

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№1(13)/ 2019

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

Научный журнал

№ 1 (13)



EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.
Andrianov A.N.
Arshinskiy L.V.
Bachkova I.A.
Berestneva O.G.
Boukhanovsky A.V.
Bychkov I.V.
Chubarov L.B.
Donskoy V.I.

Dunaev M.P.
Eliseev S.V.
Fedotov A.M.
Gornov A.Y.
Gribova V.V.
Groumpos P.
Hodashinsky I.A.
Kalimoldaev M.N.
Karpenko A.P.
Kazakov A.L.
Khamisov O.V.
Lis R.
Massel L.V.
Mokhor V.V.
Moskvichev V.V.
Ovtcharova J.
Popov G.T.
Smirnov S.V.
Stylios C.
Voevodin V.V.
Voropai N.I.
Woern H.
Wolfengagen V.E.
Yusupova N.I.
Zorina T.G.

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
Бачкова И.А., Болгария, София, ХТМУ
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
Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН
Донской В.И., д.ф.-м.н., Симферополь, Таврическая академия Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского
Дунаев М.П., д.т.н., Иркутск, ИРНТУ
Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Федотов А.М., чл.-корр. РАН, Новосибирск, ИВТ СО РАН
Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Грумпус П., Греция, University of Patras
Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Казakov А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины
Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАН
Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Стилюс Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ
Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.
Executive Editor
Makagonova N.N.
Editor Kopaigorodsky A.N.
Editor Massel A.G.
Designer Ivanov R.A.

Главный редактор Массель Л.В. д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Выпускающий редактор
Макагонова Н.Н. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор Копайгородский А.Н. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор Массель А.Г. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Дизайнер Иванов Р.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Working contacts

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

Рабочие контакты

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 441

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

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 440

Макагонова Н.Н., e-mail: mak@isem.irk.ru

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018 г.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН

© Все права принадлежат авторам публикуемых статей.

Подписано в печать 22.03.2019 г. Тираж 100 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН

Методы искусственного интеллекта

Тучкова Н.П. Роль и возможности специализированных тезаурусов в когнитивных технологиях	5
Гальперова Е.В., Гальнеров В.И., Локтионов В.И., Макагонова Н.Н. Применение интеллектуальных методов для моделирования влияния новых факторов в развитии энергетики на спрос на электроэнергию	16
Гвоздев В.Е., Черняховская Л.Р., Мухаметьянова Р.И. Интеллектуальная поддержка при управлении персоналом развивающегося промышленного предприятия	30
Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Концептуальная модель знаний для исследований критических инфраструктур энергетики	38
Массель А.Г., Бахвалов К.С. Применение интеллектуальных технологий для решения проблемы научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики	47

Методы математического моделирования

Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и социальных процессов и явлений в неоднородной среде	61
Якубовский Д.В., Круненин Д.С., Бояркин Д.А. Применение двухэтапной оптимизации в модели потокораспределения при оценке балансовой надёжности ЭЭС	85

Программные системы и комплексы

Соколов Д.В., Барахтенко Е.А. Применение метапрограммирования в интегрированной графической среде для моделирования трубопроводных систем энергетики	96
Федоров Р.К., Шумилов А.С. Представление устройств интернета вещей в виде веб-сервисов и автоматизация их взаимодействия	105
Хан П.В., Таиров Э.А. Автоматизация обработки и визуализации многопараметрических числовых данных при помощи GNU PLOT, GAWK и конвейеров данных	114
Кабанов А.А., Кругляков А.С., Бадыма С.К., Пилимонкин Н.С., Симонов К.В. Информационное и алгоритмическое обеспечение геомониторинга землетрясений на территории Тывы	124
Махмутов А.Р., Высоцкий Н.И., Миронов К.В., Marcus Meisel, Thilo Sauter Технология безопасной коммуникации устройств с ограниченными ресурсами	133

Mathematical modeling methods

- Tuchkova N.P.**
The role and capacity of specialized thesauruses in cognitive technologies 5
- Galperova E.V., Galperov V.I., Loktionov V.I., Makagonova N.N.**
Application of intellectual methods for modeling of the influence of new factors of energy sector development on electricity demand 16
- Gvozdev V.E., Chernyahovskaya L.R., Mykhametyanova R.I.**
Intelligent support in the personnel management of a developing industrial enterprise 30
- Vorozhtsova T.N., Pyatkova N.I.**
A conceptual knowledge model for research of critical energy infrastructures 38
- Massel A.G., Bakhvalov K.S.**
Application of intellectual technologies to solve the problem of scientific substantiation of strategic decisions on the digital transformation of energy sector 47

Program systems and complex

- Cherkashin A.K.**
Metatheoretical system modelling of natural and social processes and phenomena in heterogenous environment 61
- Iakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A.**
Application of two-stage optimization in the power flow distributing model while assessing the adequacy of electric power systems 85

Methods of artificial intelligence

- Sokolov D.V., Barakhtenko E.A.**
Automation of the integrated graphical environment construction for computer modeling of energy pipeline systems 96
- Fedorov R.K., Shumilov A.S.**
Implementation of smart devices as web-services and automation of theirs interactions 105
- Khan P.V., Tairov E.A.**
Automatization of multivariable numerical data processing and visualization with GNUPLOT, GAWK and data pipes 114
- Kabanov A.A., Kruglyakov A.S., Badima S.K., Pilimonkin N.S., Simonov K.S.**
Information and algorithmic provision of earthquake geomonitoring in the Tyva territory 124
- Makhmutov A.R., Vysotskiy N.I., Mironov K.V., Marcus Meisel, Thilo Sauter**
Secure communication technology for devices with limited resources 133

УДК 004.8

РОЛЬ И ВОЗМОЖНОСТИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ТЕЗАУРУСОВ В КОГНИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ¹

Тучкова Наталия Навловна

К.ф.-м.н., с.н.с., Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук
Федерального исследовательского центра «Информатика и управление»
Российской академии наук, г. Москва, 119333, ул. Вавилова, 40,
e-mail: tuchkova@ccas.ru

Аннотация. Рассматриваются проблемы восприятия информации в обучении, науке, критических ситуациях в контексте когнитивных технологий. Учесть семантику предметных областей при использовании когнитивных технологий - одна из задач цифровой среды. Эту задачу предлагается решать путем привлечения специализированных предметных тезаурусов. Отмечается, что в цифровую эпоху возрастает роль специализированных тезаурусов, как основы для онтологического представления данных в информационных системах. На базе тезаурусов легко сформировать онтологию ситуации и использовать ее как модель данных для когнитивных агентов.

