovoe modelirovanie aktivnykh sistem [Game simulation in active systems] // Chelovecheskii faktor v upravlenii [The human factor in management]. Moscow. KomKniga. 2006. Pp. 475-486. (in Russian)
 12. Alexander Alekseev Business simulation game «Investment in the real estate market». European meeting on game theory (SING11-GTM2015). Collected abstracts of papers presented on the European Meeting on Game Theory, July 08-10, 2015, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg. Saint Petersburg State University. 2015. Pp. 175.
 13. Spirina V.S. Description of the basic business simulation game “Management of commercial real estate” // IV international scientific conference “Innovatsionnye protsessy v issledovatel'skoi i obrazovatel'noi deiatel'nosti” 21 April 2015. Perm: proceedings. Perm. Perm National Research Polytechnic University. 2015.



УДК 519.714

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ
ЭВОЛЮЦИОННЫМИ АЛГОРИТМАМИ**

Дивеев Асхат Ибрагимович

Д.т.н., профессор, зав. сектором «Проблем кибернетики»,
Федеральное государственное учреждение Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии наук,
119333 г. Москва, ул. Вавилова 44, Российский университет дружбы народов,
Москва, 117198, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, e-mail: aidiveev@mail.ru

Шмалько Елизавета Юрьевна

К.т.н., старший научный сотрудник,
Федеральное государственное учреждение Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии наук,
119333 г. Москва, ул. Вавилова 44, e-mail: e.shmalko@gmail.com

Рындин Дмитрий Андреевич

Аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования Российский университет дружбы народов
117198, ул. Миклухо-Маклая, д.6, e-mail: dmitri.rnd@mail.ru

Аннотация. Задача оптимального управления для группы роботов содержит в качестве обязательного условия динамические фазовые ограничения. Это вызвано требованием отсутствия столкновений между роботами. В статье рассматривается решение задачи эволюционными численными методами. Приведен пример решения задачи оптимального управления группой из трех роботов с динамическими и статическими фазовыми ограничениями. В качестве сравнения приведено решение той же задачи градиентными методами. Показано, что эволюционные алгоритмы в рассматриваемой технически сложной задаче работают эффективнее.

Ключевые слова: задача оптимального управления, группа роботов, эволюционные методы вычисления, динамические фазовые ограничения, генетический алгоритм.

Введение. Основной подход к построению численных методов решения задачи оптимального управления состоит в преобразовании исходной задачи бесконечномерной

оптимизации к задаче нелинейного программирования в конечномерном пространстве [3]. В большинстве источников по численным методам решения задачи оптимального управления предлагаются различные градиентные методы [3]. Все градиентные методы требуют от целевой функции свойства унимодальности и гладкости. Для сложных задач оптимального управления проверка этих свойств требует дополнительных исследований. Очевидно, что если фазовые ограничения и динамические фазовые ограничения учитываются в качестве штрафа целевой функции, то это должно привести к ухудшению свойств целевой функций с точки зрения гладкости и унимодальности.

Сегодня эффективные вычислительные средства позволяют решать задачи большой размерности, а проблема дискретизации оптимального управления для большинства практических задач не является актуальной. Как показывают вычислительные эксперименты, решения задачи оптимального управления градиентными методами носят неустойчивый характер, зависят от начальной выбранной точки, и результаты решения сильно отличаются в различных экспериментах. Усовершенствование градиентных методов [8] не приводит к существенным преимуществам, хотя эти методы часто предлагаются для решения сложных задач большой размерности, например, обучения нейронных сетей. Появившиеся в конце XX века эволюционные методы, несмотря на экзотические названия, имеют несколько существенных преимуществ перед градиентными методами. Все эволюционные методы осуществляют поиск оптимального решения на основе изменения множества возможных решений. В терминах градиентных методов это соответствует многоточечному поиску. Все эволюционные методы модифицируют элементы множества возможных решений на основе анализа значений целевой функции для всех элементов множества. Эта модификация зависит от метода и определяет эволюцию. Многоточечный поиск, с учетом опыта и значения целевых функций найденных решений, должен находить оптимальные решения эффективнее одноточечного поиска в направлении антиградиента. Дополнительным преимуществом эволюционных методов является отсутствие требований к унимодальности, гладкости целевой функции и выпуклости области поиска.

В настоящей работе мы рассматриваем задачу оптимального управления группой роботов. Трансформируем исходную постановку задачи к задаче нелинейного программирования. Применяем к решению задачи два наиболее популярных эволюционных алгоритма: генетический алгоритм (GA) и метод роя частиц (PSO), а также градиентный метод наискорейшего спуска (FGD) и современный градиентный алгоритм Adam. В численном примере приводим результаты вычислительных экспериментов по сравнению этих методов.

1. Задача оптимального управления группой роботов. Рассмотрим задачу оптимального управления группой роботов. Заданы модели объектов управления

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i), \quad (1)$$

где x_i – вектор состояния робота i , u_i – вектор управления робота i , Ω_i – компактное множество, n_i – количество роботов.

Заданы начальные условия

$$x_i(0) = x_{i0}, \quad (2)$$

Заданы терминальные условия

$$x_i(T) \in \Omega_i, \quad (3)$$

Заданы статические фазовые ограничения

$$x_i \in \Omega_i, \quad (4)$$

Для определения динамических фазовых ограничений введем во множестве номеров роботов i множество пар (i, j) , где $i, j \in \{1, \dots, n\}$.

Тогда динамические фазовые ограничения, определяющие условия сближения пар объектов, заданы как

$$x_i(t) - x_j(t) \in \Omega_{ij}, \quad (5)$$

где N – число сочетаний из n по 2, Ω_{ij} – компактное множество.

Динамические фазовые ограничения (5) обладают свойством векторной коммутативности

Условия столкновения трех и более роботов определяем попарно из условия (5).

Задан функционал качества

,

где определяется выполнением условий (3) или заданным ограничением

(6)

Для реализации численных методов на компьютере включим условия (4) и (5) в функционал в виде штрафных функций и

,

где - функция Хевисайда. Если условие (4) нарушено, то функция Хевисайда равна 1, и значение штрафа будет ненулевым.

,

где - число сочетаний из по 2.

Включим функции штрафа в целевой функционал, получаем

(7)

где и - весовые коэффициенты.

За нарушение терминальных условий также добавляем в функционал терминальную штрафную функцию, как квадратичную норму

.

Тогда расчетный функционал примет вид

(8)

Для численного решения задачи оптимального управления используем общепринятый подход [3] преобразования исходной задачи бесконечномерной оптимизации к конечномерной задаче нелинейного программирования.

Введем временной интервал , и матрицу параметров

,

где , , , - целая часть числа .

Задачу поиска управления заменим на задачу параметрической оптимизации поиска элементов матрицы . Значение управления определяем по значениям параметров матрицы из следующего соотношения

где , , .

При поиске параметров матрицы учитываем ограничения . Поиск осуществляем эволюционными и градиентными алгоритмами конечномерной оптимизации. Компоненты матрицы рассматриваем как компоненты одного вектора

,

где , .

2. Алгоритмы. Для сравнительного анализа используем наиболее популярные градиентные и эволюционные алгоритмы. Среди градиентных методов используем известный метод наискорейшего градиентного спуска [3, 4] и современный градиентный метод Adam [8], предназначенный для обучения искусственных нейронных сетей. Среди эволюционных используем классический генетический алгоритм и наиболее популярный современный эвристический метод роя частиц.

2.1. Генетический алгоритм. Генетический алгоритм был разработан в 80-х годах прошлого столетия [6]. В генетическом алгоритме каждую компоненту вектора параметров кодируем двоичным кодом Грея. Для кодирования используем бит под целую часть числа и бит под дробную часть числа. Всего код одного вектора из

параметров содержит бит. В результате код каждой компоненты вектора параметров определяет положительное число , в диапазоне от 0 до .

В алгоритме первоначально генерируем случайно двоичных кодов из бит. Предполагаем, что сгенерированные коды представляют собой коды Грея

где

Далее вычисляем значения функционалов для каждого кода возможного решения. Для этой цели первоначально переводим код Грея каждого возможного решения

в двоичный код по формуле

Переводим двоичный код в десятичный для каждого бит

Вычисляем значения вектора параметров возможного решения по формуле

Формируем множество оценок целевых функций

В алгоритме выполняем одноточечное скрещивание. Отбираем случайно два кода возможных решений

Вычисляем вероятность скрещивания по формуле

где

Находим случайно точку скрещивания x_{cross} и выполняем скрещивание. Получаем два новых кода возможных решений

Выполняем операцию мутации с заданной величиной вероятности p_m . Для кода нового возможного решения x_1 находим случайно точку мутации x_{mut} и меняем случайно компоненту $x_1[x_{mut}]$. Тоже повторяем для второго нового возможного решения x_2 . Оцениваем новые возможные решения по значению минимизируемого функционала, получаем $f(x_1)$ и $f(x_2)$. Если оценка нового возможного решения лучше наихудшей оценки во множестве возможных решений, то заменяем наихудшее решение на новое возможное решение.

Если $f(x_1) < f(x_{best})$ или $f(x_2) < f(x_{best})$, где x_{best} – лучшее решение, то $x_{best} = x_1$ или $x_{best} = x_2$. После выполнения операций скрещивания алгоритм останавливаем и находим наилучшее возможное решение во множестве.

2.2. Метод роя частиц. Метод роя частиц сегодня является наиболее популярным эволюционным алгоритмом. По утверждению авторов, это первый метод, основанный на имитации социально-поведенческих моделей организованных групп [7]. Авторы метода предложили идею канонического метода роя частиц в 1995 году.

Эволюция множества возможных решений выполняется с учетом наилучших найденных к этому моменту возможных решений во всем множестве и в некотором подмножестве, которое называется подмножеством информаторов.

На подготовительном этапе задаем размер множества возможных решений N , размер подмножества информаторов M , максимальное число итераций K .

Генерируем начальное множество векторов параметров $\{P_1, P_2, \dots, P_M\}$, где $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$.

Задаем начальный вектор P_0 направления изменения векторов параметров:

$$P_0 = (p_{01}, p_{02}, \dots, p_{0n})$$

Эволюционный процесс поиска оптимального решения продолжаем до достижения максимального числа итераций K . На каждой итерации производим вычисление вектора P_i , доставляющего лучшее значение функционала:

$$P_i$$

и вычисление опорного вектора P_{best} , являющегося лучшим среди случайно отобранных векторов P_i :

$$P_{best}$$

где r_1, r_2 – случайные целые числа в диапазоне от 1 до N .

С учётом найденных лучшего P_{best} и опорного P_0 векторов строим новое значение вектора P_i для каждого вектора параметров P_i :

$$P_i = P_0 + r_1(P_{best} - P_0) + r_2(P_i - P_0)$$

где r_1, r_2 – заданные параметры, значение которых подбирают в зависимости от решаемой задачи, $r_1 + r_2 = 1$ и $r_1, r_2 \in [0, 1]$ – случайные величины.

Для каждого вектора параметров P_i вычисляем новый вектор

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} + \mathbf{g}, \quad \mathbf{p} = \mathbf{p} + \mathbf{g},$$

где α – заданный параметр, $\mathbf{p}$ – вектор параметров.

Если $\mathbf{p} = \mathbf{p} + \mathbf{g}$, то $\mathbf{p} = \mathbf{p} + \mathbf{g}$. Завершаем вычисления при выполнении N итераций. Решением считаем вектор с наилучшим значением целевой функции.

2.3. Алгоритм наискорейшего градиентного спуска. Генерируем случайный вектор параметров $\mathbf{p}$. Вычисляем значение оценки для полученного вектора параметров $\mathbf{p}$. Вычисляем вектор градиента целевой функции в точке $\mathbf{p}$.

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} + \mathbf{g},$$

где ϵ – заданная малая положительная величина,

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} + \mathbf{g},$$

Вычисляем значение второго вектора параметров $\mathbf{p}$ в направлении антиградиента

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} + \mathbf{g},$$

где первоначально $N = 1$ – заданное положительное целое число.

Проверяем ограничения для второго вектора параметров $\mathbf{p}$.

Если $\mathbf{p} = \mathbf{p} + \mathbf{g}$, то уменьшаем значение N .

где α – заданное положительное целое число, β – заданное положительное действительное число.

Если $\alpha \geq 1$, то пересчитываем значение второго вектора параметров по формуле (2), иначе завершаем вычисления и считаем решением вектор параметров

Повторяем вычисления и получаем второй вектор параметров

Вычисляем значение целевого функционала для второго вектора параметров

Вычисляем значения векторов в точках золотого сечения

где

Векторы параметров $\mathbf{p}_i$ в точках золотого сечения удовлетворяют ограничениям

Вычисляем значения целевой функции для векторов параметров в точках золотого сечения

Если , то , , , , ,
иначе , , , .

Повторяем вычисления по формулам, пока выполняются условия

При нарушении условия: если $\epsilon > \epsilon_{max}$, то $\epsilon = \epsilon_{max}$, иначе $\epsilon = \epsilon / 2$.
Повторяем вычисления. Всего выполняем все вычисления заданное количество N раз.
Результатом вычислений будет последний вектор параметров θ .

2.4. Алгоритм Adam. Новый градиентный метод Adam [8] предложен в 2015 году и относится к методам 1-го порядка. Концепция метода требует знания только градиента функции, что положительно сказывается на скорости работы алгоритма и используемой памяти.

На начальном этапе генерируем случайный вектор параметров θ и задаем векторы размерностью n и m .

Задаем параметры метода: малые величины β_1 и β_2 , максимальное число итераций N , константы α , ϵ , счетчик итераций i .

Вычисляем градиент целевой функции $\nabla J(\theta)$.

Вычисляем значения векторов m и v по формулам:

$$m_i = \beta_1 m_i + (1 - \beta_1) \nabla J(\theta), \quad v_i = \beta_2 v_i + (1 - \beta_2) \nabla J(\theta)^2,$$

Формируем вектор θ по формуле:

$$\theta = \theta - \alpha \frac{m}{\sqrt{v}}$$

где i – номер текущей итерации.

Вычисляем значение нового вектора параметров: $J(\theta)$. Проверяем выполнение условий $\epsilon < \epsilon_{max}$ и $i < N$:

- если условие $\|x_k - x^*\| \leq \epsilon$ выполнено, то достигнута заданная точность, завершаем вычисления;
- если условие $k \geq K$ выполнено, то достигнуто максимальное число итераций, завершаем вычисления;
- если оба условия не выполнены, то $x_{k+1} = x_k$;

3. Вычислительный эксперимент. Рассмотрим задачу управления тремя мобильными роботами.

Математическая модель объекта управления описывается системой уравнений [5]

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i \\ \dot{\theta}_i = \omega_i \end{cases} \quad i = 1, 2, 3$$

Заданы начальные условия:

Задано статическое фазовое ограничение

$$\theta_i \in [\theta_{i\min}, \theta_{i\max}]$$

где r - радиус ограничения в форме окружности, (x_c, y_c) - координаты центра фазового ограничения.

Динамические ограничения определялись следующим образом

$$\begin{cases} v_i \leq v_{i\max} \\ \omega_i \leq \omega_{i\max} \end{cases}$$

где d_{min} - заданное минимальное расстояние между центрами роботов.

Заданы терминальные состояния роботов

Задан функционал

где

Все алгоритмы отлаживались на задаче квадратичной оптимизации, в которой градиентные методы показали свое существенное преимущество.

При вычислениях использовали следующие значения параметров:

$\alpha = 0.01$, $\beta = 0.01$, $\gamma = 0.01$, $\delta = 0.01$, $\epsilon = 0.01$.

Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице 1. В таблице в первых трех колонках указаны полученные величины наилучшего значения функционала, найденные генетическим алгоритмом (ГА), методом роя частиц (PSO), градиентным методом наискорейшего спуска (FGD) и градиентным методом Adam. В каждой из колонок наилучший результат выделен жирным шрифтом. Справа от каждой колонки указано количество вычислений функционала в процессе поиска. Данная величина определяет сложность алгоритма. Параметры алгоритмов были подобраны таким образом, чтобы количество вычислений функционалов в каждом методе были приблизительно одинаковыми (около 125000). Для алгоритма наискорейшего градиентного спуска первоначально случайно генерировали 5000 возможных решений, лучшее из которых принимали за начальную точку поиска. Метод имел приблизительно 150000 вычислений целевой функции.

Для анализа результатов в нижних строках указаны средние значения по всем экспериментам и среднеквадратичное отклонение.

Табл. 1

№	PSO		GA		FGD		ADAM	
1	3,1563	131138	3,6986	118293	3,5629	156617	3,9594	123602

2	3,0681	131138	3,9005	121507	5,8668	150437	4,0559	123602
3	2,8598	131138	4,1567	121465	4,0058	154510	2,9919	123602
4	2,9205	131138	4,1506	120465	5,0620	156096	6,5275	123602
5	2,9284	131138	4,1677	119175	6,2839	156119	2,9962	123602
6	2,8478	131138	4,2073	121171	3,7669	155729	3,1962	123602
7	3,1115	131138	4,1147	122173	4,9468	156453	2,8213	123602
8	2,9572	131138	3,1251	119195	3,3067	153463	2,8112	123602
9	3,7428	131138	4,2454	121789	3,9756	155387	2,8255	123602
10	2,9352	131138	3,3166	119289	4,1028	156873	2,9346	123602
С р	3,0528	131138	3,9083	120452	4,488	155401	3,512	123602
С К О	0,2501		0,3796		0,9529		1,0954	

Из результатов экспериментов следует, что эволюционный алгоритм роя частиц дал наилучшее среднее и средне квадратичное отклонения значений функционала. Градиентные методы имеют существенно большие величины среднеквадратичного отклонения, что указывает на нецелесообразность их применения для решения данной задачи оптимального управления.

На рис. 1 приведены траектории движения трех роботов на плоскости для одного из полученных оптимальных управлений со значением функционала 2,8112.

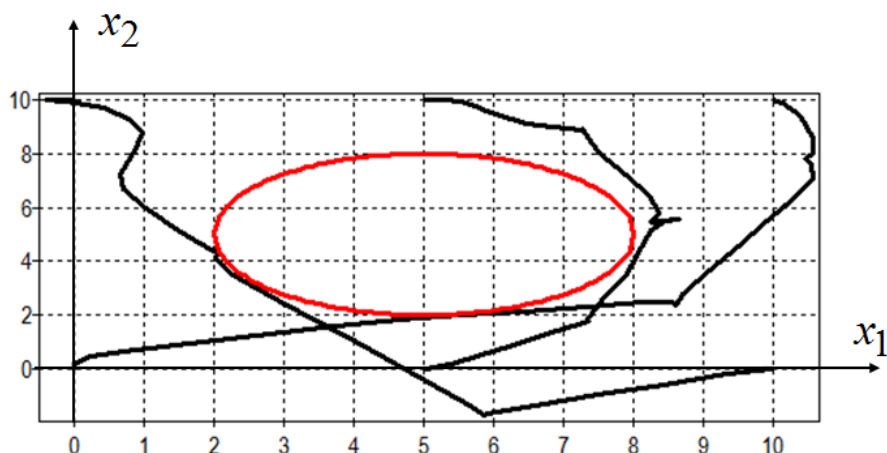


Рис. 1. Оптимальные траектории движения роботов

Заключение. Сформулирована задача оптимального управления группой роботов. В задаче учитываются динамические фазовые ограничения, определяющие условия отсутствия столкновений между роботами. Описаны численные эволюционные и градиентные методы решения задачи оптимального управления. Проведен вычислительный эксперимент решения задачи оптимального управления для трех роботов с одним статическим и тремя динамическими фазовыми ограничениями. Результаты экспериментов показали высокую эффективность использования ЭА для решения задачи оптимального управления группой роботов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 17-08-01203а, 16-29-04224-офи_м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дивеев А.И., Софронова Е.А., Шмалько Е.Ю. Эволюционные численные методы решения задачи синтеза системы управления группой роботов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 3. С. 11–24
2. Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю. Эволюционный алгоритм для численного решения задачи оптимального управления // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. Вып.16. М.: ВЦ РАН. 2014. С. 69–83.
3. Евтушенко Ю.Г. Оптимизация и быстрое автоматическое дифференцирование. М.: ВЦ РАН. 2013. 144 с.

4. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. М.: Высшая школа. 2005. 544 с.
5. Пестерев А.В. Синтез линеаризующего управления в задаче стабилизации движения автомобилеподобного робота вдоль криволинейного пути // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 5. С. 153–165.
6. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley. 1989. 412 pp.
7. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV. 1995. Pp. 1942–1948.
8. Kingma D.P., Ba J. Adam. A Method for Stochastic Optimization // 3rd International Conference for Learning Representations. arXiv:1412.6980v8 [cs.LG]. San Diego. 2015. 15 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980v8.pdf>.