Ключевые слова: тезаурус, когнитивная технология, онтологии, когнитивные агенты.

Цитирование: Тучкова Н.П. Роль и возможности специализированных тезаурусов в когнитивных технологиях // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 5–15. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-01

Введение. Отличие современного стиля работы заключается в скорости получения и распространения данных, как следствия *изменения формы представления и способа передачи информации*. Попутно современный читатель превратился в пользователя. В начале человеческой цивилизации были графические и символные формы представления, потом появились текстовые и видео. Благодаря развитию произошли кардинальные изменения в носителях, скорости передачи и восприятия информации. Необходимость быстро усваивать (воспринимать, прочитывать и понимать) информацию диктует новые формы ее подачи и развитие соответствующих когнитивных технологий. Идея *сжатия информации* стала главенствовать в этих технологиях, а *время становится основным ресурсом*, который надо экономить.

Проблема когнитивного восприятия возникла как часть информационных технологий искусственного интеллекта (artificial intelligent). Исследования, связанные с искусственным интеллектом, достаточно специализированные и высокотехнические. Основные проблемы искусственного интеллекта включают создание программных продуктов, предназначенных для оперирования с *логическими рассуждениями, знаниями, логикой решения задач, восприятием информации (распознаванием), обучением, планированием, управлением объектами*.

¹ Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 17-07-00217а, 18-00-00297комфи

Поэтому, когда механические, а потом и интеллектуальные функции в производстве и коммуникациях стали передаваться машинам, автоматам, компьютерам, "когнитивным (интеллектуальным) агентам²" (intelligent agents), ученые задумались о процессе взаимодействия человека с компьютером (brain-computer interface) и компьютеров между собой (computer - computer interface). До этого проблемой когнитивного восприятия интересовались в медицинском, психологическом и социальном аспектах.

Исследования в распознавании речи, обучении, планировании, решении задач составляют одну из ключевых частей в технике представления знаний и в когнитивных технологиях.

Перед разработчиками ставится задача создания информационной среды с заданными свойствами и соответствующими целями, одну из которых составляет улучшение когнитивного восприятия информации (не будем рассматривать случай, когда информация намеренно искажается или скрывается от пользователя). Это относится в первую очередь к системам обучения (образования) и научной информации, но также распространяется на сферы бизнеса, медицины и технологическую информацию, которая сопровождает инженерные (электрические, газовые) сети, мониторинг среды и др. Часть из перечисленного непосредственно влияет на повседневное существование современного общества, а запаздывание, искажение, игнорирование, неверное понимание и восприятие информации может способствовать созданию критической ситуации.

Когнитивные технологии это - технологии усвоения, что, естественно, подразумевает под собой процесс, а не единичное действие. Этот процесс начинается с *выбора способа представления знаний* (данных) и продолжается до *оценки результата усвоения*. Способ представления и оценки знаний варьируются в зависимости от предметной области. В ряде случаев могут использоваться компьютерные технологии, когда, как в некоторых областях, например, психологии или социологии, активно используются ролевые игры и тесты. Тем не менее, когнитивная графика в любом случае используется, как практически неотъемлемый элемент представления информации для тестов и коммуникации в процессе усвоения и оценки знаний.

Идея о сопровождении предметных тезаурусов графикой и поддержки когнитивной графики пояснениями и справочным материалом из соответствующих тезаурусов стала реализовываться, как только позволили технологии. Когда появились первые программы визуализации связей в онтологиях, сразу стало понятно, что это эффективный рабочий инструмент и его взяли на вооружение когнитивные технологии. Проекты WebVOWL³ Protégé⁴, OWLGrEd⁵ и многие другие предлагают технологии визуализации предметных онтологий. Но, остается вопрос о наполнении предметных областей, создании самих описаний с выделением главных понятий и терминов и связей между ними, которые задаются логикой предметных областей. Основу для таких описаний, как и раньше, составляют словари со связями - тезаурусы предметных областей. На базе тезаурусов,

² Программные средства (агенты) высокого уровня, обеспечивающие интеллектуальными свойствами, такими, как формирование цели и плана действий (<https://www.igi-global.com/chapter/ambient-intelligence/10230>)

³ WebVOWL (<http://vowl.visualdataweb.org>)

⁴ Protégé (<https://protege.stanford.edu/>)

⁵ OWLGrEd (http://owlgred.lumii.lv/online_visualization)

обращаясь к технологиям языков онтологий, можно формировать онтологии предметных областей и описания ситуаций, и использовать их как модели данных для когнитивных агентов.

Из истории вопроса. Цифровое сообщество достаточно давно осознало важность когнитивных технологий, а для представления данных вновь обратилось к символьной и графической информации. Например, научные приложения, знания, где нельзя обойтись без символики: математика, химия, физика, механика, нанотехнологии и другие, которые также наследуют математическую символику. Современное материаловедение включает молекулярное моделирование, что означает наследование химической символики. Понимание формул относится к когнитивной графике. В свою очередь необходимы *механизмы для интерпретации графики*. Символы и формулы в восприятии ученого, графика в менеджменте, сигналы в технике, знаки в семиотике - это различные интерпретации. История обращения человечества к графике - это история коммуникации и она насчитывает многовековой период. Начиная с *Homo sapiens* и до настоящего времени (*цифровой эпохи, Digital Era*) графика используется для передачи и усвоения информации. Но, на заре цивилизации вопрос о передаче знаний и интерпретации информации носил ограниченный характер. Речь не шла о дистанционном обучении, управлении или удаленном общении через цифровые средства связи. На рис. 1 схематично отражены периоды развития средств визуализации и коммуникации "человека разумного", которые включают этапы использования графики, символов, письменности, печати и компьютерных технологий.