UDK 519.714

**SOLUTION OF OPTIMAL CONTROL PROBLEM FOR GROUP OF ROBOTS BY
EVOLUTIONARY ALGORITHMS**

Askhat I. Diveev

Dr., Professor, Head. Sector «Problems of Cybernetics»,
Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences,
44, Vavilova str., 119333, Moscow, RUDN University,
6, Miklukho-Maklaya str., 117198, Moscow, e-mail: aidiveev@mail.ru

Elizaveta Yu. Shmalko

Ph.D., Senior researcher,
Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences,

44, Vavilova str., 119333, Moscow, e-mail: e.shmalko@gmail.com

Dmitry A. Ryndin

Graduate student,

RUDN University, 6, Miklukho-Maklaya str., 117198, Moscow, e-mail: dmitri.rnd@mail.ru

Abstract. The optimal control problem for a group of robots comprises dynamic phase constraints as compulsory. This is due to the requirement of absence of collisions between robots. In the paper evolutionary computational methods are applied to solve the problem. We considered an example of solving the problem of optimal control for a group of three mobile robots with dynamic and static phase constraints. For comparison, the solution of the same problem is obtained by gradient methods. It is shown that the evolutionary algorithms in the considering technically complex problem are more efficient.

Keywords: optimal control problem, group of robots, evolutionary methods, dynamic phase constraints, genetic algorithms.

References

1. Diveev A.I., Sofronova E.A., Shmalko E.Yu. Evolutsionnye chislennyye metody reshenia zadachi sinteza sistemy upravleniya gruppoy robotov [Evolutionary computational methods to solve problems of control system synthesis for groups of robots] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2016. № 3. Pp. 11–24. (in Russian)
2. Diveev A.I., Shmalko E.Yu. Evolutsionnyi algoritm dlya chislennogo reshenia zadachi optimalnogo upravleniya [Evolutionary algorithm for numerical solution of optimal control problem] // Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti sistem = Questions of safety theory and stability of systems. Publ. CC RAS. Vol. 3. 2014. Pp. 69–83. (in Russian)
3. Evtushenko Yu.G. Optimizatsiya i bystroye avtomaticheskoye differentsirovaniye [Optimization and a fast automatic derivation]. Moscow: CCAS. 2013. 144 p. (in Russian)
4. Panteleev A.V., Letova T.A. Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh [Optimization methods in applications and tasks]. Moscow: Vysshaya shkola = High school. 2005. 544 p. (in Russian)
5. Pesterev A.V. Sintez linearizuyushchego upravleniya v zadache stabilizatsii dvizheniya avtomobilepodobnogo robota vdol' krivolineynogo puti [A Linearizing Feedback for Stabilizing a Car-like Robot Following a Curvilinear Path] // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya

- = Journal of Computer and Systems Sciences International. 2013. № 5. Pp. 819–830. (in Russian)
6. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley. 1989. 412 pp.
 7. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV. 1995. Pp. 1942–1948.
 8. Kingma D.P., Ba J. Adam. A Method for Stochastic Optimization // 3rd International Conference for Learning Representations. arXiv:1412.6980v8 [cs.LG]. San Diego. 2015. 15 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980v8.pdf>.

УДК 004.8, 519.71, 681.5

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ УСТАНОВОК
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

Булатов Юрий Николаевич

К.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет»,
665709, Братск, ул. Макаренко, д. 40, e-mail: bulatovyura@yandex.ru

Крюков Андрей Васильевич

Д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»,
664074, Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15;

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Аннотация. Задача применения интеллектуальных алгоритмов управления в электроэнергетических системах приобретает особую актуальность в связи с развитием концепции интеллектуальных электрических сетей (smart grid), предусматривающей широкое использование активных устройств для регулирования режимов и установок распределённой генерации (РГ). Повысить устойчивость параллельной работы синхронных турбо- и гидрогенераторов установок РГ возможно путем их оснащения автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ).

В работе представлена система адаптивного управления согласованной настройкой АРВ и АРЧВ в различных режимах работы синхронных генераторов установки РГ с использованием генетического алгоритма и нечёткой логики. Кроме того, в применяемой методике используются современные технологии цифровой обработки сигналов: вейвлет-преобразование, дискретное быстрое преобразование Фурье, весовые окна.

На основе моделирования, выполненного в системе MATLAB, показана эффективность использования предлагаемого адаптивного блока управления параметрами АРВ и АРЧВ, заключающаяся в уменьшении времени переходного процесса и перерегулирования напряжения и частоты вращения ротора генератора, а также в обеспечении необходимого запаса устойчивости.

Ключевые слова: распределённая генерация в системах электроснабжения железных дорог, автоматические регуляторы возбуждения и частоты вращения, согласованная настройка, нечеткие алгоритмы.



Введение. В настоящее время особую актуальность приобретает вопрос применения в электроэнергетических системах (ЭЭС) интеллектуальных алгоритмов управления. Это связано с необходимостью создания интеллектуальных электрических сетей (smart grid), предусматривающих широкое использование активных устройств для регулирования режимов и установок распределённой генерации (РГ), в том числе работающих на основе возобновляемых источников энергии. Внедрение этих технологий позволит повысить эффективность управления, живучесть и надёжность систем электроснабжения.

Повысить устойчивость параллельной работы синхронных турбо- и гидрогенераторов установок РГ возможно путем их оснащения автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ). Ввиду относительно небольшой мощности установок РГ и малой постоянной инерции роторов их генераторов особую актуальность приобретает задача согласованной настройки АРВ и АРЧВ [2, 3, 13], заключающейся в определении параметров регуляторов, учитывающих их взаимное влияние и обеспечивающих высокие демпферные свойства при электромеханических переходных процессах, а также требуемый запас устойчивости.

В статье представлено описание системы адаптивного управления согласованной настройкой АРВ и АРЧВ в различных режимах работы синхронного генератора установки РГ; при этом использовались следующие интеллектуальные технологии: генетический алгоритм (ГА) для поиска оптимальных настроек регуляторов [4, 5, 15]; нечёткая логика при адаптивной корректировке настроек АРВ и АРЧВ в различных режимах работы. В применяемой методике согласованной настройки [3] также используются современные технологии цифровой обработки сигналов: вейвлет-преобразование, дискретное быстрое преобразование Фурье, весовые окна. Все это позволяет сформировать базу знаний для адаптивной системы управления установкой РГ.

В настоящее время выполнено большое число исследований по применению интеллектуальных технологий в системах электроснабжения [1, 5 – 7, 10 – 12, 14 – 28]. Ниже представлены методы и алгоритмы, использующие интеллектуальные технологии для управления установками РГ в системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД).

Интеллектуальная система управления настройкой регуляторов установок распределённой генерации. Обеспечить устойчивость параллельной работы установок РГ позволяет их оснащение системами автоматического управления (АРВ и АРЧВ). При оптимальной настройке регуляторов обеспечивается улучшение качества электроэнергии и повышение надёжности электроснабжения потребителей [2, 3]. Для оптимального



управления требуется корректировка настроек АРВ и АРЧВ при существенных изменениях режимов работы установок РГ и СЭЖД. Под такими изменениями понимаются:

- значительные вариации размеров движения поездов, сопровождающиеся существенными изменениями средних уровней напряжения в точках подключения установок РГ;
- большая вариация нагрузки потребителей, приводящая к заметным отклонениям напряжения и частоты в узле присоединения установок РГ;
- подключение установок РГ и их синхронизация с сетью;
- возникновение аварийных режимов в сетях 110-220, 27,5 и 6-10 кВ, непосредственно связанных с тяговыми подстанциями (ТП) железнодорожной магистрали, и последующая реконфигурация топологии этих сетей, вызванная отключениями поврежденных элементов;
- изменение схем питания сетей 6-10 кВ, например, переключение на питание от соседней ТП.

Авторами предлагается адаптивная система, выполняющая описанную выше корректировку, построенная на основе системы нечеткого логического вывода с применением модулей идентификации режима работы и формирования виртуальной модели генератора установки РГ, а также включающая модуль согласованной настройки регуляторов, выполняющий поиск оптимальных коэффициентов АРВ и АРЧВ. На рис. 1 представлена структурная схема предлагаемой адаптивной системы управления настройкой регуляторов установки РГ.

Принцип действия системы заключается в идентификации режима работы генератора установки РГ и коррекции текущих параметров настройки АРВ и АРЧВ при изменении режима работы. Подробная блок-схема fuzzy-регулятора с блоком автонастройки представлена на рис. 2. Входными параметрами fuzzy-регулятора являются текущие значения напряжения, частоты вращения ротора и мощностей генератора установки РГ. Выходными параметрами являются оптимальные для текущего режима коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ.



Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления АРВ и АРЧВ установки РГ:
ДЧ – датчик частоты; ОВ – обмотка возбуждения; СГ – синхронный генератор; Т – турбина;
ТН – трансформатор напряжения

Рис. 2. Блок-схема fuzzy-регулятора с блоком автонастройки

Применяемый блок автонастройки, состоящий из модуля идентификации и моделирования, а также модуля согласованной настройки, позволяет сформировать базу знаний fuzzy-регулятора.



Модуль идентификации и моделирования на основе экспериментальных данных формирует модель замкнутой системы управления установки РГ для текущего режима и передает полученное характеристическое уравнение модулю согласованной настройки. Для этого используется непараметрическая идентификация, в результате которой на базе априорной информации о процессе определяются численные значения комплексного передаточного коэффициента как отношения спектров выходных и входных сигналов [3, 4]. Замкнутая система «турбина-генератор» иллюстрируется схемой, показанной на рис. 3. Характеристический полином рассматриваемой системы определяется по следующему выражению:

$$1 + G(s)W(s) = 0, \quad (1)$$

где E – единичная матрица; $G(s)$ – матричная передаточная функция объекта регулирования (системы «турбина-генератор»), определяемая экспериментально; $W(s)$ – матричная передаточная функция регулятора, учитывающая взаимосвязь АРВ и АРЧВ:

$$W(s) = \begin{bmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) \end{bmatrix}; \quad W_{ij}(s) – \text{комплексный передаточный коэффициент}$$

АРЧВ; $W_{11}(s)$ – комплексный передаточный коэффициент АРВ канала регулирования по частоте; $W_{12}(s)$ – комплексный передаточный коэффициент АРВ канала регулирования по напряжению.

Для передаточных коэффициентов можно записать следующие соотношения:

$$W_{11}(s) = \frac{k_p}{s^2 + k_i s + k_d};$$

$$W_{12}(s) = \frac{k_{0u}}{s^2 + k_{1u}s + k_{0\omega}};$$

$$W_{21}(s) = \frac{k_{0i}}{s^2 + k_{1i}s + k_{0\omega}};$$

где k_p, k_i, k_d – коэффициенты настройки АРЧВ; $k_{0u}, k_{1u}, k_{0\omega}$ и $k_{1\omega}$ – коэффициенты настройки каналов регулирования АРВ.



Рис. 3. Структурная схема системы «турбина-генератор»:

– комплексный передаточный коэффициент турбины; – комплексный передаточный коэффициент возбудителя

Для получения точных передаточных функций при идентификации целесообразно использовать тестовые широкополосные сигналы. Однако вмешательство в процесс эксплуатации систем электроснабжения нежелательно, поэтому предлагается использовать подход, в котором используется выделенный шум регуляторов с применением вейвлет-преобразования [4]. Для использования модуля идентификации и моделирования был разработан интерфейс, вид которого показан на рис. 4.

Частотные характеристики, построенные по полученным таким образом комплексным передаточным коэффициентам, оказываются недостаточно гладкими. Поэтому модуль идентификации и моделирования проводит сглаживание передаточной функции системы на основе применения весовых окон [13]; при этом используется коэффициент сглаживания, определяющий величину, обратную к ширине окна (рис. 4).



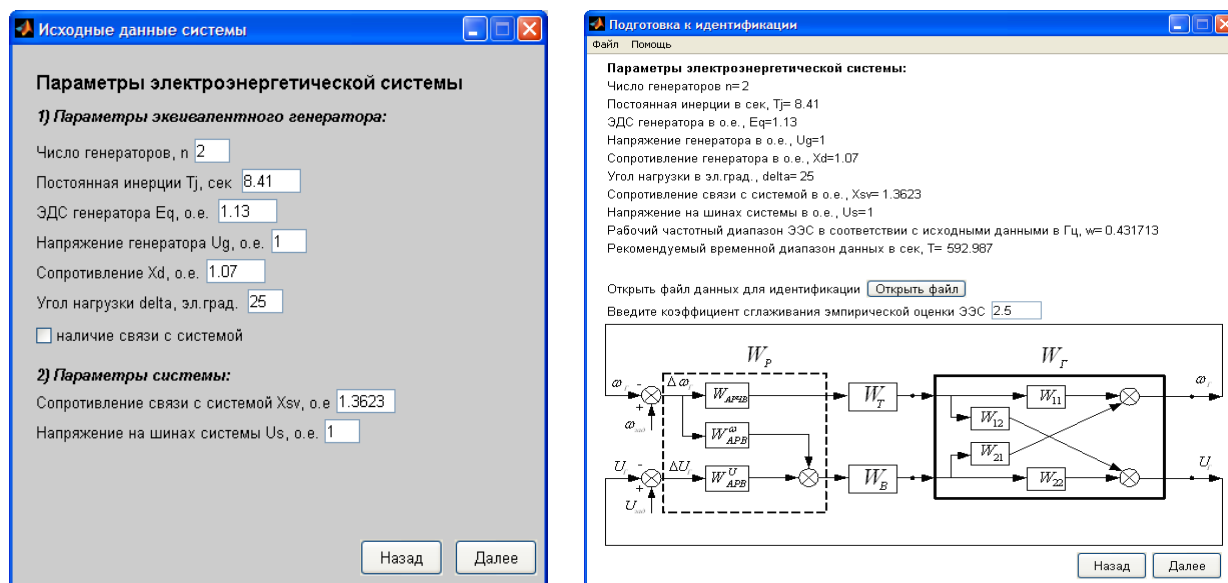


Рис. 4. Интерфейс модуля идентификации и моделирования

Модуль согласованной настройки позволяет определить оптимальные коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ с помощью минимизации критерия качества на основе генетического алгоритма (ГА) [5, 15]:

(2)

где ω – рассогласование между желаемым и модельным наборами коэффициентов характеристических полиномов; ω_{cur} – текущее значение частоты из диапазона $[0; \omega_{max}]$, определяющего «полосу пропускания» системы. В качестве желаемых полиномов могут использоваться полиномы Баттерворта или др.

В связи с тем, что величина рассогласования ω является комплексной, возникают затруднения при минимизации функционала (2). Поэтому целесообразно использовать линейную свертку:

(3)



где μ_1, μ_2 – критерии, отвечающие близости годографов в областях действительных и мнимых значений. Эти критерии формируются так:

$$\mu_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{G_i(\omega)}{G_i(\omega_0)} - 1 \right|, \quad \mu_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{G_i(\omega)}{G_i(\omega_0)} - 1 \right|^2. \quad (4)$$

Модуль согласованной настройки может использовать схему классического ГА или предлагаемого адаптивного ГА, автоматически определяющего исходную популяцию, оптимальные значения вероятности скрещивания и мутации для конкретной задачи. Адаптивный ГА позволяет достаточно быстро и точно решить задачу оптимизации коэффициентов настройки регуляторов установки РГ [5], что является важным качеством при решении задачи в режиме реального времени. Интерфейс модуля согласованной настройки представлен на рис. 5, где также отображается информация о модели объекта в виде частотных характеристик.



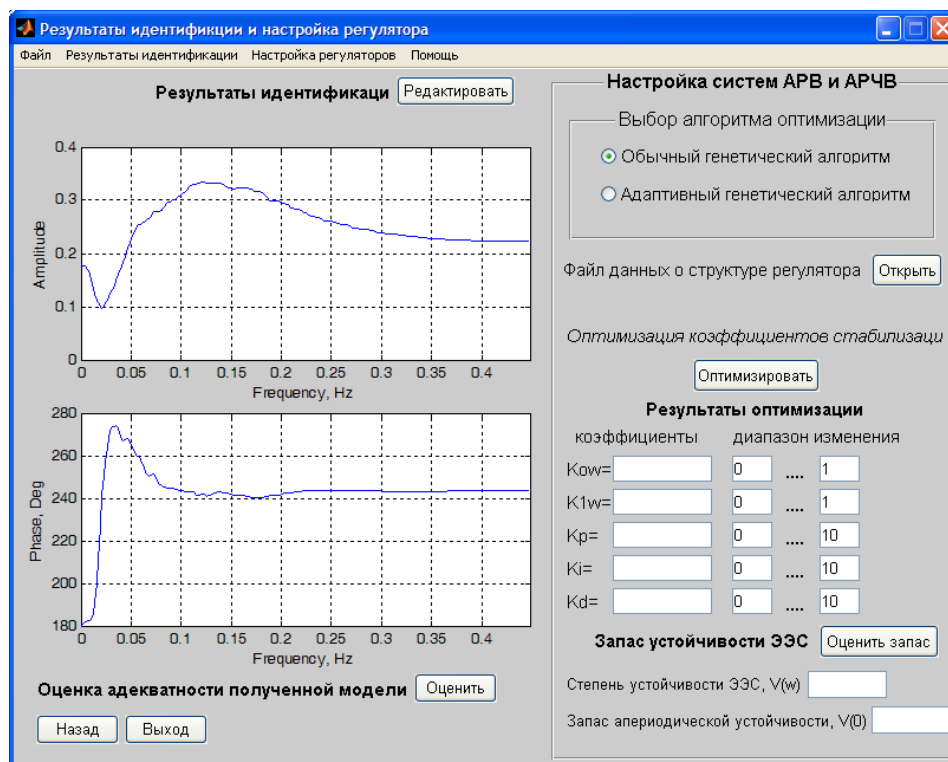


Рис. 5. Интерфейс модуля согласованной настройки

Идентификация и согласованная настройка АРВ и АРЧВ генератора установки РГ проводится для различных режимов, что позволяет создать базу правил, определяющих функционирование адаптивного регулятора установки РГ. На этапе ввода предлагаемой системы необходимо определить основные режимы работы установки РГ, используя экспериментальные данные. При работе системы в автоматическом режиме база знаний fuzzy-регулятора пополняется автоматически. База правил предлагаемой системы формируется из продукционных правил типа «Если-то» с использованием знаний эксперта или блока автонастройки.

Необходимо отметить, что применение технологий распределённой генерации в СЭЖД требует учитывать следующие особенности: значительные вариации однофазных тяговых нагрузок, приводящие к появлению несимметрии и гармонических искажений. В связи с этим присоединять установки РГ к СЭЖД лучше через вставки постоянного тока (ВПТ) с использованием современной преобразовательной техники. Использование ВПТ



дает возможность улучшить показатели качества электроэнергии и ограничить мощность короткого замыкания на шинах источников РГ [8, 9].

Описание модели и результатов исследования. Моделирование проводилось в среде MATLAB применительно к схеме фрагмента СЭЖД, представленного на рис. 6. Осуществлялось детальное моделирование режимов района электроснабжения нетяговых потребителей (РЭС). В состав РЭС входила установка РГ мощностью $3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и группа нагрузок, суммарная мощность которых составляла $5,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. РЭС имел топологию сетевого кластера [8], который был выполнен на основе ВПТ. Управление установкой РГ осуществлялось с помощью АРВ и АРЧВ с коррекцией их настройки fuzzy-регулятором, оборудованным блоком автонастройки.

Структурная схема паровой турбины представлена на рис. 7. При моделировании использовались следующие параметры турбогенератора:

о.е., с, эл. град.

Рис. 6. Фрагмент системы электроснабжения железной дороги:

АРВ – автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения; В – выключатель; ДЧ – датчик частоты вращения; КС – контактная сеть; ОВ – обмотка возбуждения; ТН – трансформатор напряжения; ТП – тяговая подстанция; ЭПС – электроподвижной состав; ЭЭС – электроэнергетическая система



Рис. 7. Структурная схема модели паровой турбины с учётом промежуточного отбора пара

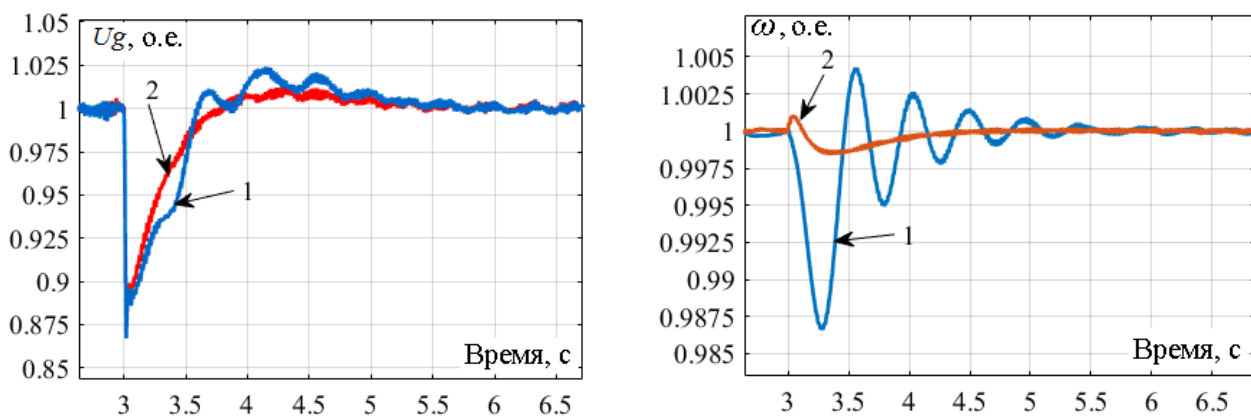
Модель тиристорного возбудителя реализована в виде апериодического звена первого порядка и блока ограничения напряжения [13] при следующих значениях параметров: $k_e = 1$; $T_e = 0,025$ с. Для регулирования частоты и напряжения генератора использовались модели микропроцессорных АРВ и АРЧВ [8, 13]. Согласование настроек регуляторов, а также формирование базы правил fuzzy-регулятора осуществлялись с помощью блока автонастройки. Оптимальные настройки АРВ и АРЧВ были определены для двух режимов: минимальный режим (генератор загружен до 50 %) и максимальный режим (загрузка генератора составляет 100 %). В модели предусматривалась возможность внесения возмущения в виде отключения или подключения дополнительной нагрузки и имитации трёхфазного короткого замыкания (КЗ).

Для анализа влияния предлагаемой адаптивной системы управления согласованной настройкой АРВ и АРЧВ на параметры электромагнитных и электромеханических переходных процессов рассматривались следующие режимы:

- подключение дополнительной нагрузки;
- возникновение КЗ на шинах 6 кВ и его отключение релейной защитой через 0,5 с.

Результаты компьютерного моделирования показывают эффективность использования предлагаемого адаптивного блока управления параметрами АРВ и АРЧВ генератора установки РГ, заключающуюся в уменьшении времени переходного процесса и перерегулирования напряжения и частоты вращения ротора генератора, а также в обеспечении необходимого запаса устойчивости и в способности обеспечивать нормативное качество электроэнергии у потребителей. Результаты моделирования, которые подтверждают сформулированные выводы, представлены на рис. 8 и 9.





а)

б)

Рис. 8. Изменение напряжения (а) и частоты (б) генератора при подключении дополнительной нагрузки: 1 – без изменения коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ; 2 – с использованием fuzzy-регулятора, изменяющего настройки АРВ и АРЧВ

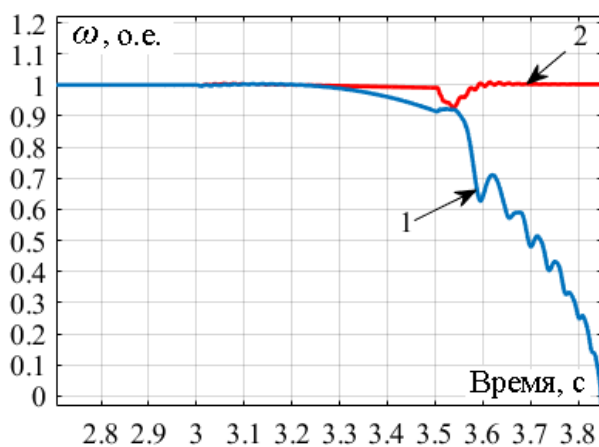


Рис. 9. Осциллограммы частоты вращения ротора генератора при возникновении в момент времени 3 с короткого замыкания длительностью 0,5 с на шинах нетягового потребителя:

1 – без изменения коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ; 2 – с использованием fuzzy-регулятора, изменяющего настройки АРВ и АРЧВ

Таким образом, используемые в методике согласованной настройки регуляторов интеллектуальные технологии позволили сформировать базу знаний адаптивной системы



управления установкой распределённой генерации, работающей в СЭЖД. Интеллектуальность предложенной системы возможно повысить за счёт применения искусственных нейронных сетей и более детального ранжирования возможных режимов работы установки РГ при формировании базы знаний.

Заключение.

1. Предложена адаптивная система управления параметрами регуляторов установки распределённой генерации, базу знаний которой позволяет сформировать блок автонастройки, основанный на применении методики согласованной настройки регуляторов и интеллектуальных технологий. Разработанные интерфейсы модулей согласованной настройки, идентификации и моделирования позволяют формировать базу знаний адаптивной системы управления на этапе ввода её в эксплуатацию.

2. Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать вывод об эффективности применения нечёткого адаптивного блока управления согласованной настройкой автоматических регуляторов генератора установки распределённой генерации. При использовании интеллектуальной системы управления уменьшается время переходного процесса, перерегулирование напряжения и частоты генератора, а также обеспечивается устойчивость и живучесть системы электроснабжения в различных режимах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев А.Н., Смоленик С.В. Проектирование адаптивных автоматических регуляторов возбуждения с помощью нейронечеткого моделирования // Электричество. 2002. № 3. С. 2–9.
2. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Улучшение качества электроэнергии нетяговых потребителей путем применения автоматически управляемых установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2014. №4(24). С. 73–79.
3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Согласованная настройка регуляторов установок распределенной генерации, работающих в системе электроснабжения железной дороги // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1(25). С. 94–102.
4. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 2 (Т. 63). С. 7–22.
5. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 2. С. 30–45.

«Информационные и математические технологии в науке и управлении» 2017 № 3 (7)



6. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2(46). С. 83–95.
7. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Известия вузов. Проблемы энергетики. № 7-8. 2014. С. 60–69.
8. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 205 с.
9. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Алексеенко Е.А. Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения с установками распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 1(5). С. 7–18.
10. Буянкин В.М. Анализ влияния числа слоев нейронной сети на устойчивость замкнутых систем нейроуправления электроприводом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2010. № 3. С. 108–115.
11. Буянкин В.М. Синтез нейроадаптивных нейрорегуляторов с использованием нечетких технологий на базе нейропрогнозирующих нейроидентификаторов для систем управления сложными техническими установками // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 8. С. 33–44.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: Издательство ИрННТУ. 2015. 218 с.
13. Игнатьев И.В., Булатов Ю.Н. Модели и методы настройки систем регулирования возбуждения генераторов на основе экспериментальных данных. Братск: Изд-во БрГУ. 2016. 278 с.
14. Куцый Н.Н., Лукьянов Н.Д. Применение генетического алгоритма для оптимизации автоматических систем с ПИД-регулятором // Вестник ИрГТУ. 2012. № 6 (65). С. 6–10.
15. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. “Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm“, *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE Conference Publications. 2016. Pp. 1–6.
16. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014. 396 p.
17. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London. 2014. 396 p.



18. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of Improved Genetic Algorithm in PID Controller Parameters Optimization // *Telkomnika*. 2013. Vol. 11. № 3. Pp. 1524–1530. Available at: <http://www.iaesjournal.com/online/index.php/TELKOMNIKA/article/viewFile/2301/pdf>, accessed 31.03.2016.
19. Evgenije Adzic et al. Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control / Evgenije Adzic, Zoran Ivanovic, Milan Adzic, Vladimir Katic // *Acta Polytechnica Hungarica*. Vol. 6. № 1. 2009. Pp. 131–149.
20. Jaen-Cuellar A.Y., Romero-Troncoso R.de J., Morales-Velazquez L., Osornio-Rios R.A. PID-Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms in Servo Systems // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. Vol. 10. Pp. 324. DOI: 10.5772/56697
21. Lombardi P., Styczynski Z.A., Sokolnikova T., Suslov K. Use of energy storage in Isolated Micro Grids, Power Systems Computation Conference (PSCC). 2014. Pp. 1–6.
22. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries // *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2013. DOI: [10.1109/PEOCO.2013.6564586](https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564586).
23. Magdi S. Mahmoud, Fouad M. AL-Sunni Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer. 2015. 578 p.
24. Martínez Ceseña E.A., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty // *IEEE Transaction on Smart Grid*. 2016. Vol. 7. Pp. 348–357.
25. Mrad F., Karaki S., Copti B. An adaptive fuzzy-synchronous machine stabilizer // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*. Vol.30. № 1. 2000. Pp. 131–137.
26. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia / Y.I. Morzhin, Y.G. Shakaryan, Y.N. Kucherov, N.I. Voropai, S.N. Vasiliev, I.B. Yadykin / CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5-7 2011. Manchester, GB: IEEE. The University of Manchester, 2011. Panel session 5D. Pp. 1-5.
27. Torriti J. Demand Side Management for the European Supergrid: Occupancy variances of European single-person households // *Energy Policy*. 2012. Vol. 44. Pp. 199–206.
28. Voropai N.I., Etingov P.V. Two-Stage Adaptive Fuzzy PSS Application to Power Systems // *Proc. of International Conference on Electrical Engineering ICEE'2001*, July 22-26, Xi'an, China. Vol. 1. 2001. Pp.314–318.



UDK 004.8, 519.71, 681.5

INTELLIGENT TUNING OF DISTRIBUTED GENERATORS REGULATORS

Yury N. Bulatov

PhD, Associate professor, Bratsk State University
40, Makarenko St., 665709, Bratsk, e-mail: bulatovyura@yandex.ru

Andrey V. Kryukov

Dr., Professor, Irkutsk State Transport University
15, Chernyshevsky St., 664074, Irkutsk, Russia, e-mail: and_kryukov@mail.ru;
Irkutsk national research technical university
83, Lermontov St. 83, 664074, Irkutsk, Russia, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Abstract. The task of applying the intelligent control algorithms in electrical power systems becomes particularly relevant due to development of smart grids concept, which provides wide application of active devices for regulation of distributed generation modes and distributed generators (DG). It is possible to improve the stability of parallel operation of turbo and hydro generators of distributed generators by means of equipping them with automatic regulators of excitation (ARE) and rotational speed (ARRS).

The article deals with system of adaptive control of coordinated tuning ARE and ARRS in various modes of operation of synchronous distributed generators by using the genetic algorithm and fuzzy logic. Besides, the applied technique takes advantage of modern technologies of digital signal processing: wavelet transform, discrete fast Fourier transform, window functions.

Based on simulation performed in MATLAB system it was possible to show the efficiency of application of proposed adaptive control unit for ARE and ARRS



regulation, which consists in reducing the transient time and overshooting the voltage and rotational speed of generator rotor as well as in providing the required stability factor.

Keywords: distributed generation in power supply systems of railways, automated speed and field regulators, coordinated tuning, fuzzy algorithm.

References

1. Belyaev A.N., Smolovik S.V. Proektirovanie adaptivnyh avtomaticheskikh regulyatorov vozbuzhdeniya s pomoshch'yu nejronechetkogo modelirovaniya [Design of adaptive automatic excitation regulators using neuron-fuzzy modeling] // Electricity. № 3. Pp. 2–9. (in Russian)
2. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Tran Duy Hung. Uluchshenie kachestva ehlektroehnergii netyagovyh potrebitelej putem primeneniya avtomaticheskikh upravlyaemykh ustanovok raspredelennoj generacii [Improvement of quality of the electric power of not traction users by application of automatically controllable installations of the distributed generation] // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 4 (24). Pp. 73–79. (in Russian)
3. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Tran Duy Hung. Soglasovannaya nastrojka regulyatorov ustanovok raspredelennoj generacii, rabotayushchih v sisteme ehlektrosnabzheniya zheleznoj dorogi [Matched setting of controllers of distributed generation plants operating in railway power supply system] // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 1(25). Pp. 94–102. (in Russian)
4. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Primenenie vejvlet-preobrazovaniya i geneticheskikh algoritmov dlya nastrojki avtomaticheskikh regulyatorov ustanovok raspredelennoj generacii [Application of the wavelet transform and genetic algorithms for setting of the automatic regulators of the distributed generators] // Scientific bulletin of the Novosibirsk state technical university. 2016. № 2 (volume 63). Pp. 7–22. (in Russian)
5. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlya nastrojki avtomaticheskikh regulyatorov ustanovok raspredelennoj generacii [Application of genetic algorithms for setting adjustment controllers of distributed generation plants] // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2016. № 2. Pp. 30–45. (in Russian)
6. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Tran Duy Hung. Intellektual'nye regulatory dlya ustanovok raspredelennoj generacii [Intelligent regulators for installations of the distributed generation] // Modern technologies. Systems analysis. Simulation. 2015. № 2(46). Pp. 83–95. (in Russian)



7. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Tran Duy Hung. Nechetkie regulatory dlya vetrogeneriruyushchih ustanovok [Fuzzy regulators for wind generators] // News of higher education institutions. Power problems. 2014. № 7-8. Pp. 60–69. (in Russian)
8. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Tran Duy Hung. Setevye klastery v sistemah `elektrosnabzheniya zheleznih dorog [Network clusters in railway power supply systems]. Irkutsk. 2015. 205 p. (in Russian)
9. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Alekseenko E.A. Modelirovanie avarijnyh rezhimov v sistemah ehlektrosnabzheniya s ustanovkami raspredelennoj generacii [Modeling emergency mode power supply system with the installation of distributed generation] // Informational and mathematical technologies in science and management. 2017. № 1 (5). Pp. 7–18. (in Russian)
10. Buyankin V.M. Analiz vliyaniya chisla sloev nejronnoj seti na ustojchivost' zamknutyh sistem nejroupravleniya ehlektroprivodom [Analysis of the influence of the number of layers of the neural network on the stability of closed systems of control by the electric drive] // Vestnik of MSTU. N.E. Bauman. Ser. "Mechanical engineering". 2010. № 3. Pp. 108–115. (in Russian)
11. Buyankin V.M. Sintez nejroadaptivnyh nejroregulyatorov s ispol'zovaniem nechetkih tekhnologij na baze nejroprognoziruyushchih nejroidentifikatorov dlya sistem upravleniya slozhnymi tekhnicheskimi ustanovkami [Synthesis of Neuroadaptive Neuroregulators Using Fuzzy Technologies Based on Neuroprognosing Neuroidentifikators for Control Systems for Complex Technical Installations] // Appliances and Systems. Management, control, diagnostics. 2012. № 8. Pp. 33–44. (in Russian)
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intellekturnye tehnologii upravleniya kachestvom `elektro`energii [Intellectual technologies of quality management of the electric power]. Irkutsk. 2015. 218 p. (in Russian)
13. Ignatiev I.V., Bulatov Yu.N. Modeli i metody nastrojki sistem regulirovaniya vozbuzhdeniya generatorov na osnove `eksperimental'nyh dannyh [Models and methods of setting generator excitation control systems on the basis of experimental data]. Bratsk. 2016. 278 p. (in Russian)
14. Kutsyi N.N., Lukyanov N.D. Primenenie geneticheskogo algoritma dlya optimizacii avtomaticheskikh sistem s PID-regulyatorom [Application of a genetic algorithm for optimization of automatic systems with a PID controller] // Vestnik IrSTU. 2012. № 6 (65). Pp. 6–10. (in Russian)
15. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. "Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm", 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Conference Publications. 2016. Pp. 1-6.



16. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014. 396 p.
17. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London. 2014. 396 p.
18. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of Improved Genetic Algorithm in PID Controller Parameters Optimization // Telkomnika. 2013. Vol. 11. № 3. Pp. 1524–1530. Available at: <http://www.iaesjournal.com/online/index.php/TELKOMNIKA/article/viewFile/2301/pdf>, accessed 31.03.2016.
19. Evgenije Adzic et al. Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control / Evgenije Adzic, Zoran Ivanovic, Milan Adzic, Vladimir Katic // Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 6. № 1. 2009. Pp. 131–149.
20. Jaen-Cuellar A.Y., Romero-Troncoso R.de J., Morales-Velazquez L., Osornio-Rios R.A. PID-Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms in Servo Systems // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10. Pp. 324. DOI: 10.5772/56697
21. Lombardi P., Styczynski Z.A., Sokolnikova T., Suslov K. Use of energy storage in Isolated Micro Grids, Power Systems Computation Conference (PSCC). 2014. Pp. 1–6.
22. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries // IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586.
23. Magdi S. Mahmoud, Fouad M. AL-Sunni Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer. 2015. 578 p.
24. Martínez Ceseña E. A., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty // IEEE Transaction on Smart Grid. 2016. Vol. 7. Pp. 348–357.
25. Mrad F., Karaki S., Copti B. An adaptive fuzzy-synchronous machine stabilizer // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews. Vol. 30. № 1. 2000. Pp. 131–137.
26. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia / Y.I. Morzhin, Y.G. Shakaryan, Y.N. Kucherov, N.I. Voropai, S.N. Vasiliev, I.B. Yadykin / CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5-7 2011. Manchester, GB: IEEE. The University of Manchester. 2011. Panel session 5D. Pp. 1–5.
27. Torriti J. Demand Side Management for the European Supergrid: Occupancy variances of European single-person households // Energy Policy. 2012. Vol. 44. Pp. 199–206.



28. Voropai N.I., Etingov P.V. Two-Stage Adaptive Fuzzy PSS Application to Power Systems // Proc. of International Conference on Electrical Engineering ICEE'2001, July 22-26, Xi'an, China. Vol. 1. 2001. Pp. 314–318.



УДК 519.71

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗНАНИЙ АГЕНТАМИ В
СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВЫЧИСЛЕНИЯМИ**

Феоктистов Александр Геннадьевич

К.т.н., доцент, с.н.с., e-mail: agf65@yandex.ru

Костромин Роман Олегович

Аспирант, e-mail: romang70055@gmail.com

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134

Аннотация. Управление масштабируемыми приложениями для решения больших научных задач в гетерогенной распределенной вычислительной среде является нетривиальной проблемой. Такие приложения генерируют конкурирующие потоки заданий, выполняемые с помощью общих ресурсов среды. Эффективным подходом к решению этой проблемы является использование мультиагентных технологий. С этой целью разработана мультиагентная система для управления масштабируемыми приложениями. В отличие от существующих мультиагентных систем, она основана на применении специальной концептуальной модели вычислительной среды, включающей различные компоненты комплексных знаний как об окружающей среде, так и о предметных областях решаемых задач. Предложен новый подход к извлечению этих компонентов знаний посредством комплексного использования концептуального моделирования распределенных вычислений, классификации заданий и ресурсов, а также параметрической настройки алгоритмов функционирования агентов. Практические эксперименты подтверждают эффективность мультиагентного управления масштабируемыми приложениями.

Ключевые слова: распределенные вычисления, мультиагентное управление, самоорганизация, извлечение знаний, имитационное моделирование

Введение. Стремительный рост числа вычислительных компонентов в НРС-системах актуализирует разработку масштабируемых приложений. Масштабируемость вычислений означает то, что время решения задачи пропорционально уменьшается с увеличением числа узлов, используемых приложением. Таким образом, решаемая задача должна обладать возможностью декомпозиции на подзадачи, которые могут быть решены с максимальной

степенью независимости друг от друга. Суперкомпьютеры и кластеры обеспечивают решение задач в вычислительных средах, включающих гетерогенные, автономные и географически распределенные узлы, которые обладают сложной гибридной структурой, различными вычислительными характеристиками и административными политиками [15]. Владельцы узлов определяют критерии их использования (эффективность, балансировка нагрузки, энергопотребление, стоимость и т. д.). Grid-технологии и облачные инфраструктуры, как правило, образуют такую гетерогенную распределенную вычислительную среду (ГРВС).

Системы управления ресурсами (Resource Management System, RMS) применяются для работы на уровне узлов ГРВС. Традиционными RMS являются такие системы, как PBS Torque, HTCondor и SLURM. Промежуточное программное обеспечение используется для управления вычислениями в узлах ГРВС посредством взаимодействия с RMS или путем ее замещения. Как правило, ГРВС поддерживает коллективное использование своих ресурсов для решения широкого класса задач. Спецификация задач включает информацию о необходимых вычислительных ресурсах, исполняемых программах, входных и выходных данных, критериях качества решения задачи и другие необходимые данные. Спецификация описывает задание для традиционных RMS и метапланировщиков, используемых в узлах ГРВС.

В общем случае задание включает множество взаимосвязанных подзаданий. Существует широкий спектр систем управления потоками заданий (Workflow Management Systems, WMS), таких, как: Condor DAGMan, Pegasus, Taverna, UNICORE и др. [14]. Тем не менее, не все проблемы управления потоком заданий в ГРВС полностью решены [12]. WMS функционирует на уровне приложений. Ее целью является получение наилучших ресурсов для своего потока заданий, что обуславливает конкуренцию за ресурсы с другими приложениями.

В отличие от WMS, RMS и мета-планировщики работают на уровне среды. Администраторы RMS и мета-планировщиков определяют общие правила использования ресурсов и политики распределения квот, а также прав пользователей и их заданий. Однако эффективное согласование пожеланий пользователей и владельцев ресурсов в процессах распределения этих ресурсов для решения задач, с учетом специфики предметных областей, часто остается за пределами возможностей администраторов.

Перспективным подходом к решению этой нетривиальной проблемы является применение мультиагентных технологий, основанных на принципах самоорганизации агентов [8]. Агенты могут представлять пользователей и владельцев ресурсов, а также общаться друг с другом с целью достижения собственных целей. Известны MAC, которые

успешно используются на практике [1, 5, 9, 10]. Тем не менее, существуют компоненты знаний о предметной области, свойствах заданий и т.д., которые не в полной мере используются этими системами.