Рис. 1. Средства коммуникации с доисторического времени до цифровой эпохи: изображения, пиктограммы, иконы, символы, письменность, цифровая информация

Из этой иллюстрации (рис. 1) видно, что визуализация информации необходима для наилучшего восприятия и взаимодействия между индивидуумами. В цифровую эпоху к этому добавляется *взаимодействие индивидуума с устройствами и между устройствами*. Роль когнитивной графики и ее интерпретации в различных сферах человеческой

деятельности возрастает. Например, в работе [11] предлагается вариант выявления некоторых математических способностей на основе механизма анализа символической информации.

Учет семантики предметных областей при создании *когнитивной графики* - одна из задач цифровой среды. Эта задача решается путем *привлечения специализированных предметных тезаурусов*. Исследования в этом направлении ведутся с середины прошлого столетия и включают проблемы как информационного запроса [9], так и собственно представления предметных областей и расширения информационного запроса с помощью отношений между понятиями [12]. В монографии [2] дается анализ того, как *модель восприятия информации изменилась по мере технологического прогресса*: от модели профессионального обучения "*обучение на практике*" к модели "*коммуникации и контроля*". На основе ключевых понятий теории управления информацией (кибернетики) анализируется восприятие "знания", "фактов", "данных". Утверждается, что "информация" - это цепь семантически связанных фактов и, задавая семантику данных, можно получить модель ситуации, типа "вход-выход" ("исходная информация" - "конечная информация"). Таким образом, центральными проблемами в профессиональном восприятии информации, с точки зрения автора [2], становятся "управление информацией" и "управление поведением". Со времени выхода этой монографии прошло уже больше 20 лет, и в современных информационных системах используются семантические модели данных. Вопросам использования специализированных тезаурусов, содержащих символическую информацию для идентификации конфликтной ситуации, посвящена работа [10], а вопросам расширения знаний в цифровом представлении математической предметной области - работа [1]. Настоящее исследование посвящено когнитивным возможностям использования тезаурусов для интерпретации символической и графической информации на примере смежных предметных областей и задач управления.

Проблема улучшения восприятия информации. С изменением скорости передачи информации и получения ответного сигнала в виде управления возросла проблема улучшения восприятия информации. Традиционные когнитивные инструменты претерпели изменения и дополнились новыми инструментами искусственного интеллекта. Один из исследователей (Iqbal M., [6]) в 2015 году отразил многообразие взаимодействия современного *homo sapiens* с различными электронными устройствами "*brain-computer interface*" в виде карты, на рис. 2. Интересно, что скорость развития этой области такова, что теперь почти через 5 лет эту карту можно дополнить взаимодействием "*computer - computer interface*", которое на рис. 2 отражено частично. Человеку отводится роль управления потоками информации, а логика процессов управления опирается на семантику связей объектов управления.

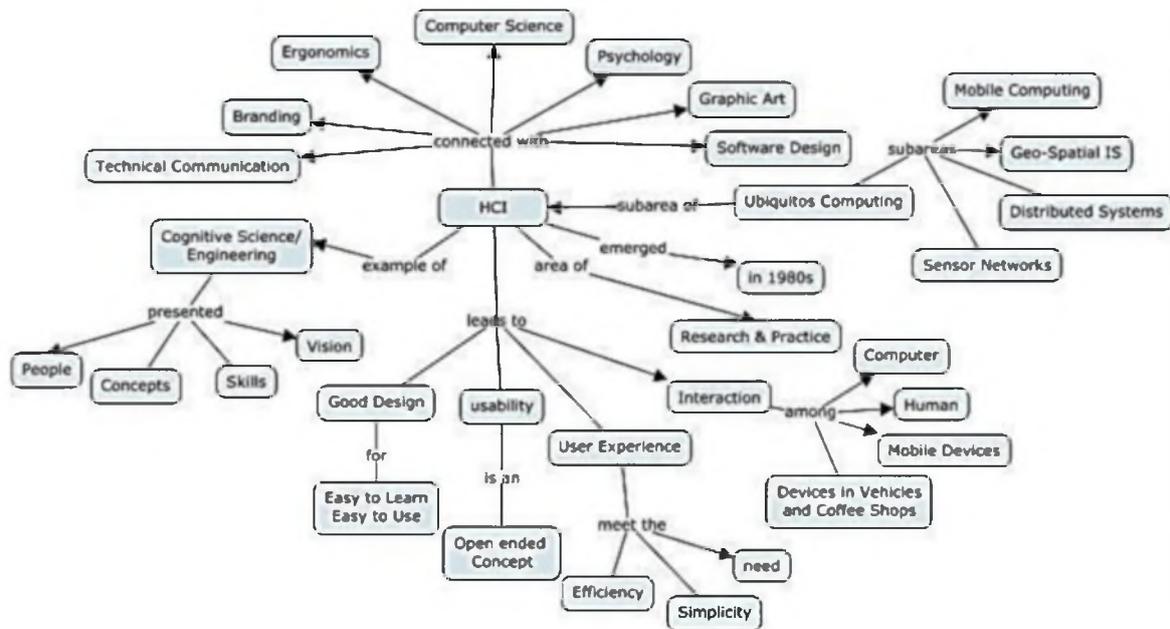


Рис. 2. Карта человеко-машинного взаимодействия (HCI - Human-Computer Interaction)⁶

Автор [6] не остановился на этой схеме и продолжил анализировать взаимосвязи теорий познания 21 века в контексте социальных отношений, опираясь во многом на труды 80-х годов 20 века о теории распределенных когнитивных процессов (Эдвина Хатчинза и др. [5]). На рис. 3 представлена карта теорий человеко-машинного взаимодействия с определением места когнитивных систем.