В статье представлена мультиагентная система управления масштабируемыми приложениями, которая позволяет специалистам в различных областях распределенных вычислений применять собственные знания на разных уровнях процесса решения задач.

1. Мультиагентная система. Разработанная МАС имеет иерархическую структуру, которая включает два или более уровней и работает на основе принципов самоорганизации. На каждом уровне агенты выполняют различные функции. Управление вычислениями основано на общении агентов. На каждом уровне иерархии агенты могут объединяться в виртуальные сообщества (ВС), кооперироваться и конкурировать в рамках этих сообществ. Формирование ВС позволяет МАС адаптировать процесс управления к новым задачам. МАС применяет алгоритм статического распределения ресурсов на основе экономических механизмов регулирования их спроса и предложения. Используется модель аукциона Викри [13].

Пользователи формулируют постановку задачи и определяют критерии ее решения. Пользовательские агенты создают и классифицируют задания, основываясь на постановке задачи. Затем эти агенты передают задания агентам распределения ресурсов. Создается ВС агентов, наиболее подходящее для решения задачи. Каждый агент ВС делает ставки для всех подзаданий, отражающие истинную стоимость их выполнения и максимальную выгоду. В конце аукциона достигается устойчивое состояние ВС, аналогичное равновесию в теоретико-игровых моделях, определенному Нэшем [11]. Правила аукциона Викри обеспечивают также простоту и необходимую скорость принятия решения агентами.

ВС обеспечивает управление выполнением задания. В процессе вычислений агенты могут перераспределять свою вычислительную нагрузку среди других агентов посредством локального общения с соседями. Агенты обеспечивают динамическую декомпозицию задачи на подзадачи, когда появляются дополнительные свободные ресурсы. Декомпозиция позволяет ускорить решение задачи и сделать ее масштабируемой.

Известны различные методы извлечения знаний [7]. Концептуальное и имитационное моделирование являются основными методами, используемыми агентами.

2. Концептуальная модель. Методы концептуального моделирования являются мощным инструментом для разработки сложных систем [2]. Концептуальная модель позволяет системным проектировщикам и разработчикам представлять результаты своего экспертного анализа предметной области. Концептуальная модель предметно-ориентированной ГРВС включает в себя следующие компоненты знаний: знания

о программных модулях (программах) для решения задач в предметных областях и работы с объектами ГРВС; схемные знания о модульной структуре моделей и алгоритмов; продукционные знания, обеспечивающие поддержку принятия решений для выбора оптимальных алгоритмов в зависимости от состояния ГРВС; знания о программно-аппаратной инфраструктуре ГРВС и административных политиках в ее узлах, включая информацию о пользователях, их задачах и заданиях.

Для создания концептуальных моделей разработан специализированный инструментарий высокого уровня SIRIUS II [4]. Этот инструментарий используется для извлечения предметно-ориентированных знаний разработчиков приложений. Более детальную информацию о концептуальной модели можно найти в [6].

3. Система классификации заданий. Разработана система классификации заданий, предназначенная для улучшения процесса распределения ресурсов. Эта система позволяет получать знания от администраторов о соответствии заданий и ресурсов.

Требования задания к ГРВС представляют конкретные характеристики, такие, как время решения задачи, ОЗУ, объем дисковой памяти, число узлов, процессоров и ядер, библиотеки программ, компиляторы, их ключи и другую необходимую информацию.

Распознавание свойств заданий осуществляется с помощью набора характеристических функций. После классификации задание конкретизируется путем добавления в него директивы для RMS, определяющей допустимые для распределения ресурсы. MAC создает ВС агентов, соответствующее этим ресурсам, и отправляет ему конкретизированное задание. ВС выполняет окончательный выбор и распределение ресурсов.

4. Настройка алгоритмов агентов. Алгоритмы распределения ресурсов имеют ряд управляющих параметров: ограничения загрузки компонентов узла; бонусы за удовлетворение этим ограничениям; штрафы за их превышение; приоритеты классов заданий; степень желания выполнять задания определенных классов. Администраторы задают начальные значения этих параметров при настройке MAC. Эти параметры автоматически корректируются на основе имитационного моделирования и мета-мониторинга в процессе работы MAC.

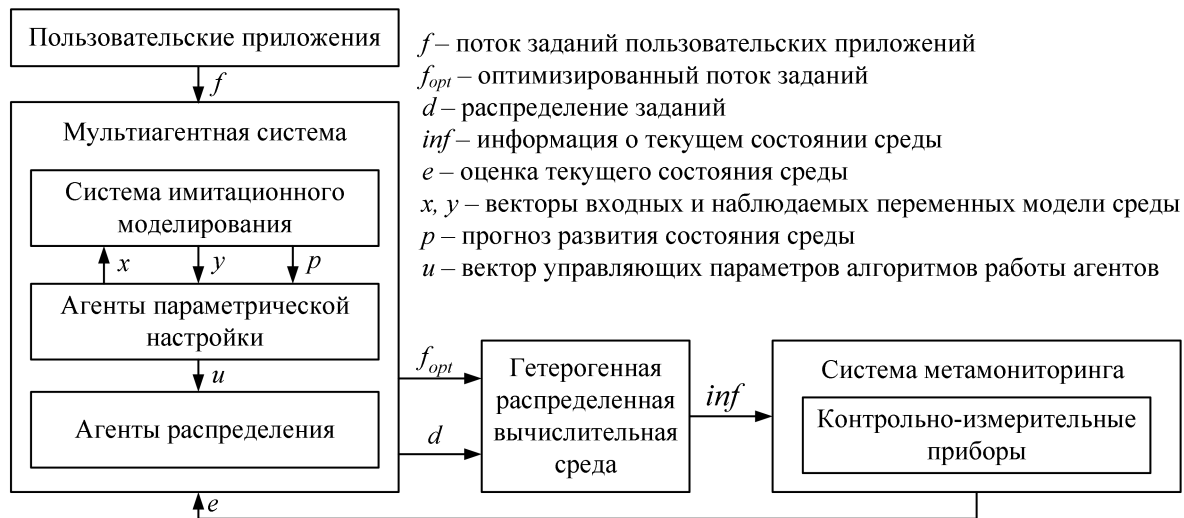


Рис. 1. Схема параметрической настройки алгоритмов работы агентов

На рис. 1 показана схема параметрической настройки. Для параметрической настройки используется имитационное моделирование. Решается следующая задача:

(1)

(2)

Имитационная модель создается в виде приложения, поддерживающего многовариантные расчеты. Система мета-мониторинга обеспечивает оценку текущего состояния ГРВС. Результаты моделирования представлены вариантами значений вектора. Для формирования вектора применяется многокритериальный выбор вариантов вектора с использованием условий, представленных в (1) и (2) [3]. Экстремумы для каждого элемента вектора назначаются перед началом моделирования. Параметрическая настройка позволяет агентам делать эффективные ставки на аукционе Викри и применяется как элемент их обучения. Обратная связь в процессе обучения осуществляется на основе бонусов и штрафов. Агенты корректируют свои собственные решения с учетом этой обратной связи.

5. Вычислительные эксперименты. Проведен анализ вычислительной истории более 80000 реальных заданий, выполненных на трех кластерах с различными ресурсами (табл. 1). Кластеры 1 и 3 включают узлы, которые используются только в рамках кластера. Узлы кластера 2 задействуются как их владельцами, так и пользователями кластера. В

системе Cleo все ядра узла выделяются по запросу задания, независимо от числа запрошенных ядер, что зачастую приводит к неэффективному использованию ресурсов.

В данной работе эта проблема решается с помощью системы классификации. В ней определен набор родительских классов заданий, основанных на анализе их вычислительной истории. Эти классы отличаются количеством запрашиваемых ядер и временем выполнения. На их основе созданы дополнительные классы заданий с учетом требуемого ОЗУ, дискового пространства, операционной системы, прикладного программного обеспечения и т.д. Каждый дополнительный класс соответствует одному из кластеров.

Таблица 1. Вычислительные кластеры

Кластер	Пиковая производит ельность кластера	Число узлов/ процессоров/ ядер	RMS	Средняя загрузка процессора узла без классификации заданий	Средняя загрузка процессора узла с классификацией заданий
Кластер 1	1,50 TFlops	20/40/160	Cleo	70 %	86 %
Кластер 2	0,77 TFlops	16/16/64	HTCondor	41 %	64 %
Кластер 3	0,17 TFlops	16/32/32	СУППЗ	28 %	56 %

Для проведения эксперимента разработана имитационная модель ГРВС. В ней сформирован поток заданий в соответствии с полученной вычислительной историей. Каждое задание классифицируется и передается RMS соответствующего кластера. Средняя загрузка процессора для трех кластеров при обработке потока заданий с использованием системы классификации улучшена на 16%, 23% и 28%. Было перераспределено более 12000 заданий, сохранивших все характеристики определенных для них классов.

В следующем эксперименте использован тот же самый поток заданий. Выполнен сравнительный анализ эффективности загрузки процессоров узлов кластеров под управлением мета-планировщиков HTCondor и GridWay, а также разработанной MAC, используемых в качестве промежуточного программного обеспечения, взаимодействующего с RMS. Результаты, приведенные в табл. 2, иллюстрируют преимущества MAC по сравнению с другими системами. Эти преимущества достигаются за счет параметрической настройки, представленной в разделе 4.

Таблица 2. Загрузка процессоров узлов кластеров

Кластер	HTCondor	GridWay	MAC
Кластер 1	76,98	80,87	81,56
Кластер 2	73,55	72,97	74,65
Кластер 3	76,85	77,96	78,89

Все эксперименты выполнены в распределенной вычислительной среде на базе ресурсов Иркутского государственного университета и Центра коллективного пользования «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН».

Заключение. В статье рассмотрена проблема мультиагентного управления в ГРВС. Показано, что эффективность управления в значительной степени зависит от способности использования предметно-ориентированных знаний. Предложен подход к извлечению, представлению и использованию всесторонних знаний о ГРВС и предметных областях решаемых задач. Специалисты в различных областях распределенных вычислений могут генерировать эти знания на разных уровнях процесса решения задач на основе собственных навыков и опыта. Разработана МАС для управления масштабируемыми приложениями, которые генерируют потоки заданий. МАС функционирует на основе принципов самоорганизации. Имитационное моделирование и практические эксперименты с многовариантными расчетами показывают эффективность предложенного подхода к управлению в рамках разработанной МАС благодаря извлечению концептуальных знаний.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты № 15-29-07955-офи_м и № 16-07-00931-а, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН 1.33П, проект «Разработка новых подходов к созданию и исследованию моделей сложных информационно-вычислительных и динамических систем с приложениями», а также Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-8081.2016.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каляев А.И., Каляев И.А. Метод мультиагентного диспетчирования ресурсов в облачных вычислительных средах // Известия РАН. Теория и системы управления. 2016. № 2. С. 51–63.
2. Тыгу Э.Х. Концептуальное программирование. М.: Наука, 1984. 256 с.
3. Феоктистов А.Г. Управление сложной системой на основе методологии многокритериального выбора управляющих воздействий // Фундаментальные исследования. 2015. № 9-1. С. 82–86.
4. Феоктистов А.Г., Корсуков А.С., Дядькин Ю.А. Аспекты имитационного моделирования процессов мультиагентного управления распределенными вычислениями // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2016. №4-1. С. 118–126.

5. Amato A., Venticinque S. A Distributed Agent-Based Decision Support for Cloud Brokering // Scalable Computing: Practice and Experience. 2014. Vol. 15. № 1. Pp. 65–78.
6. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Gorsky S. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. Pp. 162–167.
7. Cooke N. J. Varieties of knowledge elicitation techniques // International Journal of Human-Computer Studies. 1994. Vol. 41. № 6. Pp. 801–849.
8. Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.-P., Karageorgos A. Self-organization in Multi-agent Systems // The Knowledge Engineering Review. 2005. Vol. 20. № 2. Pp. 165–189.
9. Ezugwu A.E., Frincu S.B., Adewumi A.O., Buhari S.M., Junaidu S.B. Neural network-based multi-agent approach for scheduling in distributed systems // Concurrency and Computation: Practice & Experience. 2017. Vol. 29. № 1. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1002/cpe.3887> (дата обращения 25.04.2017).
10. Leitao P., Inden U., Ruckemann C.-P. Parallelising Multi-agent Systems for High Performance Computing // 3rd International Conference on Advanced Communications and Computation, Red Hook NY: IARIA. 2014. Pp. 1–6.
11. Nash J. Equilibrium points in n-person games // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1950. Vol. 36. № 1. Pp. 48–49.
12. Talia D. Workflow Systems for Science: Concepts and Tools // ISRN Software Engineering. 2013. Vol. 2013. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/404525> (дата обращения 18.04.2017).
13. Vickrey W. Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders // Journal of Finance. 1961. Vol. 16. № 1. Pp. 8–37.
14. Yu J., Buyya R. A Taxonomy of Workflow Management Systems for Grid Computing // Journal of Grid Computing. 2005. Vol. 3. № 3. Pp. 171–200.
15. Zeng L., Xu L., Shi Z., Wang M., Wu W. Distributed Computing Environment: Approaches and Applications // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics: IEEE Publisher. 2007. Pp. 3240–3244.

UDK 519.71

**KNOWLEDGE ELICITATION BY AGENTS
IN DISTRIBUTED COMPUTING MANAGEMENT SYSTEM**

Alexander G. Feoktistov

Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Research Officer,
e-mail: agf65@yandex.ru

Roman O. Kostromin

Postgraduate Student, e-mail: romang70055@gmail.com
Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS
134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. The scalable applications management for solving large-scale problems in a heterogeneous distributed computing environment is the non-trivial problem. Applications generate competitive job flows that have to be carried out using shared resources of the environment. The effective approach to solve this problem is to apply multi-agent technologies. In this regard, we develop a multi-agent system for the scalable applications management. In comparison to existing multi-agent systems, our system is based on employing a special conceptual model of the environment. It has various components of a complex knowledge about both the environment and subject domains of solved problems. We provide a new approach to an elicitation of these knowledge components through an integrated use of the conceptual modelling of distributed computing, classification of jobs and resources, and the parameters adjustment for agent algorithms. Practical experiments demonstrate the high speed and efficiency of computations due to using the developed multi-agent system for the scalable applications management.

Keywords: distributed computing, multi-agent management, self-organization, knowledge elicitation, simulation modeling

References

1. Kalyaev A.I., Kalyaev I.A. Metod mul'tiagentnogo dispetchirovaniya resursov v oblachnyh vychislitel'nyh sredah [Method of multiagent scheduling of resources in cloud computing environments] // Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija = Proceedings of the RAS. Theory and control systems. 2016. №. 2. Pp. 51–63. (in Russian)
2. Tyugu E.H. Konceptual'noe programmirovanie [Conceptual Programming]. Moscow. Nauka = Science. 1984. 256 p. (in Russian)

3. Feoktistov A.G. Upravlenie slozhnoj sistemoj na osnove metodologii mnogokriterial'nogo vybora upravljajushhih vozdeystvij [The management of complex systems based on the methodology of multi-criteria choice of control actions] // Fundamental'nye issledovanija = Fundamental Research. 2015. № 9-1. Pp. 82–86. (in Russian)
4. Feoktistov A.G., Korsukov A.S., Dyadkin Y.A. Aspekty imitacionnogo modelirovanija processov mul'tiagentnogo upravlenija raspredelennymi vychislenijami [The aspects of simulation modeling of processes of multiagent control of distributed computing] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2016. № 4-1. Pp. 118–126. (in Russian)
5. Amato A., Venticinque S. A Distributed Agent-Based Decision Support for Cloud Brokering. Scalable Computing: Practice and Experience. 2014. vol. 15. № 1. Pp. 65–78.
6. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Gorsky S. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. Pp. 162–167.
7. Cooke N. J. Varieties of knowledge elicitation techniques // International Journal of Human-Computer Studies. 1994. Vol. 41. № 6. Pp. 801-849.
8. Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.-P., Karageorgos A. Self-organization in Multi-agent Systems // The Knowledge Engineering Review. 2005. Vol. 20. № 2. Pp. 165–189.
9. Ezugwu A.E., Frincu S.B., Adewumi A.O., Buhari S.M., Junaidu S.B. Neural network-based multi-agent approach for scheduling in distributed systems // Concurrency and Computation: Practice & Experience. 2017. Vol. 29. № 1. Available at: <http://dx.doi.org/10.1002/cpe.3887>, accessed 25.04.2017.
10. Leitao P., Inden U., Ruckemann C.-P. Parallelising Multi-agent Systems for High Performance Computing // 3rd International Conference on Advanced Communications and Computation. Red Hook NY: IARIA. 2014. Pp. 1–6.
11. Nash J. Equilibrium points in n-person game // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1950. Vol. 36. № 1. Pp. 48–49.
12. Talia D. Workflow Systems for Science: Concepts and Tools // ISRN Software Engineering. 2013. vol. 2013. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/404525>, accessed 18.04.2017.

13. Vickrey W. Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders // Journal of Finance. 1961. Vol. 16. № 1. Pp. 8–37.
14. Yu J., Buyya R. A Taxonomy of Workflow Management Systems for Grid Computing // Journal of Grid Computing. 2005. Vol. 3. № 3. Pp. 171–200.
15. Zeng L., Xu L., Shi Z., Wang M., Wu W. Distributed Computing Environment: Approaches and Applications // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics: IEEE Publisher. 2007. Pp. 3240–3244.

УДК 004.822:004.89

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАТТЕРНОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОНТОЛОГИИ
ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСА
«ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ»**

Боровикова Олеся Игнатьевна

М.н.с., e-mail: olesya@iis.nsk.su

Загорулько Галина Борисовна

Н.с., e-mail: gal@iis.nsk.su

Загорулько Юрий Алексеевич

К.т.н., зав. лабораторией, e-mail: zagor@iis.nsk.su

Шестаков Владимир Константинович

М.н.с., e-mail: shestakov@iis.nsk.su

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 6

Аннотация. В статье обсуждаются вопросы использования паттернов онтологического проектирования, которые позволяют описывать как типовые, так и специфические проблемы, возникающие при разработке онтологий, а также предлагаемые разработчиками рекомендации и соглашения для их решения. Описание проблем и паттернов, предлагаемых для их решения, даётся на примере разработки онтологии для информационно-аналитического интернет-ресурса по поддержке принятия решений.

Ключевые слова: онтология, разработка онтологии, паттерны онтологического проектирования, поддержка принятия решений

Введение. Разработку онтологий конкретных предметных областей значительно упрощает применение паттернов онтологического проектирования (Ontology Design Patterns) [10, 14], которые представляют собой описания проверенных на практике решений проблем онтологического моделирования. В настоящее время каталоги паттернов создаются в ряде проектов [5, 15]. Однако эти каталоги недостаточно полны и плохо систематизированы, что существенно затрудняет поиск необходимых для конкретной ситуации паттернов.

В статье обсуждаются паттерны онтологического проектирования, сложившиеся в результате решения проблем, с которыми авторы статьи столкнулись в процессе разработки онтологий для различных предметных областей. Описание проблем и паттернов даётся на

примере разработки онтологии для информационно-аналитического интернет-ресурса по поддержке принятия решений (ИАИР ППР) [1, 2]. Данный ресурс обеспечивает содержательный доступ к систематизированной информации, относящейся к области знаний «Поддержка принятия решений», методам её обработки, а также к методам решения типичных для данной области задач. Онтология является концептуальной основой ИАИР ППР и служит для формализации и систематизации различных видов знаний, данных, средств обработки и анализа информации, интегрируемых в информационное пространство ресурса, а также для организации удобного содержательного и функционального доступа к ним.

1. Паттерны онтологического проектирования. Паттерны онтологического проектирования позволяют описывать как типовые, так и специфические проблемы, возникающие при разработке онтологий, а также предлагаемые разработчиками рекомендации и соглашения для их решения. Основной каталог паттернов представлен на портале Ассоциации ODPA (Association for Ontology Design & Patterns) [5], созданного в рамках проекта NeOn [6].

В зависимости от проблем, возникающих при разработке онтологии, различают структурные паттерны, паттерны соответствия, паттерны содержания, паттерны логического вывода, паттерны представления и лексико-синтаксические паттерны [11].

Структурные паттерны задают общую структуру онтологии и фиксируют способы решения проблем представления ее элементов, вызванные ограничениями выразительных возможностей (экспрессивности) языков описания онтологий. Структурные паттерны являются предметно-независимыми, на их основе могут задаваться элементы онтологии для паттернов содержания.

Паттерны содержания задают способы представления фрагментов онтологий, на основе которых строятся онтологии целого класса предметных областей (ПО).

Паттерны логического вывода задают утверждения, на основе которых описываются правила для получения определенного результата логического вывода. Такие паттерны могут использоваться в паттернах другого типа и позволяют не только обеспечивать вывод неявно заданных в онтологии знаний, но и организовывать поиск элементов онтологии и осуществлять проверку корректности при их редактировании и создании.

Паттерны представления определяют соглашения по наименованию, аннотированию и визуализации элементов онтологии для конечного пользователя.

Следует заметить, что на данный момент не существует стандарта для описания паттернов, и они описываются в формате, предложенном на портале сообщества ODP [5, 13]. Схема описания паттерна включает его графическое представление, текстовое описание,

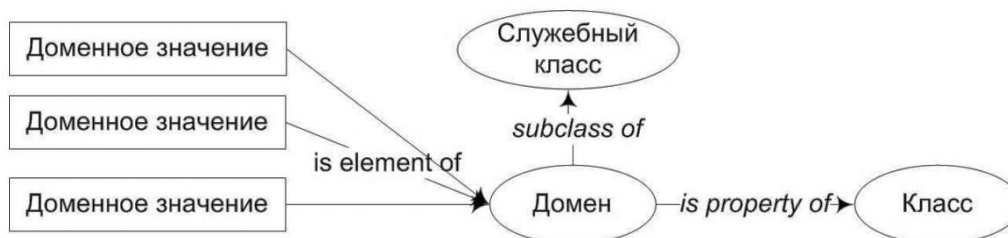
набор сценариев, примеров и ссылки на другие паттерны, в которых он используется, а также общую информацию о названии паттерна, его авторе и области применения.

2. Использование паттернов при разработке онтологии ИАИР ППР. Рассмотрим примеры структурных и содержательных паттернов, а также паттернов представления, использовавшихся при разработке онтологий для информационно-аналитического интернет-ресурса по поддержке принятия решений [2].

Заметим, что при создании паттерна, прежде всего, должны учитываться реальные выразительные и функциональные возможности языков и средств, с помощью которых будет осуществляться разработка онтологий. Так, например, онтология ИАИР ППР разрабатывается с использованием технологии создания интеллектуальных научных интернет-ресурсов (ИНИР), предложенной в ИСИ СО РАН [3]. Данная технология, основанная на авторской методологии разработки онтологий, в то же время использует средства технологии Semantic Web [12]. В частности, в рамках этой методологии онтологии разрабатываются на языке OWL [7] с использованием редактора Protégé. Эти средства помогают решить проблему переиспользования онтологий и многие другие проблемы онтологического инжиниринга, но они же создают и новые проблемы, требующие своего решения.

2.1. Структурные паттерны. Одной из самых острых проблем, возникающих при использовании языка OWL для конструирования онтологий, является то, что OWL обеспечивает представление только простых сущностей, в то время как в онтологии необходимо представлять сложные понятия и отношения.

При определении объектов и задании значений их атрибутов удобно использовать домены — **области допустимых значений** атрибутов, характеризующиеся названием и множеством элементарных значений. Наличие доменов не только позволяет контролировать ввод информации, но и повышает удобство этой операции, позволяя пользователю выбрать значение атрибута из заданного списка значений. Так как в OWL для задания таких доменов нет специальных средств, домены задаются перечислимым классом, являющимся наследником специально введенного служебного класса «Домен». Конкретный домен не имеет наследников и состоит из конечного набора различных индивидов, определяющих возможные значения заданного свойства (Object property) для объектов рассматриваемого



класса (рис. 1).

Рис. 1. Структурный паттерн представления области допустимых значений

Примерами таких доменов являются “Должность”, “Тип организации”, “Тип публикации”, которые включают соответственно виды должностей в организации, типы организаций и типы публикаций.

Другой часто возникающей проблемой при разработке онтологии является потребность в представлении **атрибутированных отношений** между объектами. Для этих целей, как правило, используются обычные бинарные отношения, снабженные атрибутами, специализирующими связь между аргументами отношения [9]. Так как в языке OWL нет возможности задания атрибутов для отношений, был предложен структурный паттерн, предусматривающий введение служебного класса «Атрибутированное отношение» (рис. 2). Для представления конкретного типа отношения вводится класс — его наследник, объект которого связывается с каждым аргументом и атрибутом атрибутированного отношения. При этом нужно учитывать необходимость задания ограничений обязательности и единственности для аргументов, в то время как ограничения на число атрибутов (свойств) не задаются.

Данный паттерн позволяет явно указать порядок аргументов отношения, сохраняя информацию об ориентированности отношения, что важно для представления пользователю полной информации о характере связи между объектами.

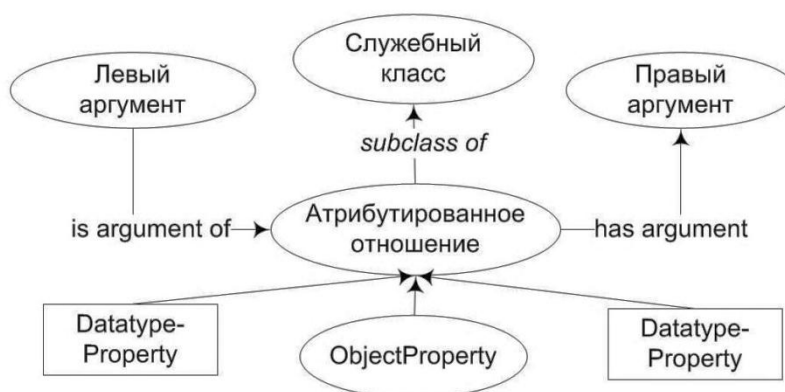


Рис. 2. Структурный паттерн бинарного атрибутированного отношения

Приведем пример использования данного паттерна для задания отношения, описывающего участие *Персоны* в некоторой *Деятельности*. Аргументами такого отношения являются объекты классов *Персона* и *Деятельность*, а атрибутами “роль”, “дата начала” и “дата окончания”, служащие для задания дополнительной информации об отношении:

участвует Персона в Деятельности

аргументы

Левый аргумент: Персона: Загоруйко Ю.А.

Правый аргумент: Деятельность: Методы и технологии разработки ИНИР

атрибуты

роль: руководитель

дата начала: 2013

дата окончания: 2015.

Приведенное отношение информирует нас о том, что Загоруйко Ю.А. участвовал в проекте «Методы и технологии разработки ИНИР» с 2013 по 2015 год в качестве руководителя.

2.2. Паттерны содержания. Как было сказано выше, паттерны содержания задают способы представления фрагментов онтологий, на основе которых могут строиться онтологии ряда предметных областей (ПО). Фактически, предлагаемые в данной работе паттерны содержания являются фрагментами базовых онтологий, предоставляемых упомянутой выше технологией построения ИНИР [3], которые после конкретизации (специализации) содержащихся в них понятий и дополнения новыми понятиями становятся составными частями онтологий конкретных предметных областей.

Онтология ППР строится на основе следующих базовых онтологий: онтологии научного знания и научной деятельности, базовой онтологии задач и методов, а также базовой онтологии научных информационных ресурсов [3]. Покажем, как были конкретизированы предложенные паттерны для описания научной области «Поддержка принятия решений» [1].

Онтология научного знания содержит метапонятия и отношения, описывающие *Предмет исследования, Объект исследования, Метод/Средство исследования, Результат/продукт*, позволяющие выделить в рассматриваемой области значимые разделы и подразделы, установить ее связь со смежными разделами науки, задать типизацию предметов, объектов и методов исследования, описать результаты научной деятельности.

Объектами исследования рассматриваемой ПО являются *Проблемные ситуации*, а Предметами — *Цели и Задачи* поддержки принятия решений, а также аспекты принятия решений, т.е. сущности, связанные с организацией процесса принятия решений: *Этапы*, которые проходят в процессе принятия решения, *Альтернативы* решения проблемной ситуации, *Критерии* оценки альтернатив, *Шкалы*, в которых делаются оценки, способы выражения *Предпочтений* ЛППР. *Результатами* в ПО ППР являются *Методики, Модели и Программные продукты*, которые могут применяться как непосредственно в процессе принятия решений, так и для создания других программных продуктов. Понятие «Раздел науки» для данной ПО включает в себя смежные научные дисциплины, результаты которых используются в ней.

Онтология научной деятельности является онтологией верхнего уровня и включает базовые понятия, относящиеся к организации научно-исследовательской деятельности, такие как *Персона, Организация, Событие, Деятельность, Публикация*, используемые для описания участников научной деятельности, мероприятий, научных программ и проектов, различного типа публикаций.

Во всех научных областях большую роль играет понятие *Интернет-ресурса*. Интернет-ресурсы могут быть связаны со всеми понятиями онтологии области знаний. Их описание строится на основе базовой онтологии научных информационных ресурсов, включающих класс Информационный ресурс в качестве основного класса.

Ввиду особой важности для научных областей и тесной связи друг с другом таких понятий, как *Задача* и *Метод/средство исследования*, описывающий их фрагмент выделен в отдельную онтологию, которая строится на основе базовой онтологии задач и методов, представленной на рис. 3.

Данный паттерн используется и при разработке фрагментов онтологии, описывающих конкретные методы [1].

Согласно методологии eXtreme Design [8] каждый паттерн должен снабжаться набором квалификационных вопросов, определяющих его контент (содержание). Рассмотренный паттерн отвечает на такие вопросы: на каких этапах принятия решений используется данный метод; какие задачи решает данный метод; какие вспомогательные методы нужны для его работы; какие входные данные принимает задача, решаемая данным методом; какое представление имеют входные данные, и на многие другие.

Следует учитывать, что при использовании составных содержательных паттернов могут возникнуть проблемы их сборки и интеграции [4].

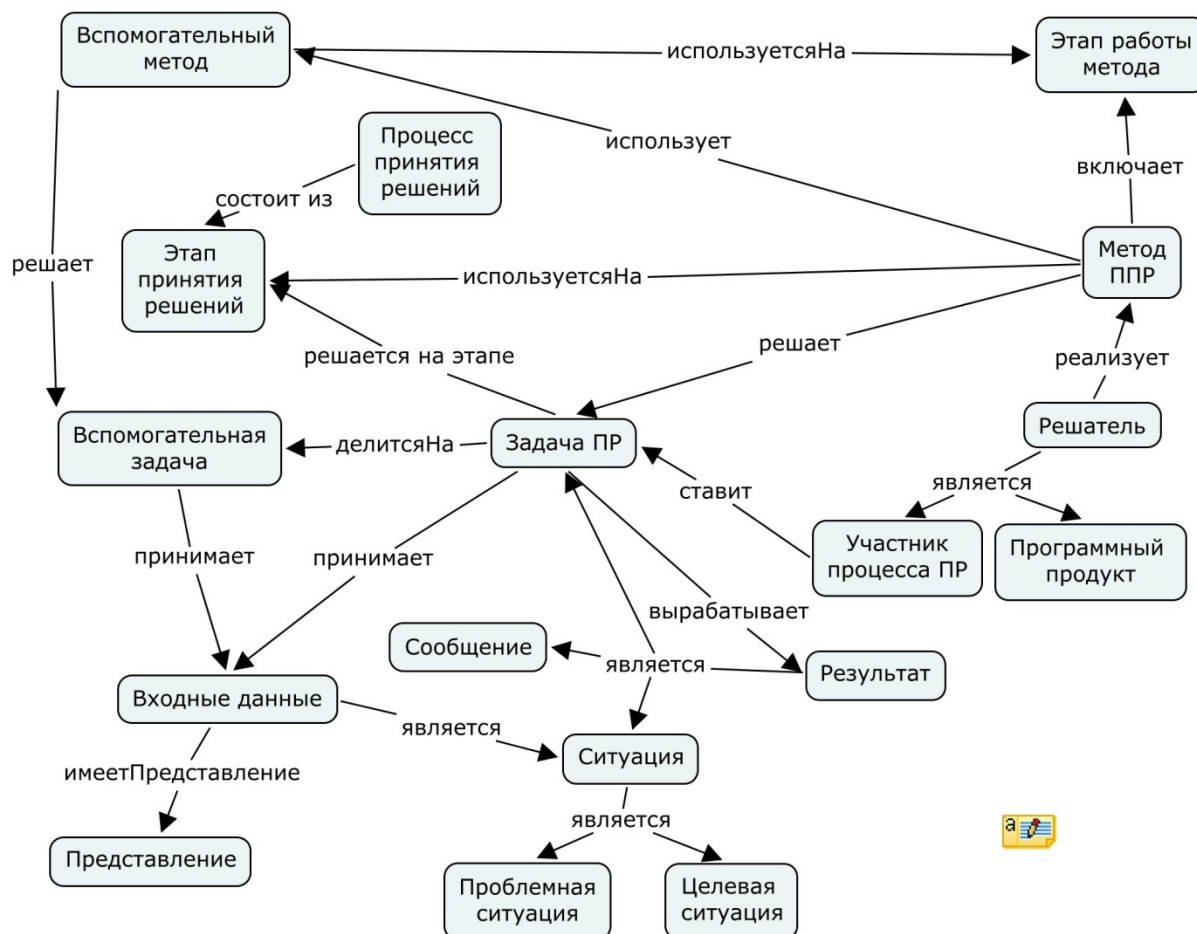


Рис. 3. Фрагмент метаонтологии задач и методов ППР

2.3. Паттерны представления. При разработке ИАИР ППР была поставлена задача предоставления пользователям возможности настраивать отображение элементов онтологии и объектов при их показе на экране монитора. Для решения этой проблемы предлагается паттерн, позволяющий фиксировать порядок задания атрибутов объектов при визуализации и редактировании и хранить эти настройки непосредственно в онтологии.

Необходимый порядок атрибутов объекта при отображении его описания задается для каждого свойства класса при помощи специально введенного для этой цели свойства

(owl:AnnotationProperty) под названием *order*, значением которого является целое число. Заметим, что такие аннотационные свойства можно приписывать любому элементу онтологии: классу, свойству ObjectProperty или DataProperty, объекту.

При визуализации информации, хранящейся на ресурсе, объекты могут представляться полными или краткими ссылками. Полные ссылки используются для отображения списка объектов заданного класса, краткие — для ссылки на объект при описании другого объекта. Для полных ссылок выделено аннотационное свойство *link*, для кратких — *shortlink*. Значениями этих свойств также являются целые числа, задающие порядок вхождения атрибутов или отношений объекта в ссылку или краткую ссылку. Указание значений для кратких и полных ссылок предполагает вхождение этого свойства в ссылку.

Заключение. В статье рассмотрены вопросы использования паттернов онтологического проектирования для разработки онтологий. Была описана предложенная Ассоциацией ODPА классификация паттернов и подробно рассмотрены авторские паттерны, которые использовались при разработке ряда онтологий.

Использование экспертами и инженерами знаний паттернов онтологического проектирования позволяет сэкономить ресурсы и избежать ошибок при разработке онтологий. На основе паттернов обеспечивается согласованное представление всех сущностей онтологии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-07-00569) и Президиума РАН (проект П.2П/IV.39-1 «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загорулько Г.Б. Разработка онтологии для интернет-ресурса поддержки принятия решений в слабоформализованных областях // Онтология проектирования. 2016. Т. 6, №4(22). С. 485–500. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-485-500.
2. Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б., Шестаков В.К. Подход к разработке информационно-аналитического интернет-ресурса по поддержке принятия решений // Информационные технологии и системы [Электронный ресурс] : тр. Шестой Между-нар. науч. конф., Банное, Россия, 1–5 марта 2017 г. (ИТиС – 2017) : науч. электрон. изд. (1 файл 28,0 Мб) / отв. ред. Ю. С. Попков, А. В. Мельников. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та. 2017. С. 113–116.

3. Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б., Боровикова О.И. Технология создания тематических интеллектуальных научных интернет-ресурсов, базирующаяся на онтологии // Программная инженерия. 2016. № 2. С. 51–60.
4. Ломов П.А. Автоматизация синтеза составных онтологических паттернов содержания // Онтология проектирования. 2016. Т.6, №2(20). С. 162–172. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-162-172.
5. Портал Ассоциации ODPA (Association for Ontology Design & Patterns). Режим доступа: <http://ontologydesignpatterns.org> (дата обращения: 25.04.2017).
6. Проект NeOn. Режим доступа: <http://www.neon-project.org> (дата обращения: 25.04.2017)
7. Antoniou G., Harmelen F. Web Ontology Language: OWL // Handbook on Ontologies. Berlin: Springer Verlag, 2004. Pp. 67–92.
8. Blomqvist E., Hammar K., Presutti V. Engineering Ontologies with Patterns: The eXtreme Design Methodology // Hitzler P., Gangemi A., Janowicz K., Krisnadhi A., Presutti V. (ed.) / Ontology Engineering with Ontology Design Patterns. IOS Press, Studies on the Semantic Web, 2016. Pp. 23–50.
9. Dodds L., Davis I. Linked Data Patterns. 2012. Режим доступа: <http://patterns.dataincubator.org/book> (дата обращения 25.04.2017).
10. Gangemi A. Ontology Design Patterns for Semantic Web Content // Gil Y., Motta E., Ben-jamins V.R., Musen M.A. (eds). The Semantic Web – ISWC 2005. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg. 2005. Vol. 3729. Pp. 262–276.
11. Hammar K. Towards an Ontology Design Pattern Quality Model // Linköping Studies in Science and Technology Linköping University. 2013. Vol. 1606. 159 p.
12. Hitzler P., Krötzsch V., Rudolph S. Foundations of Semantic Web Technologies. Chapman & Hall/CRC. 2009. 455 p.
13. Karima N., Hammar K., Hitzler P. How to Document Ontology Design Patterns // 7th Workshop on Ontology and Semantic Web Patterns (WOP2016). IOS Press. Kobe. Japan. 2016. In Proceedings of the 7th Workshop on Ontology and Semantic Web Patterns (WOP 2016). CEUR Workshop Proceedings. 2016.
14. Ontology Engineering with Ontology Design Patterns: Foundations and Applications. Studies on the Semantic Web / Hitzler P., Gangemi A., Janowicz K., Krisnadhi A., Presutti V. (eds.) IOS Press/AKA. 2016.
15. Ontology Design Patterns (ODPs) Public Catalog. Режим доступа: <http://odps.sourceforge.net> (дата обращения: 25.04.2017)

UDK 004.822:004.89

**USE OF PATTERNS FOR THE DEVELOPMENT OF THE ONTOLOGY FOR THE
INFORMATION-ANALYTICAL INTERNET RESOURCE "DECISION SUPPORT"**

Olesya I. Borovikova

Junior Researcher, e-mail: olesya@iis.nsk.su

Galina B. Zagorulko

Researcher of Laboratory "Artificial Intelligence", e-mail: gal@iis.nsk.su

Yury A. Zagorulko

Dr., Head of Laboratory "Artificial Intelligence", e-mail: zagor@iis.nsk.su

Vladimir K. Shestakov

Junior Researcher, e-mail: shestakov@iis.nsk.su

A.P. Ershov Institute of Informatics Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6, Acad. Lavrentjev pr., 630090, Novosibirsk, Russia

Abstract. The paper discusses the use of patterns of ontological design that allow us to describe both the typical and specific problems arising in the development of ontologies, as well as the recommendations and agreements proposed by the developers for their solution. The description of problems and patterns proposed for their solution is given on the example of the development of an ontology for the information-analytical Internet resource "Decision support".

Keywords: Ontology, ontology development, ontology design patterns, decision support

References

1. Zagorulko G.B. Razrabotka ontologii dlja internet-resursa podderzhki prinjatija reshenij v slaboformalizovannyh oblastjah [Development of ontology for intelligent scientific internet resource decision-making support in weakly formalized domains] // Ontologija proektirovanija = Ontology of Designing. 2016. v. 6, № 4(22). Pp. 485–500. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-485-500 (in Russian)
2. Zagorulko Yu.A., Zagorulko G.B., Shestakov V.K. Podhod k razrabotke informacionno-analiticheskogo internet-resursa po podderzhke prinjatija reshenij [Approach to the development of information-analytical internet resource on decision support] // «Информационные и математические технологии в науке и управлении» 2017 № 3 (7)

- Informacionnye tehnologii i sistemy: tr. Shestoj Mezhdunar. nauch. konf., Rossiya, 1–5 marta 2017. = Information technologies and systems: proceedings of sixth international scientific conference. (1–5 March 2017, Chelyabinsk, Russia). Pp. 113–116 (in Russian)
3. Zagorulko Yu.A., Zagorulko G.B., Borovikova O.I. Tehnologija sozdaniya tematicheskikh intellektual'nyh nauchnyh internet-resursov, bazirujushhajasja na ontologii [Technology for building subject-based intelligent scientific internet resources based on ontology] // Programnaja inzhenerija = Software Engineering. 2016. № 2. Pp. 51–60 (in Russian)
4. Lomov P.A. Avtomatizacija sinteza sostavnyh ontologicheskikh patternov sodержaniya [Automation of synthesis of composite content ontology design pattern] // Ontologija proektirovaniya = Ontology of Designing. 2016. v.6. № 2(20). Pp. 162–172. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-162-172 (in Russian)
5. Association ODPa portal (Association for Ontology Design & Patterns). Available at: <http://ontologydesignpatterns.org> (last accessed 25.04.2017).
6. NeOn project. Available at: <http://www.neon-project.org> (last accessed 25.04.2017).
7. Antoniou G., Harmelen F. Web Ontology Language: OWL // Handbook on Ontologies. Berlin: Springer Verlag. 2004. Pp. 67–92.
8. Blomqvist E., Hammar K., Presutti V. Engineering Ontologies with Patterns: The eXtreme Design Methodology // Hitzler P., Gangemi A., Janowicz K., Krisnadhi A., Presutti V. (ed.) / Ontology Engineering with Ontology Design Patterns. IOS Press. Studies on the Semantic Web. 2016. Pp. 23–50.
9. Dodds L., Davis I. Linked Data Patterns. 2012. Available at: <http://patterns.dataincubator.org/book> (last accessed 25.04.2017).
10. Gangemi A. Ontology Design Patterns for Semantic Web Content // Gil Y., Motta E., Ben-jamins V.R., Musen M.A. (eds). The Semantic Web – ISWC 2005. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg. 2005. Vol. 3729. Pp. 262–276.
11. Hammar K. Towards an Ontology Design Pattern Quality Model // Linköping Studies in Science and Technology Linköping University. 2013. Vol. 1606. 159 p.
12. Hitzler P., Krötzsch V., Rudolph S. Foundations of Semantic Web Technologies. Chapman & Hall/CRC. 2009. 455 p.
13. Karima N., Hammar K., Hitzler P. How to Document Ontology Design Patterns // 7th Workshop on Ontology and Semantic Web Patterns (WOP2016). IOS Press. Kobe. Japan. 2016.