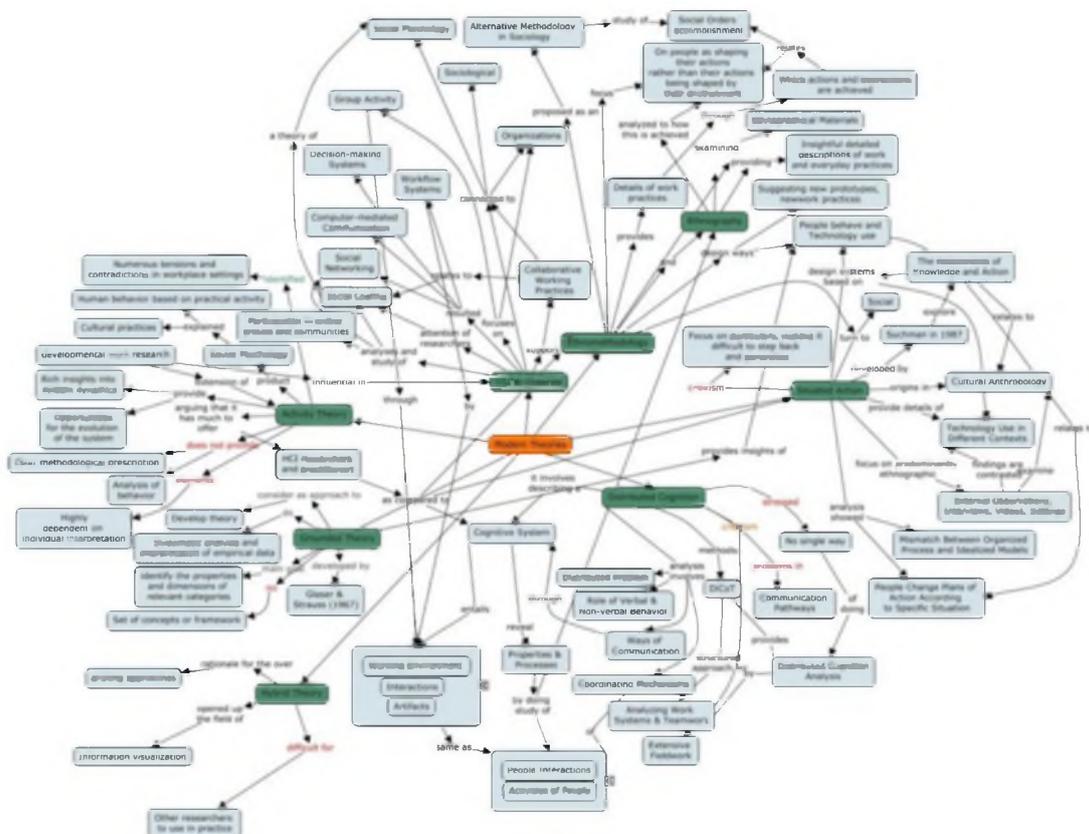


Рис. 3. Карта современных теорий человеко-машинного взаимодействия: красным цветом выделены проблемы и ограничения теорий и зеленым - основные теории/структуры⁷

⁶ <https://mubashariqbahci.wordpress.com/2015/09/06/hci-concept-map/>

Можно по-разному относиться к таким иллюстрациям, поскольку они отражают субъективный взгляд на проблему распространения знаний в современных информационных сетях и в социальных сетях, в частности. Тем не менее, это один из примеров *когнитивной графики*, позволяющий оценить масштабы *проблемы достоверности* информации, с которой сталкиваются в системах управления. В основу улучшения восприятия информации (фактов, данных и т.д.) в цифровую эпоху неизбежно встраивается система *проверки достоверности* информации и контроль *усвоения достоверной информации*. Необходимо вспомнить, что *когнитивные технологии* - это технологии усвоения знаний, которые заимствованы из социальных (медицинских, психологических) наук и базируются на сочетании классических и современных (цифровых) методах представления знаний. Это часть информационных технологий, позволяющая учитывать влияние человеческих факторов во взаимодействии "brain-computer" и имеющая большое значение в моделировании чрезвычайных ситуаций. Уместно даже упомянуть различие и сходство целей в передаче информации (и распространении знаний) с переходом в цифровую эпоху, рис. 4. Начальные и конечные цели передачи информации не изменилась, это - коммуникация. Изменились проблемы, возникающие в этом процессе, если раньше нужно было донести и сохранить достоверную информацию, то теперь, в силу легкости самого процесса коммуникации, появилась задача защиты от недостоверной информации и ненадежных источников.

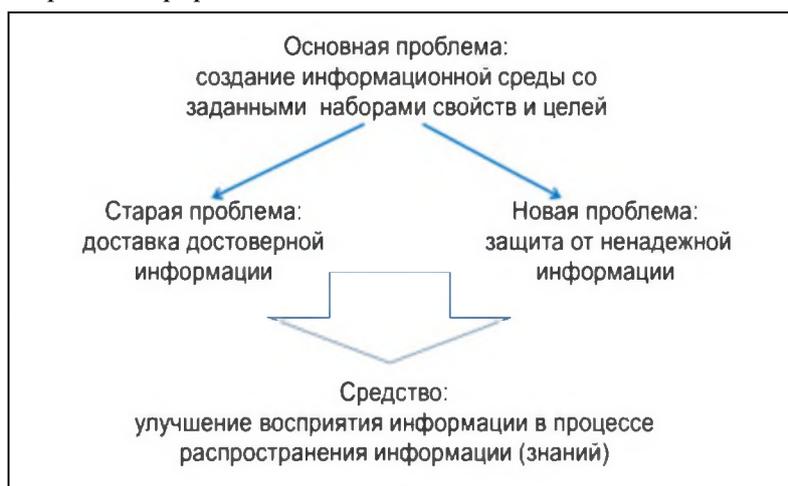


Рис. 4. Схема задач коммуникации

Чем меньше было средств коммуникации, тем, естественно, меньше возможностей исказить информацию, но и меньше возможностей в распространении знаний.