In Proceedings of the 7th Workshop on Ontology and Semantic Web Patterns (WOP 2016).
CEUR Workshop Proceedings. 2016.

14. Ontology Engineering with Ontology Design Patterns: Foundations and Applications.
Studies on the Semantic Web / Hitzler P., Gangemi A., Janowicz K., Krisnadhi A., Presutti V.
(eds.) IOS Press/AKA. 2016.

15. Ontology Design Patterns (ODPs) Public Catalog. Available at: <http://odps.sourceforge.net>
(last accessed 25.04.2017).

УДК 004.912, 004.82

**ПОДХОД К РАЗРЕШЕНИЮ РЕФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ
ТЕКСТА ПРИ ПОПОЛНЕНИИ ОНТОЛОГИИ**

Сидорова Елена Анатольевна

К.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: lsidorova@iis.nsk.su

Гаранина Наталья Олеговна

К.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: garanina@iis.nsk.su

Кононенко Ирина Семеновна

Н.с., e-mail: irina_k@cn.ru

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН,
630060 г. Новосибирск, пр. Лаврентьева 6

Аннотация. Предлагается подход к разрешению референциальной неоднозначности, возникающей в процессе автоматического анализа текста и извлечения информации при пополнении онтологии предметной области. Предложена модель разрешения референции, рассмотрены меры близости между потенциальными кореферентами, построенными на основе текстовых и семантических референциальных факторов, и предложен онтологический подход к формированию кандидатов и выбору наилучшего претендента.

Ключевые слова: пополнение онтологии, семантический анализ текста, извлечение информации, разрешение кореференции, референциальные факторы, мера близости

Введение. Разрешение референциальной неоднозначности при анализе текста – одна из самых сложных задач компьютерной лингвистики, решение которой востребовано в таких областях, как машинный перевод, вопросно-ответные системы, автоматическое реферирование текста, извлечение информации. Суть явления референции заключается в сопоставлении языковым выражениям, представленным в линейном тексте или диалоге, сущностей или событий в реальном мире. Можно выделить два основных класса референциальных выражений: полные лексические наименования (именные группы или имена собственные) и редуцированные (выражаемые, например, местоимениями). Задача разрешения кореференции состоит в отождествлении упомянутых в тексте реальных объектов в ситуации их повторного упоминания. При этом в первом случае необходимо

непосредственное сравнение объектов, а во втором – поиск соответствующего тождественного выражения в контексте с учетом различных синтаксических, семантических и прагматических факторов, т.е. установление анафорической связи редуцированного выражения с антецедентом.

Задача разрешения анафоры и кореференции активно исследуется с 1960-х годов, но до сих пор в полной мере не решена. Базовым подходам к решению данной задачи посвящены обзоры Р. Миткова [12, 13] и более поздние [8, 15]. Одна из классификаций систем разрешения кореференции основана на типах используемых знаний. В отношении используемых знаний о предметной области и языке Р. Митков противопоставляет бедные относительно используемых знаний (knowledge-poor) подходы 90-х годов более ранним (knowledge-rich) подходам [11]. Системы 90-х годов ограничиваются морфологической и в ряде случаев синтаксической информацией, достигая высокой эффективности без использования семантики и знаний о мире. Следует отметить, что наряду с упомянутыми ранними системами некоторые современные исследования привлекают дополнительную информацию о предметной области, используя FrameNet, WordNet и другие тезаурусы, Википедию, онтологии, такие как Yago and DBpedia, семантический анализ и анализ дискурса, сложные механизмы вывода. Так, в работе [14] описывается система разрешения кореференции на основе машинного обучения, которая использует семантические признаки из различных источников (WordNet, Википедия), а также информацию о семантических ролях. Информация из WordNet позволяет определить наличие прямой семантической связи (синонимия, гиперонимия) либо косвенной связи между кандидатом в антецеденты и референциальным выражением. В [15] показывается, что учет семантических признаков позволяет улучшить результаты в отношении таких типов референциальных выражений, как местоимения и имена нарицательные.

В данной работе мы предлагаем подход к разрешению кореференции в процессе извлечения информации на основе заданной онтологии предметной области.

1. Кореференция в задачах извлечения информации. Референция в лингвистике — это отнесение текстового выражения к внеязыковому объекту или ситуации реального или абстрактного (вымышленного) мира. Сам внеязыковой объект, с которым соотносится текстовое выражение, называется его референтом. Референция может осуществляться к определенному, единичному предмету (*моя лошадь*), к неопределенному предмету (*я хочу купить лошадь*), ко множеству (*лошади нашего питомника*) или всему классу объектов в целом (*лошадь – полезное животное*). В контексте автоматического анализа текста и

извлечения информации референциальные аспекты рассматривают обычно в связи с задачей разрешения кореференции или установления референциального тождества между текстовыми выражениями [7]. В работе [4] выделяются три группы ситуаций, в которых может быть представлено отношение кореференции:

- отношение кореференции в пределах предложения;
- анафорическое замещение при сочинении простых предложений;
- анафорическое замещение в цепочке отдельных предложений текста.

Решение первых двух задач осуществляется на основе синтаксического разбора предложения, для решения третьей применяются различные методы, в том числе на основе машинного обучения [10].

Мы рассматриваем задачу извлечения информации как задачу выявления объектов заданной предметной области (ПО) и их связей. Для описания ПО используется онтология, которая содержит классы понятий, где каждый класс задается именем и набором атрибутов, и отношения между классами понятий. В упрощенном виде онтология O – это тройка вида $\langle C, R, A \rangle$, где C – множество классов, описывающих понятия ПО, R – множество бинарных отношений, заданных на классах (понятиях), A – множество атрибутов, принимающих значения из соответствующих доменов.

При *пополнении онтологии* требуется установить референциальные отношения между всеми найденными в процессе анализа текста языковыми выражениями, описывающими тот или иной объект действительности, и экземплярами информационного контента онтологии, которые мы будем считать *референтами*. Если какой-либо найденный объект отсутствует в информационном контенте онтологии, то он должен содержать достаточное количество данных для идентификации в БД, т.е. должен обладать достаточной различительной способностью. С этой целью для каждого понятия выделяется подмножество ключевых атрибутов $A^k \subseteq A$ и ключевых отношений $R^k \subseteq R$, которые обеспечивают уникальность объектов в онтологии. Подход к идентификации и добавлению объектов в онтологию после основного семантического анализа текста был нами предложен в работе [5]. Однако столь позднее разрешение референции приводит к потере полезной информации, которую можно было бы извлечь из текста на стадии семантического анализа. В данном исследовании мы развиваем идею применения семантики предметной области для разрешения проблем референции и пытаемся на стадии семантического анализа выделить потенциальных кореферентов и предложить способ оценки *кореференциальной близости* для вычисления наиболее подходящих вариантов на основе онтологии.

Модель разрешения референции можно описать системой следующего вида:

$\langle O, IO, CO, LO, Sem, Cor, Ref \rangle$, где

O – онтология предметной области;

IO – информационный контент онтологии, содержащий множество онтологических объектов – экземпляров понятий и отношений онтологии;

LO – множество лексических объектов, найденных в тексте на основе семантического словаря;

CO – объектное покрытие текста, включающее множество информационных объектов, найденных в тексте:

- $CurRef \subseteq CO$ – подмножество объектов, которые нуждаются в «уточнении» и поиске предшествующего упоминания (кореферента) данного объекта;
- $CandCoR \subseteq CO$ – подмножество объектов, которые являются кандидатами на роль кореферента какого либо объекта $a_i \in An$;

$Sem: LO \rightarrow CO$ – множество отношений между лексическими объектами, найденными в тексте и информационными объектами, описываемыми в тексте [6];

$Cor: CurRef \rightarrow CandCoR \times W$ – множество взвешенных отношений кореференции между текущим референтом и кандидатом на роль кореферента;

$Ref \subseteq IO \times 2^{CO}$ – отношение референции, задающее соответствие между объектом, найденным в тексте $so \in CO$, и объектом информационного контента онтологии $io \in IO$.

В соответствии с данной моделью задача извлечения информации из текста заключается в построении множества Ref для заданного текста, а задача разрешения кореференциальной неоднозначности сводится к вычислению отношения Cor .

В рамках данной работы мы рассматриваем одну из ключевых проблем референциальной неоднозначности – установление кореферентных отношений между найденными в тексте объектами. За рамками рассмотрения останутся такие вопросы, как разрешение местоименной анафоры, восстановление полностью редуцированных объектов (эллипсис) и др. Несмотря на важность этих проблем, с точки зрения нашей постановки задачи они являются предварительными и могут решаться на начальных этапах обработки текста без привлечения онтологических знаний. Отметим, что обычно при извлечении информации опираются на семантический словарь (например, тезаурус ПО), на основе которого с той или иной степенью общности может быть восстановлен онтологический класс объекта или отношения, описываемого термином словаря. В случае анафорической

лексики (наречия, местоимения) восстановление класса объекта возможно на основе различных синтаксических показателей (согласования, управления).

В процессе извлечения информации на основе установленных кореферентных отношений осуществляется передача данных от одного информационного объекта к другому, что, в свою очередь, позволяет использовать эти данные при поиске новой информации. Мы предлагаем рассматривать всех кандидатов на роль кореферента и устанавливать взвешенные кореферентные отношения, вычисление веса которых опирается на различные референциальные факторы. Таким образом, каждому извлекаемому факту будет сопоставляться оценка, которая будет использоваться после основного анализа для разрешения конфликтов, связанных как с лексической, синтаксической и семантической неоднозначностью текста [2], так и при выборе наилучшего кандидата на роль кореферента.

2. Референциальные факторы. Рассмотрим факторы, которые влияют на оценку степени или меры референциальной связности между двумя объектами.

Выделяются два типа факторов:

- текстовые факторы определяются способом выражения объектов в тексте, их расположением относительно структуры тексты и относительно друг друга,
- семантические факторы определяют оценки схожести объектов по их онтологическим признакам и связям.

Для каждого фактора формулируется мера или оценка расстояния $w_i(a,b)$, которая отражает степень или вероятность наличия кореферентной связи между объектами a и b в зависимости от фактора i без учета других факторов.

С практической точки зрения, прежде чем вычислять меру близости объектов, полезно сформировать гипотезы о наличии кореферентной связи, т.е. ограничить количество рассматриваемых пар. Формирование гипотез можно условно разделить на два этапа.

1. Выявление объектов, которые являются "отсылками" или упоминаниями других объектов, описанных в тексте ранее (или, в редких случаях, позднее). Будем считать объект *отсылкой*, если у него не заполнены его ключевые атрибуты и связи. Такой объект нуждается в поиске более "точного" упоминания объекта (более заполненного или дополняющего данный).
2. Генерация для каждой отсылки множества *кандидатов* на роль кореферента. Мы предлагаем следующие ограничения для генерации этого множества:
 - объекты должны быть онтологически непротиворечивы,
 - текстовое расстояние между объектами должно быть ограничено.

Первый вид ограничения определяется иерархией классов онтологии и набором значений атрибутов объектов. Ограничения на расстояние могут зависеть как от класса объекта, так и от жанра рассматриваемого текста, поэтому было принято решение сделать данное ограничение настраиваемым экспертом.

Общая мера близости между отсылкой и кандидатом вычисляется как сумма мер учитываемых факторов $w_i(a,b)$ с коэффициентами их влияния на общий результат k_i :

, где n – количество учитываемых факторов.

Разрешение референциального конфликта или выбор наиболее подходящего кандидата осуществляется при следующем условии: $w(a,c) > w(b,c)$, где a и b – конфликтующие объекты-кандидаты на роль кореферента к объекту c .

Отметим, что в отличие от анафорических связей, кореферентная связь является симметричной, поскольку оба объекта в данной связи претендуют быть референтными одному и тому же объекту внешнего мира. Как следствие, информация передается в обе стороны, независимо от того, является ли языковое выражение, лежащее в основе объекта, отсылкой (упоминанием) или более полно выраженным кореферентом.

2.1. Текстовые факторы. Когда семантической информации, содержащейся в объекте, оказывается недостаточно для установления референта, начинается поиск кореферентов, который в первую очередь опирается на такие текстовые факторы, как расстояние между объектами и их грамматическая согласованность. Текстовые факторы широко рассматриваются в различных исследованиях анафоры [10]. Мы взяли наиболее распространенные факторы, применимые в рамках нашего подхода.

А. Расстояние между объектами. Расстояние может измеряться в символах, словах, знаках-разделителях, сегментах заданного типа (например, предложения, абзацы, заголовки), значимых объектах и др. Значение данной меры будет тем больше, чем ближе по тексту расположены объекты. Рассмотрим ее на примере сегментного расстояния:

, где s_x – порядковый номер сегмента типа s в тексте, в котором расположен объект x .

Б. Согласованность объектов по грамматическим характеристикам. В первую очередь рассматриваются такие характеристики, как часть речи, род, число и падеж. Для сравнения используются термины, являющиеся синтаксической вершиной языкового выражения, сопоставленного каждому объекту. Согласованность характеристик (это необязательно их совпадение) повышает степень «похожести» объектов.

, где $n > 0$ – количество сравниваемых характеристик (зависящих от части речи кандидата), $sim^G(a,b)$ – количество согласующихся грамматических характеристик.

В. Конфликтная мера – специализированный показатель количества кандидатов на роль кореферента с учетом их текстового расположения. Чем больше кандидатов находится между объектами, тем меньше данный показатель.

,

, где

$CandCoR(b)$ – множество кандидатов на роль кореферента объекта b , таких, что между ними нет собственных кореферентных или зависимостных связей,

$pos(x)$ – текстовая позиция языкового выражения, сопоставленного объекту x .

Продemonстрируем вычисление текстовых мер на примере фрагмента текста:

Станция будет вырабатывать тепловую энергию для Кызыла и пригородов столицы.

Рассматриваются три географических объекта: a - Кызыл, b - пригороды, c - столица.

$des(\text{Sentence}, a, b) = des(\text{Sentence}, a, c) = 1$; $w^G(a, b) = 0.75$; $w^G(a, c) = 1$;

$w^C(a, b) = 1$; $w^C(a, c) = 1$ (поскольку между b и c есть зависимость).

2.2. Семантические факторы. Семантические факторы – это факторы, зависящие от понимания текста человеком или машиной. Сложность учета таких факторов связана с необходимостью использования моделей знаний о языке и особенностях его функционирования в заданной предметной области. Наш подход опирается в первую очередь на онтологическую модель предметной области, позволяющую на основании семантического словаря и связи терминов с понятиями онтологии строить онтологические объекты и сравнивать их.

А. Онтологическая близость информационных объектов. Данная мера позволяет определить степень «похожести» объектов по онтологическим характеристикам, таким как:

- общность класса (совпадение или наследование),
- непротиворечивость значений ключевых атрибутов,
- количество совпадающих значений атрибутов,
- количество совпадающих и семантически близких экземпляров отношений.

Для генерации гипотез важна *непротиворечивость* характеристик объектов, под которой понимается следующее.

Пусть даны объекты a и b классов c_a и c_b , для которых заданы наборы ключевых атрибутов $At_{c_a}^k(a)$ и $At_{c_b}^k(b)$, соответственно. Тогда a и b считаются непротиворечивыми, если

$c_a = c_b$ или (c_a родитель c_b) или (c_b родитель c_a), и

$\forall at^k \in At_{ca}^k \cap At_{cb}^k$, если $at^k(a) \neq \emptyset \& at^k(b) \neq \emptyset$ то $at^k(a) \cap at^k(b) \neq \emptyset$

Т.е. классы объектов должны находиться на одной ветке иерархии и значения ключевых атрибутов должны совпадать (хотя бы частично). Так, например, *девочка Саша* и *мальчик Саша* будут противоречивы, а *девочка Саша* и *первоклассница* – непротиворечивы.

Для созданных кандидатов вычисление онтологической меры близости осуществляется по формуле, включающей оценки близости атрибутов и связей:

где

k^A, k^R – коэффициенты значимости близости атрибутов sim^A и связей объектов sim^R .

Оценка близости атрибутов объектов вычисляется по формуле:

, где

$Val(a), Val(b)$ – множество значений атрибутов объектов a и b , соответственно (в случае, если у одного из объектов значения атрибутов не заданы, то).

Оценка близости объектов по связи вычисляется в зависимости от того, является ли она ключевой для данного класса объектов (как, например, отношение *Автор* для класса *Публикации*) или нет.

Количество похожих связей заданного типа r определяется с учетом множеств кореферентов для связываемых объектов:

, где

$coR(r(x))$ – множество кандидатов-кореферентов объектов, связанных с объектом x отношением r .

Меры близости по ключевым связям вычисляются аналогично атрибутам. В случае, если , то мера будет равна 0, иначе

, где

$R^k(x)$ – множество ключевых отношений объекта x .

Для остальных отношений (если они определены у объектов) мера определяется количеством похожих связей – чем их больше, тем лучше:

, где

$r_i(x)$ – множество связей типа r_i объекта x .

Так, например, две публикации одного автора будут иметь значение близости по ключевым связям, равное 1. Если при этом у одной из публикаций будет два автора, то значение близости уже будет $0.5(1+0.5) = 0.75$. Если отношение авторства не является ключевым, то в обоих случаях значение близости будет 0.75.

Общая оценка онтологической близости относительно связей объектов будет вычисляться следующим образом:

.

Б. Одним из факторов, указывающим на близость объектов, является схожесть их ролей в ситуациях, описываемых набором онтологических отношений. Мы назвали этот фактор *семантическим параллелизмом*, по аналогии с явлением синтаксического параллелизма, рассматриваемым в лингвистике [3]. Фактор параллелизма действует не для всех классов, а только для классов, описывающих определенные типы ситуаций. Если существуют экземпляры одного класса (где класс описывает некоторую ситуацию), у которых рассматриваемый кандидат на роль кореферента и сам объект заполняют один и тот же атрибут, то оценка их семантической схожести будет больше.

, где

$C_i(x)$ – множество экземпляров класса c_i , связанных с объектом x каким-либо отношением, а $Rel(C_i(x))$ – это множество имен этих отношений,

k_i^{par} – коэффициенты, регулирующие применимость параллелизма относительно класса C_i .

Если будут найдены дополнительные факторы похожести между объектами $C_i(a)$ и $C_i(b)$, то степень близости еще более усилится, как например, в следующей ситуации:

$a = \text{Персона}(\dots, \text{Работает_в: Учреждение}(\text{институт_X})),$

$b = \text{Персона}(\dots, \text{Работает_в: Лаборатория}(\text{лаб_III})),$

$\text{институт_X} = \text{Учреждение}(\dots, \text{Включает: } \{ \text{Лаборатория}(\text{лаб_III}), \dots \}).$

Условием наличия дополнительных усиливающих факторов будет наличие общего информационного контекста объектов $C_i(a)$ и $C_i(b)$:

, где

(X) – множество связанных с объектами $x \in X$ объектов, полученных в результате основного анализа текста.

Мера близости для уточняющего семантического параллелизма вычисляется как:

.

Установим $k^{par} = 0.5$, тогда в указанном примере .

Общая оценка меры близости на основании семантического параллелизма осуществляется по формуле:

.

В. Интересным фактором, на наш взгляд, является схожесть объекта с кандидатом, находящимся в фокусе внимания. Фокус внимания рассматривается, например, в теории риторических структур [9], в рамках которой вводятся понятия риторического расстояния и коэффициента внимания. Однако в данных работах этот вопрос рассматривается с точки зрения задачи синтеза текста, тогда как в нашем случае необходимо выявление объекта, находящегося в фокусе внимания.

Мы предлагаем следующую практическую интерпретацию данного понятия. *Фокус внимания* какого-либо объекта – это фрагмент текста, в рамках которого оценка расстояния до данного объекта будет считаться равной 1. Фрагмент будет выражаться в терминах количества сегментов определенного класса до и/или после фокусного объекта.