Вопросы когнитивного восприятия включают:

- языковые проблемы;
- проблемы образования;
- проблемы интерпретации предметной области познания;
- проблемы представления предметной области в цифровой среде.

Традиционные методы контроля восприятия информации и знаний используют:

- руководства и учебники;
- когнитивную графику и видео;
- ролевые игры и моделирование ситуации.

⁷ <https://mubashariqbalhici.files.wordpress.com/2015/10/modern-theories-21.jpg>

Искусственный интеллект акцентирует внимание на создании интеллектуальных средств, которые работают и реагируют, как люди, в области распознавания речи, образов, обучения и планировании действий.

Цифровая эпоха позволяет дополнительно использовать:

- специализированные тезаурусы для описания предметной области (ситуации) и их отображение в предметные онтологии;
- методы виртуальной реальности для моделирования связей и взаимодействия объектов (когнитивных агентов);
- числовое моделирование и прогнозирование;
- удаленные коммуникации с помощью средств интернета.

Анализ данных и предварительная обработка информации составляют значимую часть в цифровом представлении данных (знаний). Целью такой предварительной обработки является использование когнитивных технологий для максимального удовлетворения информационных потребностей пользователя в процессе различного вида коммуникаций и управления. Управление, таким образом, "опирается" на модель ситуации (знания о предметной области), которая задается с помощью онтологии предметной области (онтологии смежных предметных областей). Для создания этих онтологий необходимо выявить основные объекты и их связи, что на стадии обработки данных задается при формировании тезауруса предметной области. Этот процесс схематично отражен на Рис. 5.



Рис. 5. Схема управления на основе описания предметных областей ситуации (знаний)

Роль тезаурусов в определении достоверности информации. Представление данных, информации, знаний, ситуации в сочетании с современными средствами коммуникации позволяют получить:

- сообщение о сути конкретного события (ситуации, происшествия);
- корректировать информацию, используя связи, задаваемые отношениями тезауруса;
- получить оценку достоверности информации (ситуации);
- сформировать список возможных действий и последствий.

Перечисленные возможности реализуются средствами информационных систем и создают информационную поддержку адекватного восприятия передаваемых (получаемых) знаний, управления потоками данных и когнитивными агентами.

Для управления коммуникациями с коррекцией данных применяются:

- описание ситуации с использованием словаря, с контролируемой лексикой и графическим сопровождением (иллюстрациями в виде когнитивной графики);
- варианты альтернативных и похожих ситуаций (задач, примеров и т.д.);
- варианты развития возможных (переходных) ситуаций;
- варианты решений (переходов в конечную ситуацию);
- оценка вероятности вариантов развития и перехода в конечную ситуацию;
- сравнение конечной, наиболее вероятной ситуации, с описанием в тезаурусе.

Если наиболее вероятная конечная ситуация есть в описании ситуаций - можно считать исходную информацию достоверной, иначе требуется проверка в виде запроса дополнительных данных, информации и т.д. В упрощенном виде схема проверки достоверности (верификации) информации с использованием предварительных описаний, заданных в тезаурусе предметной области (знаний, ситуаций), представлена на рис. 6.

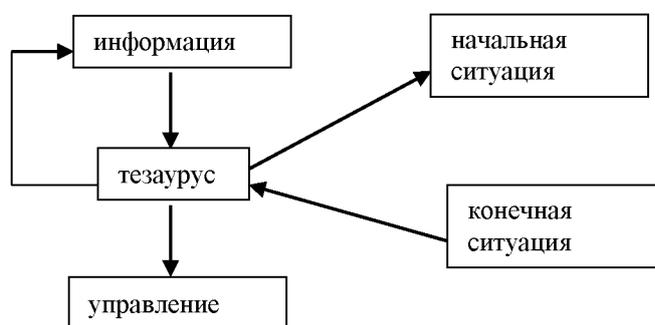


Рис. 6. Схема верификации информации с использованием контролируемой лексики

Эту же схему считать реализацией взаимно-однозначного соответствия:

онтология <-> ситуация

Если соотношение при поступлении информации выполняется, то можно считать, что информация достоверная, иначе - нет. Имеется ввиду, что в информационной системе есть описание ситуации в виде онтологии, сформированной на основе связей в тезаурусе, то есть, задача сводится к наличию или отсутствию однозначных описаний и средств их представления в форме, доступной для восприятия в моменты управления.

Метод предварительной обработки информации может просто соответствовать стандартам описания тезаурусов [3, 7], например, статья тезауруса ситуации:

descriptor : CS 1

BT: previous CS

NT: post CS

RT: related factors Cs(i), Cs(i+1)...Cs(n), HF, TF

KW: kw1, kw2, ... , kwK

Здесь **CS** - сокращение от "critical situation", термин-дескриптор; **BT** - термин "выше", более широкое понятие, здесь означает предыдущую ситуацию, соответственно **NT** - термин "ниже", дочерний термин, здесь означает последующую ситуацию; **RT** - ассоциативный термин, т.е. похожее описание, аналогичная ситуация, термины, описания свойств (например, перечисление "технических" (technical factors, **TF**) и "человеческих" факторов (human factors, **HF**)); **KW** - список ключевых слов. Результат описания ситуации должен

выражаться в формуле $CS = F(TF, HF)$, где описание ситуации сводится к функции зависимости от технических и человеческих факторов. Идеальное управление в таком описании заключается в оценке вероятности воздействия негативных факторов $P(\min F(TF, HF)=0)$. Такие зависимости необходимо вычислить для всех ситуаций из тезауруса ситуаций (микротезауруса предметной области или ситуации).

Сопровождение графикой, с использованием связей, задаваемых в описании ситуации, позволит построить соответствующие *когнитивные модели* [8] событий в виде когнитивных карт, событийных графов и схем.

Если, в соответствии с описанием, задаваемым в статье **CS**, при поступлении информации в систему происходит переход от **BT** к **NT**, то "система знает", что произошло, иначе требуется уточнение через **RT**. Если никакого соответствия через ассоциативные связи также нет, то значит, что или информация неверна, или это новая ситуация, которая требует нового управления.

Описание ситуации, отраженное в онтологии, в соответствии со стандартами языков онтологий, обретает объекты, их свойства и отношения, аналогичные статьям тезауруса.

При корректной информации управление передается когнитивным агентам. При некорректной ситуации (с точки зрения имеющих описаний) необходимо анализировать свойства объектов управления для выделения групп воздействующих факторов, например, из групп ассоциативных связей и факторов воздействия (TF, HF).

Заключение. Предложен вариант использования технологии описания данных с помощью контролируемой лексики, дескрипторов и связей тезауруса применительно к проблеме управления ситуацией. Акцент делается на проблеме представления информации с целью наилучшего восприятия пользователем в процессе взаимодействия с устройствами. Таким средством могут служить как онтологии, так и когнитивные описания и карты на основе тезаурусов. Приведены примеры средств коммуникации в историческом развитии. Распространение культуры, письменности и появление цифровых средств представления и передачи информации послужило средством передачи знаний. "Культурная практика является ключевым компонентом человеческого познания", Эдвин Хатчинз (Edwin Hutchins [4]). В продолжение этих слов можно добавить, что необходимо аккумулировать знания, чтобы управлять ситуациями в мире цифровых технологий. Экономика знаний, где интеллект представляет основной ресурс, дает преимущества экономике развитых стран. Современные информационные технологии, включая когнитивные технологии, основанные на реальных знаниях человечества, составляют реальный капитал в виде приложений во всех сферах человеческой деятельности.

Работа выполняется при частичной поддержке грантов РФФИ 17-07-00217а, 18-00-00297комфи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муромский А.А., Тучкова Н.П. Об онтологии адресата в математической предметной области // Электронные библиотеки, 2018. Т. 21. № 6. С. 506-533.
2. Gerald E. Flueckiger Control, Information, and Technological Change 1995 Springer Netherlands 155 p. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0377-0> (доступно 09.04.2019)

3. Glossary of terms relating to thesauri and other forms of structured vocabulary for information retrieval. Режим доступа: <http://www.willpowerinfo.co.uk/glossary.htm> (доступно 09.04.2019)
 4. Hutchins E. Culture and inference: A Trobriand case study. Cambridge. MA: Harvard University Press. 1980.
 5. Hutchins E. The Distributed Cognition Perspective on Human Interaction. In Nicholas J. Enfield and Stephen C. Levinson (Eds.) Roots of Human Sociality: Culture, Cognition and Interaction. Berg Publishers: Oxford, UK. 2006. Pp. 375–398.
 6. Iqbal M. Inter-organisational knowledge transfer in social networks. 2016. Режим доступа: <https://mubashariqbalhci.wordpress.com/> (доступно 09.04.2019)
 7. ISO 25964 Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/ISO_25964 (доступно 09.04.2019)
 8. Milstead J.L. ASIS Thesaurus of Information Science and Librarianship. Second Edition. 1998. 169 p.
 9. Mooers C. Information retrieval viewed as temporal signaling // Proceedings of the International Congress of Mathematicians. 1950. Vol. 1. Pp. 572–573.
 10. Muromskiy A.A., Tuchkova N.P. Application of thesaurus of symbolic information for the identification of the specific situations // Proceedings of the V-th International workshop "Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security" (IWCI 2018) Advances in Intelligent Systems Research. 2018. Т. 158. Pp. 183–188. Режим доступа: <https://doi.org/10.2991/iwci-18.2018.32> (доступно 09.04.2019)
 11. Orrantia, J., Muñoz, D., Matilla, L., Sanchez, R., San Romualdo, S. and Verschaffel, L. Disentangling the Mechanisms of Symbolic Number Processing in Adults' Mathematics and Arithmetic Achievement // Cognitive Science. 2019 Jan. 43(1). doi:[10.1111/cogs.12711](https://doi.org/10.1111/cogs.12711)
 12. Shiri, A. and Revie, C. Query expansion behaviour with a thesaurus-enhanced search environment: a user-centered evaluation // JASIS. 2006. Vol. 57. № 4. Pp. 462–478.
-

UDK 004.8

THE ROLE AND CAPACITY OF SPECIALIZED THESAURUSES IN COGNITIVE TECHNOLOGIES

Natalia P. Tuchkova

PhD., senior researcher, Institution of Russian Academy of Sciences
Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Vavilov st. 40, 119333 Moscow, Russia
e-mail: tuchkova@ccas.ru

Abstract. Problems of perception of information in training, science, critical situations in the context of cognitive technologies are considered. To consider semantics of subject domains when using cognitive technologies - one of problems of the digital environment. This problem is offered to be solved by attraction of specialized subject thesauruses. It is noted that during a digital era the role of specialized thesauruses as bases for ontology data presentation increases in information systems. On the basis of

thesauruses it is easy to create ontology of a situation and to use it as model of data for cognitive agents.

Keywords: thesauruses, cognitive technologies, ontology, cognitive agents.