Фокус внимания имеет смысл рассматривать только для предполагаемых кореферентов. Таким образом, если в фокусе внимания какого-либо объекта находится подходящий по онтологическим характеристикам объект, то будет выдвигаться гипотеза о наличии кореферентной связи между объектами. Отличительной особенностью данной связи будет то, что оценка расстояния между объектами будет $w^S(a,b) = 1$.

Пока мы не берем на себя смелость автоматически выявлять фокусные объекты и границы их влияния, вместо этого мы предоставляем возможность эксперту указать самостоятельно условия, при которых объекты определенных классов станут фокусными и задать тип сегментов, их количество и направление, которые будут определять область влияния.

Приведем примеры, демонстрирующие данную возможность:

- 1) объект одного из классов онтологии *Событие/Геогр.Место/Участник_события* в заголовке (названии) новости является фокусным для всей новости. Помимо заголовка, выделенной позицией для фокуса является начало всего текста или эпизода. Так, в [1] отмечается, что для интродуктивной номинации в кратких новостных сообщениях характерно использование позиции именной группы в тема-рематической структуре высказывания. При этом один из объектов внимания – семантический фокус всего текста – нередко помещается в позицию тем;
- 2) объект одного из классов онтологии *Проект/Объект_исследования/Научный_метод* в названии, аннотации или списке ключевых терминов к научной статье является фокусным для всей статьи;
- 3) *Организация* в шапке письма – фокусная для всего текста письма и т.п.

3. Разрешение референции при пополнении онтологии. Разрабатываемый в нашей лаборатории подход к анализу текста и извлечению информации из него [2] опирается на

словари предметной лексики, знания о предметной области и ее языке, а также о жанрах документов. Знания, поступающие на вход основного компонента анализа, фиксируются в виде моделей фактов, отражающих различные способы представления информации, принятые в данной предметной области, и обеспечивающих фиксацию найденной информации в формате онтологии. Семантический анализатор строит на основе этих моделей правила преобразования данных, которые обеспечивают извлечение информации и построение семантической сети информационных объектов.

Таким образом, до сих пор решение задачи разрешения кореференции возлагалось либо на механизм описания моделей фактов (т.е. полностью на пользователя-лингвиста), либо на этап пополнения онтологии, когда при выгрузке полученных результатов каждый найденный объект соотносился с уже имеющейся в БД информацией.

В общем случае кореференцию желательно разрешать в тот момент, когда соответствующая ситуация встретилась решателю. Своевременное разрешение кореференции позволило бы, с одной стороны, снимать неоднозначность, с другой, – обеспечивая целостность извлекаемой информации, избегать потери информации о связях с объектами, выраженными редуцированно. Однако на практике существующие методы этого не обеспечивают. Кроме того, большинство методов лингвистического разрешения кореференции опираются на полный синтаксический анализ (неявно считая, что он произведен полностью и корректно) со снятой лексической и синтаксической неоднозначностью.

Идея предлагаемого подхода заключается в построении такой технологии, которая бы в процессе семантического анализа текста выявляла случаи редукции семантического объекта и предлагала всех возможных кандидатов-кореферентов на основе их семантической близости в смысле онтологии. После завершения анализа для всех кандидатов осуществлялось бы вычисление меры (или набора мер) кореференциальной близости в соответствии с заданными критериями. Полученные веса могли бы в дальнейшем использоваться как для выбора наилучшего кандидата на роль кореферента, так и для разрешения других видов неоднозначности текста.

В соответствии с данным подходом выделены предварительный этап, целью которого является начальная инициализация системы разрешения референциальной неоднозначности, и основной этап, на котором осуществляется непосредственное разрешение кореференции и установление референтов.

А. Задачами предварительного этапа являются:

- а) построение множества информационных объектов на основе терминологического покрытия текста;
 - б) выявление объектов, параметры которых необходимо уточнить для обеспечения корректного пополнения контента онтологии;
 - с) построение множества кандидатов на роль кореферентов выявленных объектов.
- 2) Задачами основного этапа являются:
- а) вычисление мер близости кандидатов;
 - б) передача информации между кореферентами с учетом вычисленных мер и применение правил извлечения информации на обновленных данных;
 - с) разрешение лексических, синтаксических, семантических и кореферентных конфликтов.
- 3) Завершающий этап заключается в поиске референтов в информационном контенте онтологии и ее пополнении.

Заключение. Рассматриваемый подход к разрешению референциальной неоднозначности при анализе текста обладает следующими особенностями:

- семантичность, подход опирается на семантические методы и модели, в первую очередь, – на онтологию предметной области, относительно которой решаются задачи извлечения информации, снятия неоднозначности и разрешения кореференции;
- масштабируемость, подход к разрешению кореференции расширяем относительно правил извлечения информации и референциальных факторов;
- предлагаемый подход ориентирован на полностью автоматическую обработку и не требует на входе «правильных» результатов морфологического анализа, отсутствия грамматических ошибок и полного синтаксического разбора предложений; создаваемая система ориентирована на работу в рамках реальных условий множества конфликтов, полученных на всех этапах обработки текста (речи);
- интеграция статистических и лингвистических моделей и методов анализа текста на этапе семантической обработки. Так, для разрешения кореференции устанавливаются взвешенные кореферентные связи между объектами, при этом гипотезы (связи) формируются на основе лингвистической модели, а разрешение (выбор наилучшей гипотезы) – на основе статистических данных.

За рамками рассмотрения остались вопросы алгоритмической реализации и апробации предложенных моделей, над которыми в данный момент ведется активная работа.

Проблема разрешения референции – одна из самых сложных и пока недоступных пониманию вычислительными устройствами задач, содержащая множество аспектов. В

данной статье мы коснулись лишь вершины айсберга, и нам хотелось бы продолжить исследования в следующих направлениях:

- исследование значимости референциальных факторов при оценке близости в зависимости от различных предметных областей и жанров текста (планируется провести сравнение таких жанров, как техническая документация, новостные сообщения, научный текст);
- исследование применимости предлагаемых методов для других видов референциальных связей, таких как элемент-множество, элемент-класс, ассоциативная отсылка и др.;
- исследование применимости метода для редуцированных форм анафоры (местоимённой анафоры, эллипсиса).

Авторы выражают благодарность фонду РФФИ (проект №15-07-04144) и Президиуму РАН (проект П.2П/IV.39-1 «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы») за частичную финансовую поддержку выполненных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бонч-Осмоловская А.А., Клинец В.П., Толдова С.Ю. Стратегии интродуктивной номинации в текстах // Актуальные инновационные исследования: наука и практика. Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина. Электрон. журн. 2012. №3. Режим доступа: http://www.actualresearch.ru/nn/2012_3/Article/philology/Bonch-Osmolovskaja20123.pdf (дата обращения 01.04.2017).
2. Гаранина Н.О., Сидорова Е.А. Пополнение онтологий на основе алгебраического формализма информационных систем и мультиагентных алгоритмов анализа текста // Программирование. МАИК «Наука/Интерпериодика». 2015. № 3. С. 32–43.
3. Каменская М.А., Храмоин И.В. Влияние семантических признаков на качество разрешения местоименной анафоры // III Всерос. научная конференция молодых ученых с международным участием «Теория и практика системного анализа»: труды. Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева. 2014. Т. II. С. 157–163.
4. Кобзарева Т.Ю. Проблема кореференции в рамках поверхностно-синтаксического анализа русского языка // Межд. конференция Диалог'2003 по компьютерной лингвистике и интеллектуальным технологиям: труды. М.: Наука. 2003. С. 278–284.

5. Серый А.С., Сидорова Е.А. Поиск референциальных отношений между информационными объектами в процессе автоматического анализа документов // XIV Всерос. научная конференция RCDL-2012 «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции»: труды. Переславль-Залесский. 2012. С.°206–212.
6. Сидорова Е.А. Модель извлечения знаний: от текста к структурированной информации // XX Байкальская Всерос. конференция «Информационные и математические технологии в науке и управлении»: труды. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2015. Т. III. С. 151–159.
7. Сулейманова Е.А., Трофимов И.В. Референциальный профиль как инструмент для исследования референции в связном тексте // Программные системы: теория и приложения. 2015. № 1(24). С. 73–82.
8. Elango P. Coreference Resolution: A Survey // Technical Report. UW-Madison. 2006. Available at: https://ccc.inaoep.mx/~villasen/index_archivos/corsoTATII/EntidadesNombradas/Elango-SurveyCoreferenceResolution.pdf, accessed 01.04.2017.
9. Kibrik A.A. Anaphora in Russian narrative discourse: A cognitive calculative account // In B. Fox (ed.) Studies in anaphora. Amsterdam. 1996. Pp. 255–304.
10. Kibrik A.A., Dobrov G.B., Khudyakova M.V., Loukachevitch N.V., Pechenyj A. A corpus-based study of referential choice: Multiplicity of factors and machine learning techniques, Text processing and cognitive technologies // Cognitive modeling in linguistics: Proceedings of the 13th International Conference. Corfu. 2013. Pp. 118–126.
11. Mitkov R. Robust pronoun resolution with limited knowledge // Proceedings of the 18th International Conference on Computational Linguistics 1998 (Montreal). Pp. 869–875.
12. Mitkov R. Anaphora resolution: the state of the art // Working paper (based on the COLING'98/ACL'98 tutorial on anaphora resolution). Wolverhampton. 1999. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/e782/00b1e3ba2a72de1ca9b9b2c5efa775151bfa.pdf>, accessed 01.04.2017.
13. Mitkov R. Anaphora resolution. Mitkov R. (ed.) The Oxford handbook of computational linguistics, ch.14, N.Y.: Oxford university press. 2003. Pp. 266–283.
14. Ponzetto S.P., Strube M. Exploiting semantic role labeling, wordnet and wikipedia for coreference resolution // In Proceedings of Human Language Technology Conference of the North

American Chapter of the Association of Computational Linguistics, Association for Computational Linguistics, 2006, Pp. 192—99.

15. Prokofyev R., Tonon A., Luggen M., Vouilloz L., Difallah D.E., Cudr'e-Mauroux P. SANAPHOR: Ontology-Based Coreference Resolution // In Lecture Notes in Computer Science, Volume 9366, 14th International Semantic Web Conference, Proceedings. 2015. Part^oI. Pp. 458–473.

UDK 004.912, 004.82

APPROACH TO TEXTUAL REFERENCE AMBIGUITY RESOLUTION IN THE PROCESS OF ONTOLOGY POPULATION

Elena A. Sidorova

Dr., Senior researcher, e-mail: lsidorova@iis.nsk.su

Natalia O. Garanina

Dr., Senior researcher, e-mail: garanina@iis.nsk.su

Irina S. Kononenko

Researcher, e-mail: irina_k@cn.ru

A.P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS,

6, Acad. Lavrentjev pr., Novosibirsk 630090

Abstract. The paper proposes an approach to reference ambiguity resolution in the process of automatic text analysis for information extraction and subject ontology population. The model of coreference resolution is considered and measures of coreferential similarity between potential coreferents described. Similarity measures are based upon textual and semantic referential factors. An ontological approach underlies the formation of set of plausible candidates for coreference and the choice of best candidate.

Keywords: information extraction, ontology population, semantic text analysis, information extraction, coreference resolution, referential factors, referential similarity measure

References

1. Bonch-Osmolovskaia, A.A., Clintcov, V.P., Toldova S.Iu. Strategii introduktivnoi nominacii v tekstakh [Strategy introductive nomination in the texts] // Aktual'nye innovacionnye issledovaniya: nauka i praktika = Topical innovation issues: research & implementation. Tambov State University named GR. Derzhavin Publ. Electronic journal. 2012. №3. A v a i l a b l e at:http://www.actualresearch.ru/nn/2012_3/Article/philology/Bonch-Osmolovskaja20123.pdf, accessed 01.04.2017. (in Russian)
2. Garanina N.O., Sidorova E.A. Popolnenie ontologij na osnove algebraicheskogo formalizma informacionnyh sistem i mul'tiagentnyh algoritmov analiza teksta [Ontology population as algebraic information system processing based on multi-agent natural language text analysis algorithms] // Programmirovanie = Programming and Computer Software. Nauka Publ. 2015. № 3. Pp. 32–43. (in Russian)
3. Kamenskaya M.A., Hramoin I.V. Vliyanie semanticheskikh priznakov na kachestvo razresheniya mestoimennoj anafory [The effect of semantic characteristics on the quality of the resolution of pronominal anaphora] // III Vseros. nauchnaja konferencija molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem «Teorija i praktika sistemnogo analiza»: trudy = III All-Russian scientific conference of young scientists with international participation "Theory and practice of systems analysis": proceedings. Rybinsk. RGATU Publ. 2014. Part II. Pp. 157–163. (in Russian)
4. Kobzareva T. Problema koreferencii v ramkah poverhnostno-sintaksicheskogo analiza russkogo yazyka // Mezhd. konferencija Dialog'2003 po komp'juternoj lingvistike i intellektual'nym tehnologijam: trudy = International. conference Dialogue'2003 on computer linguistics and intellectual technologies: proceedings. Moscow. Nauka = Science. 2003. Pp. 278–284. (in Russian)
5. Seryj A.S., Sidorova E.A. Poisk referencial'nyh otnoshenij mezhdru informacionnymi ob'ektami v processe avtomaticheskogo analiza dokumentov [Searching referential relationships between the information objects during the automatic document processing] // Trudy XIV Vserossijskoj nauchnoj konferencii RCDL-2012 Elektronnye biblioteki: perspektivnye metody i tekhnologii, ehlektronnye kollekcii = Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies. Pereslavl'-Zalesskij. 2012. Pp. 206–212. (in Russian)
6. Sidorova E.A. Model izvlecheniia znani: ot teksta k strukturirovannoi informatcii [Model of knowledge extraction: from text to structured information] // XX Bajkal'skaja Vserossijskaja konferencija «Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii»: trudy = XX Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management": proceedings. Irkutsk. MESI SB RAS. 2015. № 3. Pp. 151–159. (in Russian)

7. Suleimanova E.A., Trofimov I.V. Referencialnyi profil kak instrument dlia issledovaniia referentcii v sviaznom tekste [Referential profile – a tool for studying reference in discourse] // Programmnye sistemy: teoriia i prilozheniia = Program systems: theory and applications. 2015. №1(24). Pp. 73–82. (in Russian)
8. Elango P. Coreference Resolution: A Survey. Technical Report. UW-Madison. 2006. Available at: https://ccc.inaoep.mx/~villasen/index_archivos/cursoTATII/EntidadesNombradas/Elango-SurveyCoreferenceResolution.pdf, accessed 01.04.2017.
9. Kibrik A.A. (1996), Anaphora in Russian narrative discourse: A cognitive calculative account In B, Fox (ed.) Studies in anaphora, Amsterdam. Pp. 255–304.
10. Kibrik A.A., Dobrov G.B., Khudyakova M.V., Loukachevitch N.V., Pechenyj A. A corpus-based study of referential choice: Multiplicity of factors and machine learning techniques, Text processing and cognitive technologies // Cognitive modeling in linguistics: Proceedings of the 13th International Conference. Corfu. 2013. Pp. 118–126.
11. Mitkov R. Anaphora resolution. Mitkov R. (ed.) The Oxford handbook of computational linguistics. ch.14. N.Y.: Oxford university press. 2003. Pp. 266–283.
12. Mitkov R. Anaphora resolution: the state of the art // Working paper (based on the COLING'98/ACL'98 tutorial on anaphora resolution). Wolverhampton. 1999. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/e782/00b1e3ba2a72de1ca9b9b2c5efa775151bfa.pdf> (accessed 01.04.2017).
13. Mitkov R. Robust pronoun resolution with limited knowledge // Proceedings of the 18th International Conference on Computational Linguistics 1998 (Montreal). Pp. 869–875.
14. Ponzetto S.P., Strube M. Exploiting semantic role labeling, wordnet and wikipedia for coreference resolution // In Proceedings of Human Language Technology Conference of the North American Chapter of the Association of Computational Linguistics, Association for Computational Linguistics. 2006. Pp. 192–199.
15. Prokofyev R., Tonon A., Luggen M., Vouilloz L., Difallah D.E., Cudr'e-Mauroux P. SANAPHOR: Ontology-Based Coreference Resolution. In Lecture Notes in Computer Science. Volume 9366. 14th International Semantic Web Conference. Proceedings. Part I. 2015. Pp. 458–473.

УДК 004.822:004.89

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПЛАТФОРМЫ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ
ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСОВ**

Ахмадеева Ирина Равильевна

Аспирант, e-mail: i.r.akhmadeeva@iis.nsk.su

Серый Алексей Сергеевич

М.н.с., e-mail: alexey.seryj@iis.nsk.su

Шестаков Владимир Константинович

М.н.с., e-mail: shestakov@iis.nsk.su

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева 6

Аннотация. В работе обсуждаются возможности и области применения платформы для построения информационно-аналитических интернет-ресурсов (ИАИР), основанных на технологиях Semantic Web, а также проблемы, возникающие при ее разработке. Исследуются пути совместного использования метода Linked Data и логического вывода для создания информационных ресурсов различного назначения, приводится пример применения данной платформы для создания ИАИР по поддержке принятия решений.

Ключевые слова: Semantic Web, онтология, информационная система, СППР.

Введение. Современная практика научных исследований предусматривает взаимодействие ученых, работающих в одной или смежных областях науки, обмен данными и результатами исследований. Для нужд крупных исследовательских проектов создаются информационные системы, где аккумулируется информация, относящаяся к работе над проектом, и получаемые результаты. Создание и обслуживание подобной системы само по себе достаточно трудоемко. В данной работе обсуждаются возможность и перспективы использования платформы для построения информационно-аналитических интернет-ресурсов (ИАИР) на базе технологий Semantic Web, исследуются возможности расширения ресурсов, создаваемых на базе платформы, дополнительными функциональными модулями для решения специализированных задач и способы настройки отображения онтологий и данных для наиболее удобного представления информации. В

первом разделе статьи приведено описание концепции предлагаемой платформы, обосновано применение технологий Semantic Web, рассмотрены особенности разработки веб-интерфейса и возможности расширения систем, построенных на основе данной платформы. Во втором разделе приведены примеры конкретных информационных систем, построенных с помощью платформы.

1. Концепция платформы. Для создания информационно-аналитических интернет-ресурсов предлагается платформа, включающая набор методов и средств, поддерживающих и облегчающих этот процесс. Платформа задает архитектуру ИАИР, реализует базовую функциональность, которая, в зависимости от требований, предъявляемых к разрабатываемому ресурсу, может быть расширена, а также предоставляет базовые онтологии научной деятельности и научного знания и RDF-хранилище для хранения онтологий и сети знаний и данных. Планируется включить в базовую комплектацию редактор онтологий, который предоставит возможность редактировать онтологию с учетом используемых в ней паттернов (подробнее будут рассмотрены ниже).

Предлагаемая архитектура включает три уровня: уровень представления информации, уровень обработки информации, уровень хранения и доступа к информации. Базовая функциональность включает навигацию в информационном пространстве ИАИР (сети знаний и данных), поиск информации в контенте ИАИР (в том числе расширенный — в терминах онтологий) и редактирование контента ИАИР. Для хранения онтологий и данных используется широко распространенное хранилище Jena Fuseki [4, 7], однако может использоваться и другое RDF-хранилище.

Подобная платформа призвана объединить в себе возможности строгого формального описания предметной области исследований и логического вывода с возможностями навигации и представления информации, обычно обеспечиваемыми информационными системами. Выполнение сформулированных таким образом требований обеспечивается технологиями Semantic Web с одной стороны, и веб-интерфейсом — с другой.

1.1. Semantic Web. Как уже было указано в [2], применение технологий Semantic Web обусловлено, в первую очередь, наличием стандартизированных языков описания знаний и данных и возможностью логического вывода на них. Описание на языке OWL дает возможность использовать хранилища RDF-триплетов, многие из которых имеют встроенные машины вывода. Для получения данных при этом используется стандартный язык запросов SPARQL [12]. Все это позволяет, во-первых, помимо целостности данных, контролировать непротиворечивость онтологической модели предметной области, во-вторых — использовать при описании предметной области готовые онтологии, находящиеся в свободном доступе, в-третьих — работать со стандартным описанием онтологий стандартными средствами, что означает совместимость с другими онтологиями без дополнительных преобразований.

Развивающиеся в настоящее время алгоритмы выделения непротиворечивых онтологий-подмножеств исходной онтологии [8, 10] в будущем, вероятно, позволят сконструировать базовую онтологию для разрабатываемого ресурса лишь из требуемых понятий, набранных из разных онтологий.

В целом, платформа позиционируется как средство построения информационных систем, посвященных научной деятельности и, соответственно, включает базовые онтологии научной деятельности и научного знания. Они содержат такие понятия, как «Деятельность», «Предмет исследования», «Результат исследования», «Публикация» и др. Описание научной деятельности потребовало представления сущностей, непредставимых стандартными конструкциями OWL, в частности, атрибутированных связей и доменных значений. Для их представления использовались специальные паттерны, такие, как, например, паттерн атрибутированного отношения и паттерн доменного значения. Первый представляет собой паттерн *qualified relation* [6], модифицированный таким образом, чтобы сохранить направление связи [2]. В качестве паттерна для представления доменного значения был взят один из вариантов, предлагаемых W3C для описания специфических значений [11].