References

1. Muromskiy A.A., Tuchkova N.P. Ob ontologii adresata v matematicheskoy predmetnoy oblasti [On the addressee's ontology in the mathematical domain] // *Elektronnyye biblioteki = Russian Digital Libraries Journal*. 2018. T. 21. № 6. Pp. 506–533. (in Russian)
2. Gerald E. Flueckiger. *Control, Information, and Technological Change*. Springer Netherlands. 1995. 155 p. DOI 10.1007/978-94-011-0377-0
3. Glossary of terms relating to thesauri and other forms of structured vocabulary for information retrieval. Available at: <http://www.willpowerinfo.co.uk/glossary.htm> (accessed 09.04.2019)
4. Hutchins E. *Culture and inference: A Trobriand case study*. Cambridge. MA: Harvard University Press. 1980.
5. Hutchins E. The Distributed Cognition Perspective on Human Interaction. In Nicholas J. Enfield and Stephen C. Levinson (Eds.) *Roots of Human Sociality: Culture, Cognition and Interaction*. Berg Publishers: Oxford, UK. 2006. Pp. 375–398.
6. Iqbal M. Inter-organisational knowledge transfer in social networks. 2016. Available at: <https://mubashariqbalhci.wordpress.com/> (accessed 09.04.2019)
7. ISO 25964 Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/ISO_25964 (accessed 09.04.2019)
8. Milstead J.L. *ASIS Thesaurus of Information Science and Librarianship*. Second Edition. 1998. 169 p.
9. Mooers C. Information retrieval viewed as temporal signaling // *Proceedings of the International Congress of Mathematicians*. 1950. Vol. 1. Pp. 572–573.
10. Muromskiy A.A., Tuchkova N.P. Application of thesaurus of symbolic information for the identification of the specific situations // *Proceedings of the V-th International workshop "Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security" (IWCI 2018) Advances in Intelligent Systems Research*. 2018. T. 158. Pp. 183–188. Available at: <https://doi.org/10.2991/iwci-18.2018.32> (accessed 09.04.2019)
11. Orrantia, J., Muñoz, D., Matilla, L., Sanchez, R., San Romualdo, S. and Verschaffel, L. Disentangling the Mechanisms of Symbolic Number Processing in Adults' Mathematics and Arithmetic Achievement // *Cognitive Science*. 2019 Jan. 43(1). doi:10.1111/cogs.12711
12. Shiri, A. and Revie, C. Query expansion behaviour with a thesaurus-enhanced search environment: a user-centered evaluation // *JASIS*. 2006. Vol. 57. № 4. Pp. 462–478.

УДК 004.89:338

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ ФАКТОРОВ В РАЗВИТИИ ЭНЕРГЕТИКИ
НА СПРОС НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ**

Гальперова Елена Васильевна

К.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник отдела Взаимосвязей энергетики и экономики

e-mail: galper@isem.irk.ru

Гальперов Василий Ильич

К.т.н., младший научный сотрудник отдела Энергетической безопасности

e-mail: galperov@gmail.com

Локтионов Вадим Ильич

К.э.н., старший научный сотрудник отдела Взаимосвязей энергетики и экономики

e-mail: vadlok@mail.ru

Макагонова Надежда Николаевна

К.т.н., доцент, главный специалист по ИТ отдела Энергетической безопасности

e-mail: mak@isem.irk.ru

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

664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. Смена парадигмы развития энергетики предъявляет новые требования к методологии прогнозирования спроса на региональных энергетических рынках. Наиболее важные перемены связаны с изменением роли потребителя, который становится активным и равноправным участником рынка электроэнергии, влияющим как на спрос и цены, так и уровень адаптивности энергосистемы. Невозможность формализации прямых и обратных связей потребителя и централизованной электросети и высокая их неопределенность обусловили использование семантического подхода и агентного моделирования. Построенные онтология и когнитивная модель региональной энергосистемы позволили выявить и описать причинно-следственные связи, возникающие в региональной энергосистеме при разных условиях ее функционирования. Разработанные на основе агентного подхода алгоритм и модели позволяют имитировать поведение потребителей в зависимости от разной ценовой ситуации и оценить возможности и силу их влияния на структуру и показатели развития энергосистемы при проведении будущих исследований.

Ключевые слова: интеллектуальные сети, активный потребитель, когнитивное моделирование, агентный подход, спрос на электроэнергию, цена.

Цитирование: Гальперова Е.В., Гальперов В.И., Локтионов В.И., Макагонова Н.Н. Применение интеллектуальных методов для моделирования влияния новых факторов в развитии энергетики на спрос на электроэнергию // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 16–29. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02

Введение. Долгосрочное прогнозирование спроса на разные виды энергоносителей является важным этапом при разработке программ и стратегий развития энергетики и

экономики страны и регионов, а также при принятии инвестиционных программ энергетическими компаниями.

Сегодня в мировой энергетике происходят революционные изменения, вызванные переходом к новому энергетическому укладу. Основными из них являются: повышение требований к качеству и надежности энергоснабжения потребителей, ужесточение экологических требований, опережающий рост спроса на электроэнергию по сравнению с другими энергоносителями, изменение роли потребителей в энергосистеме, вовлечение в оборот распределенных энергетических ресурсов (в т.ч. возобновляемых). По мнению специалистов, в новой энергетике главную роль будут играть интегрированные и объединенные на основе концепции интеллектуальной сети (Smart grid) электроэнергетические системы [7, 23].

Важной чертой энергетики будущего является ориентация на нужды конечного потребителя. Клиентоориентированный подход предъявляет новые требования к методологии долгосрочного прогнозирования спроса на энергоносители для исследования перспектив развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Ранее разработанные подходы основаны на концепции централизованного снабжения потребителей топливно-энергетическими ресурсами (ТЭР) и основное внимание уделяют уровню страны [12, 22, 28]. Энергопотребление регионов определяется, как правило, путем разнесения полученных объемов ТЭР по территории на основе региональной структуры потребления последнего доступного отчетного года с учетом принятых к реализации крупных инвестиционных проектов. Новые условия смещают акцент прогноза на сторону потребителей и региональный уровень. Именно здесь происходит согласование интересов отдельных производителей и потребителей энергии, формирующих конъюнктуру региональных энергетических рынков, которая, в свою очередь, способна повлиять на суммарный спрос на уровне страны, потребовать итеративной увязки регионального уровня и уровня страны и повлиять на структуру ввода генерирующих мощностей в ТЭК.