Домен необходим для искусственного ограничения области значений атрибута, чтобы при создании или редактировании пользователь системы не мог указать произвольное значение. Например, пол человека может принимать одно из двух возможных значений: *мужской* или *женский*. Пример паттерна в том виде, в котором он предлагается W3C, приведен на рис. 1.

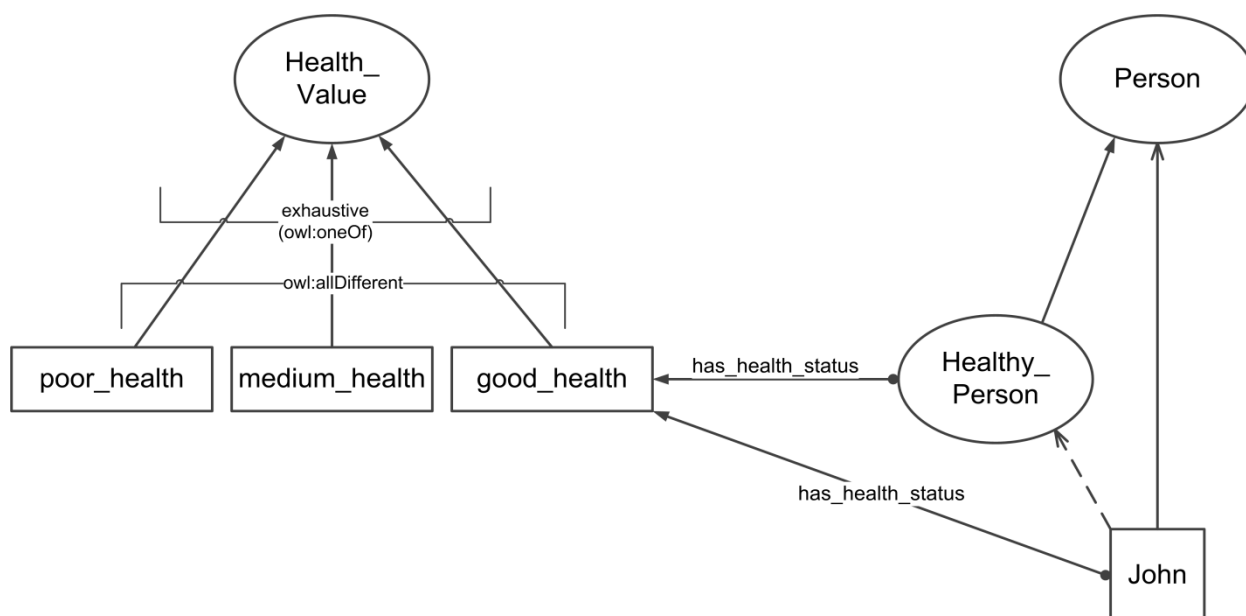


Рис. 1. Паттерн доменного значения

Как можно видеть, атрибуты, имеющие доменные значения, описываются как отношения, связывающие класс онтологии со специальным классом, описывающим нужный домен. В нашем случае все классы, представляющие домены, наследуются от вспомогательного класса «Домен». Доменные значения описываются как экземпляры класса, представляющего домен. Стоит отметить, что имеет смысл ограничивать доменом только свойства с достаточно узкой областью значений, такие, как, например, уже упомянутый пол человека или тип научной публикации: «автореферат», «журнал», «статья», «монография» и пр.

1.2. Интерфейс пользователя ИАИР. При разработке интерфейса конечного пользователя для представления информации были созданы шаблоны визуализации классов, объектов и ссылок на них, встраиваемые в базовые онтологии и в онтологию предметной области. С помощью шаблонов визуализации задаются набор и порядок расположения свойств, входящих в описание сущности или ссылки. Более подробно виды и структура шаблонов описаны в [2].

Шаблоны визуализации были введены для отображения информации удобным образом: чтобы атрибуты и связи объектов отображались в нужном порядке, а ссылки давали представление об объекте или классе, на который указывают и при этом не были слишком длинными. К примеру, ссылка на объект класса «*Публикация*» включает последовательно перечень авторов, название публикации, дату выхода и тип. Очевидно, не каждого пользователя устроит тот или иной вид ссылки, определенный заранее, поэтому в рамках работ по реализации платформы планируется вынесение настроек шаблонов визуализации на пользовательский уровень, что даст пользователю возможность самостоятельно настроить вид объектов и ссылок.

Также очевидно, что на базе платформы может быть создан ресурс произвольной направленности, с произвольной онтологией, не имеющей никаких шаблонов визуализации. В этом случае формируются ссылки и представления по умолчанию. Несмотря на то, что платформа рассчитана на построение ресурсов, предоставляющих доступ к информации в виде сети знаний и данных, и онтология здесь служит как средством описания предметной области, так и средством навигации, визуальные средства позволяют корректно отобразить практически любую онтологию, даже если она не включает ни объектов, ни свойств. На рис. 2 представлен фрагмент отображения взятой из репозитория Bioportal онтологии протеинов [5, 9], почти не содержащей экземпляров и свойств, при этом включающей более 2000 классов.

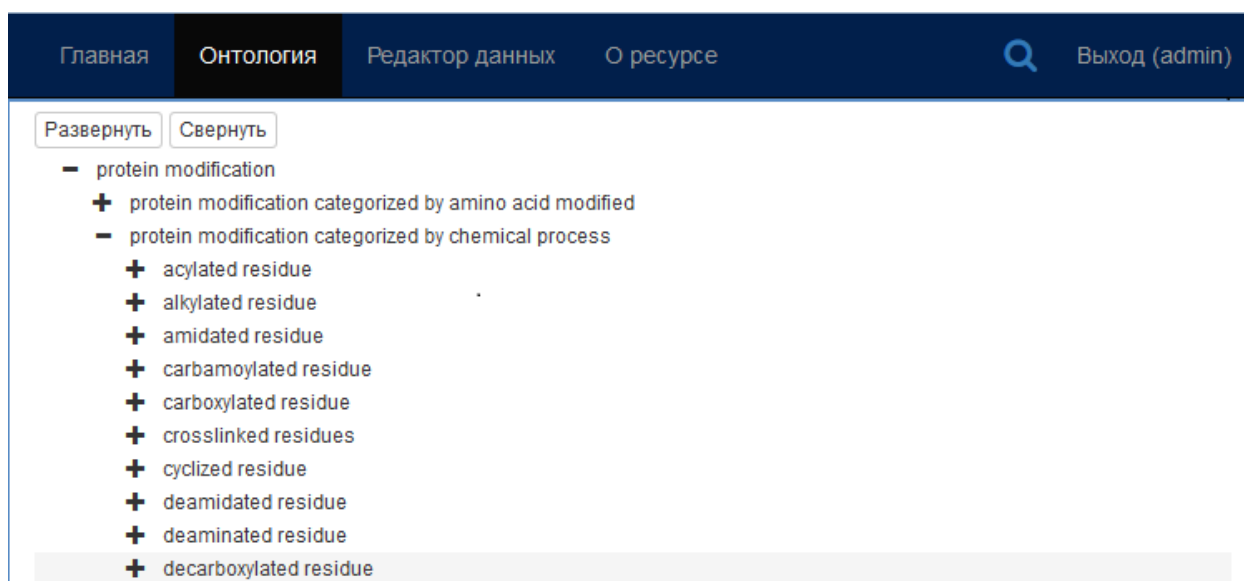


Рис. 2. Отображение онтологии протеинов в пользовательском интерфейсе

1.3. Расширения. По умолчанию информационно-аналитический ресурс, создаваемый на базе платформы, включает только функции навигации, редактор данных и два вида поиска: простой и расширенный. Построение специализированных ресурсов требует включения в платформу дополнительных возможностей, реализуемых в виде пакетов расширений. Создание библиотеки таких пакетов — одна из задач при разработке платформы. Расширения могут предоставлять дополнительные функции ввода и редактирования данных, визуализации данных в виде графов [1], поиска в сети Интернет в терминах онтологии, а также, в перспективе, функции анализа интернет-ресурсов и пополнения онтологии данными из сети Интернет.

Редактор данных в ИАИР позволяет редактировать значения атрибутов с учетом их типов. По умолчанию предлагаются средства для редактирования атрибутов следующих стандартных типов: `xsd:integer`, `xsd:date`, `xsd:string`, `xsd:anyURI`, а также, как упоминалось ранее, доменных типов. Эти средства позволяют удобным образом вводить данные (числа, даты, указывать язык) и проверять введенные пользователем данные на корректность. Редактирование атрибутов остальных типов (в том числе пользовательских) и атрибутов, у которых тип не указан, никак не ограничивается.

Добавление в редактор поддержки новых типов и расширение возможностей по редактированию уже существующих достигается установкой расширений, реализующих эти функции. Например, если возникает необходимость описывать большое количество документов и предоставлять к ним доступ, полезным оказывается расширение для работы с файлами. На примере научной деятельности такими документами могут быть научные статьи, информационные письма конференций, патенты и авторские свидетельства. Базовые функции позволяют в качестве значения атрибута типа `xsd:anyURI` указать веб-ссылку на любой файл в Сети. Расширение для работы с файлами позволяет загружать файлы в систему, автоматически заполняя значение атрибута ссылкой на загруженный файл.

До сих пор мы говорили о том, что стандартизация языка OWL дает возможность использования других онтологий при создании информационной системы на основе предлагаемой платформы. Однако возможно и обратное: повторное использование получившихся онтологий в других проектах. При наличии в системе загруженных файлов они останутся доступны после переноса онтологии. Другими словами, отдавая в свободный доступ онтологию построенной системы, разработчик также делится ресурсами, накопленными в системе на тот момент.

Инструментарий библиотеки пакетов расширения будет уточняться по мере развития платформы, опыта ее использования и анализа потребностей пользователей. Среди перспективных направлений можно предложить разработку метапоискового модуля, позволяющего составлять или уточнять запросы к поисковым системам Интернета на основе онтологии, или вопросно-ответного модуля, отвечающего на вопросы на естественном языке.

2. Создание ИАИР на базе платформы. При апробации разрабатываемой платформы с ее помощью были построены две информационные системы, посвященные системным исследованиям в энергетике и поддержке принятия решений в слабоформализованных областях.

Первая предоставляет структурированную информацию о системных исследованиях в энергетике, решаемых в рамках данной области задачах и методах их решения. В процессе разработки данного ресурса была создана онтология исследований в энергетике, описывающая специфические для данной предметной области понятия: виды и отрасли энергетики, типы теплоэнергоресурсов, задачи и проблемы. Данный ресурс разработан с использованием только базовых функций платформы, позднее планируется расширить функционал ресурса, в частности, возможностью работы с файлами. В работе [2] приведено

описание данного ресурса, а также механизма шаблонных запросов, реализованного в платформе.

Другой ресурс посвящен разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР) [3]. В качестве целевой аудитории такого рода ресурса рассматриваются не только непосредственно разработчики ИСППР, но и исследователи, занимающиеся разработкой методов принятия решений, а также лица, принимающие решения. Онтология данного ресурса, как и онтология исследований в энергетике, включает базовые онтологии, описывающие научную деятельность: онтологию научного знания, онтологию научной деятельности и онтологию научных информационных ресурсов. Предметная онтология задач и методов принятия решений описывает взаимосвязь понятий «Задача ППР» и «Метод ППР». При разработке данного ресурса была начата работа над расширением, позволяющим получать статистическую информацию из общедоступных баз данных и отображать ее на страницах ресурса.

Заключение. В данной работе дается общее представление о платформе для построения информационно-аналитических интернет-ресурсов, возможных областях ее применения, а также методах и подходах, лежащих в ее основе. Среди направлений дальнейших исследований поиск новых областей применения, испытания базовых возможностей при создании информационных систем различного назначения и, как следствие, разработка новых расширений для решения специфических задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-07-00569).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апанович З.В., Булгаков С.В., Винокуров П.С., Загоруйко Ю.А. Использование методов визуализации графов для анализа информационного наполнения археологического портала знаний // Информационные технологии в гуманитарных исследованиях. 2009. №13. С. 59–64.
2. Загоруйко Ю.А., Ахмадеева И.Р., Серый А.С., Шестаков В.К. Построение тематических интеллектуальных научных интернет-ресурсов средствами Semantic Web // Пятнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2016 (3–7 октября 2016 г., г. Смоленск, Россия). Труды конференции. В 3-х томах. Т 2. Смоленск: Универсум. 2016. С. 47–55.

3. Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б., Шестаков В.К. Подход к разработке информационно-аналитического интернет-ресурса по поддержке принятия решений // Информационные технологии и системы: тр. Шестой Междунар. науч. конф., Челябинск, Россия, 1–5 марта 2017 г. (ИТиС –2017). 2017. С. 113–116.
4. Портал DB-Engines. Режим доступа: <https://db-engines.com/en/ranking/rdf+store> (дата обращения 14.04.2017).
5. Bioportal. Режим доступа: <https://bioportal.bioontology.org/ontologies/PSIMOD> (дата обращения 13.04.2017).
6. Dodds L., Davis I. Linked data patterns. Online: <http://patterns.dataincubator.org/book>. 2011.
7. Fuseki: serving RDF data over HTTP. Режим доступа: http://jena.apache.org/documentation/serving_data/ (дата обращения 13.04.2017).
8. Kang D. et al. Extracting sub-ontology from multiple ontologies // OTM Confederated International Conferences "On the Move to Meaningful Internet Systems". Springer Berlin Heidelberg. 2004. С. 731–740.
9. Protein standard initiative. Режим доступа: <http://www.psidev.info/MOD> (дата обращения 13.04.2017).
10. Ranwez V., Ranwez S., Janaqi S. Subontology extraction using hyponym and hypernym closure on is-a directed acyclic graphs // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2012. Т. 24. №. 12. С. 2288–2300.
11. Representing Specified Values in OWL: "value partitions" and "value sets". Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/swbp-specified-values/> (дата обращения 11.04.2017).
12. SPARQL Query Language for RDF. W3C Recommendation 15 January 2008. Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query> (дата обращения 10.04.2017).

UDK 004.822:004.89

**SOME FEATURES IN IMPLEMENTING A PLATFORM FOR CREATING
INFORMATION-ANALYTICAL INTERNET RESOURCES**

Irina R. Akhmadeeva

Graduate student, e-mail: i.r.akhmadeeva@iis.nsk.su

Alexey S. Sery

Junior researcher, e-mail: alexey.seryj@iis.nsk.su

Vladimir K. Shestakov

Junior researcher, e-mail: shestakov@iis.nsk.su

A.P. Ershov Institute of Informatics Systems, 6, Acad. Lavrentjev pr., Novosibirsk 630090, Russia

Abstract. In this article we discuss opportunities and application areas of a platform for creating Information-Analytical Internet Resources (IAIR) based on the Semantic Web technologies as well as difficulties arising upon its development. The ways to use the Linked Data method along with logical reasoning for building up information resources for various purposes are researched, and an example of the proposed platform's application to build up Information-Analytical Internet Resource on decision support is described.

Keywords: Semantic Web, ontology, information system, decision support system.

References

1. Apanovich Z.V., Bulgakov S.V., Vinokurov P.S., Zagorulko Yu. A. Ispol'zovanie metodov vizualizacii grafov dlja analiza informacionnogo napolnenija arheologicheskogo portala znaniy [Use of Visualization of Diagrams Methods for Analysis of Information Filling of Archaeological Portal of Knowledge] // Informacionnye tehnologii v gumanitarnyh issledovanijah = Information technologies in humanitarian research. 2009. № 13. Pp. 59–64. (in Russian)
2. Zagorulko Yu.A., Akhmadeeva I.R., Sery A.S., Shestakov V.K. Postroenie tematiceskikh intellektual'nyh nauchnyh internet-resursov sredstvami Semantic Web [Building subject-based intelligent Internet resources by means of semantic web technologies] // Pjtnadcataja nacional'naja konferencija po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2016 (3–7 oktjabrja 2016. Smolensk, Rossija). Trudy konferencii. V 3-h tomah. = Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence with International Participation (CAI 2016) (3–7 October 2016. Smolensk, Russia). Proceedings. Vol. 2. Smolensk: Universum. 2016. Pp. 47–55. (in Russian)
3. Zagorulko Yu.A., Zagorulko G.B., Shestakov V.K. Podhod k razrabotke informacionno-analiticheskogo internet-resursa po podderzhke prinjatija reshenij [Approach to the development of information-analytical internet resource on decision support] // Informacionnye tehnologii i sistemy: tr. Shestoj Mezhdunar. nauch. konf., Rossija, 1–5 marta

2017. = Information technologies and systems: proceedings of sixth international scientific conference. (1–5 March 2017, Chelyabinsk, Russia). Pp. 113–116. (in Russian)
4. DB-Engines portal. Available at: <https://db-engines.com/en/ranking/rdf+store> (last accessed 14.04.2017).
 5. Bioportal. Available at: <https://bioportal.bioontology.org/ontologies/PSIMOD> (last accessed 13.04.2017).
 6. Dodds L., Davis I. Linked data patterns // Online: <http://patterns.dataincubator.org/book>. — 2011.
 7. Fuseki: serving RDF data over HTTP. Available at: http://jena.apache.org/documentation/serving_data/ (last accessed 13.04.2017).
 8. Kang D. et al. Extracting sub-ontology from multiple ontologies // OTM Confederated International Conferences "On the Move to Meaningful Internet Systems". Springer Berlin Heidelberg. 2004. Pp. 731–740.
 9. Protein standard initiative. Available at: <http://www.psidev.info/MOD> (last accessed 13.04.2017).
 10. Ranwez V., Ranwez S., Janaqi S. Subontology extraction using hyponym and hypernym closure on is-a directed acyclic graphs // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2012. Vol. 24. №. 12. Pp. 2288–2300.
 11. Representing Specified Values in OWL: "value partitions" and "value sets". Available at: <https://www.w3.org/TR/swbp-specified-values/> (last accessed 11.04.2017).
 12. SPARQL Query Language for RDF. W3C Recommendation 15 January 2008. Available at: <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query> (last accessed 10.04.2017).

Правила приема статей в журнал

В 2016-2017 гг. отобранные и отрецензированные статьи по материалам докладов, представленных на конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении», публикуются в одноименном научном журнале, который издается как периодическое издание четыре раза в год (март, июнь, сентябрь, декабрь). Журналу присвоен международный индекс ISSN 2413-0133. Оргкомитетом конференции заключен лицензионный договор с E-library. С авторами заключаются авторские соглашения, полные тексты статей помещаются в E-library с индексацией в РИНЦ.

Тематика журнала совпадает с тематикой конференции:

1. Теоретические и методологические аспекты информационных и математических технологий.
2. Математическое моделирование в научных исследованиях, вычислительная математика, оптимизация.
3. Методы, технологии и инструментальные средства создания интеллектуальных энергетических систем.
4. Методы и системы искусственного интеллекта, интеллектуальные вычисления.
5. Ситуационное управление, системы интеллектуальной поддержки принятия решений в управлении, ситуационные центры.
6. Информационное и семантическое моделирование, семантические вычисления.
7. Корпоративные информационные, геоинформационные, интеллектуальные системы.
8. Параллельные, распределенные, агентные и облачные вычисления.
9. Кибербезопасность (защита информационных систем критически важных инфраструктур).

Статьи участников, приславших свои статьи к 20 февраля и/или 25 марта, публикуются до начала конференции. Статьи участников конференции, присланные к 25 июня (или привезенные с собой на конференцию), публикуются после конференции (в текущем году). Статьи, присланные к 25 сентября, публикуются в следующем (2018) году. Предусматриваются как очное, так и заочное участие в конференции (только публикация, с частичной оплатой оргвзноса), но при большом количестве статей предпочтение будет отдаваться очным участникам (статьи заочных участников могут быть перенесены в следующий выпуск).

Для публикации статьи необходимо подписать авторское соглашение во время регистрации на сайте (подтвердить согласие на публикацию статьи в журнале и размещение полного текста статьи в E-Library). Статьи заочных участников, не зарегистрированных на сайте, могут быть приняты при наличии авторского соглашения (твердая копия или скан-копия).



С 2018 г. вводится более строгое рецензирование статей. При рецензировании статей обращается внимание на соответствие тематике журнала, научный уровень работы, ссылки на предшествующие работы (желательно не менее 11-15 ссылок), соответствие требованиям к оформлению статей. **Для оценки научного уровня работы рекомендуется в заключении статьи выделять новизну и оригинальность методов и/или результатов.** Для аспирантов, студентов, магистрантов требуется рекомендация (или соавторство) руководителя.

Требования к оформлению статей по сравнению с предыдущими годами изменены и приводятся в отдельных файлах (требования и шаблон статьи) на сайте конференции <http://imt.isem.irk.ru>. По возникающим вопросам можно обращаться в Оргкомитет конференции e-mail: imt@isem.irk.ru