Активные потребители – важная часть интеллектуальной энергосистемы. Активным может быть любой потребитель (промышленные предприятия, транспорт, предприятия коммерческого сектора, домохозяйства и т.д.), способный самостоятельно управлять объемом централизованно получаемой электроэнергии на основе информации о ценах, надежности, качестве и других параметрах энергосистемы, а также влиять на них посредством продажи излишков производимой собственными мощностями электроэнергии [6, 14]. Такое поведение потребителей может не только влиять на спрос и цены на региональных энергетических рынках, но и способствовать повышению уровня адаптивности энергетических систем к меняющимся условиям развития.

Под адаптивностью энергетической системы понимается ее способность «подстраиваться» к изменяющимся внешним и внутренним условиям для достижения определенных целей, уровней, показателей, характеризующих стратегию ее функционирования и/или развития [13]. Например, обеспечение экономики страны или региона достаточным количеством и определенным качеством энергоресурсов, формирование рациональной структуры электрогенерирующих мощностей, достижение оптимального объема и направлений поставок энергоресурсов в регион или за его пределы и др. В увеличении адаптивности существующих энергетических систем страны заинтересованы как энергетические компании, стремящиеся к снижению рисков и

увеличению экономической эффективности, так и государство, стремящееся к повышению надежности, достаточности и ценовой приемлемости поставок энергоресурсов. Кроме того, свойство адаптивности может выступать одним из критериев оценки экономической эффективности инвестиционных проектов в энергетике и надежности функционирования энергетических систем [8].

Уровень адаптивности энергосистемы, кроме объемов затрат на приспособление ее к внешним и внутренним изменениям, определяется и количеством возможных, доступных и эффективных вариантов реакции системы на эти изменения: чем их больше, тем система более адаптивна при прочих равных условиях. Поведение потребителя как равноправного участника рынка электроэнергии будет способствовать повышению уровня адаптивности энергосистемы, поскольку создает возможности для сглаживания пиковых нагрузок, снижения системного резерва, оптимизации режимов работы электростанций и электроэнергетической сети, сокращения расходов и потерь топлива [2].

Обзор литературы. Моделирование поведения активного потребителя стало очень актуально в последние годы. За рубежом в первую очередь уделяется внимание управлению спросом в домохозяйствах в зависимости от стоимости электроэнергии для снижения затрат на электроснабжение. Для достижения этой цели в работе [27] рассматриваются возможности уменьшения потребления наиболее энергоемкими приборами в пиковой части суточного графика нагрузки. В [24] планирование энергопотребления и собственного производства электроэнергии на сутки вперед осуществляется на основе оптимизации экономических параметров, а в [18] на основе технических параметров. В работе [26] оценивается сравнительная эффективность распределения собственно произведенной электроэнергии между электроприборами и зарядкой накопителя электроэнергии. В [19] предлагается подход к максимизации выгоды от рационализации энергопотребления для каждого потребителя из группы домохозяйств, имеющей один источник энергии, а в [21] для группы в целом. В [25] моделируется и анализируется как график нагрузки каждого потребителя, так и влияние их взаимодействия на напряжение в сети. Отечественные исследователи решают задачи оптимизации суточных графиков режимов работы приборов и оборудования и загрузки собственных генерирующих мощностей как для домохозяйств [3], так и для промышленных предприятий [4]. В [1] рассматриваются вопросы координации взаимодействия потребителей и электроснабжающих организаций при регулировании суточных графиков нагрузки. Перечисленные работы направлены на достижения удовлетворительных результатов отдельного потребителя или группы потребителей при управлении спросом в режиме реального времени. Для прогнозных исследований на долгосрочную перспективу подобные задачи не имеют существенного значения. Важной задачей прогнозов является ответ на вопрос: как оптимизация собственного потребления и производства электроэнергии активными потребителями может повлиять на общий уровень спроса на электроэнергию и структуру генерирующих мощностей в региональной электроэнергетической системе, а также ее адаптивность? Следует отметить, что изменение потребности в электроэнергии может вызвать изменение спроса на другие виды энергоресурсов на региональном энергетическом рынке.

Целью статьи является развитие методологии долгосрочного прогнозирования для учета влияния активных потребителей на спрос на региональном рынке электроэнергии и на уровень адаптивности энергосистемы. Основные трудности в анализе и моделировании этого

влияния обусловлены: (1) многомерностью и взаимосвязанностью формирования рыночных процессов; (2) высокой неопределенностью в показателях, факторах и взаимосвязях в развитии процессов; (3) нестационарным характером изменения процессов во времени. Для преодоления этих трудностей предлагается применить семантический подход и агентное моделирование для описания и моделирования сложных нелинейных прямых и обратных связей между активным потребителем и энергосистемой.

Предлагаемый метод исследования. Предположим, что региональная энергетическая система состоит из централизованной электрической сети и набора потребителей. Централизованная электрическая сеть состоит из набора крупных производителей электроэнергии (электростанции на угле, газе, атомные и проч.) со своими технико-экономическими показателями (расход топлива, себестоимость и т.д.). Изменение доли отдельных электростанций в общем объеме производства электроэнергии влияет на уровень ее цены в сети.

Для исследования влияния потребителей на спрос в региональной энергосистеме необходимо учитывать несколько их категорий (видов): (1) стабильный (пассивный), который не может менять свое энергопотребление из-за технологических или иных особенностей, (2) активный, имеющий возможность изменять (снижать) энергопотребление, (3) просьюмер¹, который, кроме управления спросом, имеет собственные источники производства и хранения электроэнергии, а также возможность ее поставки в централизованную сеть.

Объем использования электроэнергии на региональном рынке складывается из потребностей всех потребителей

$$V_r = V_s + V_a + V_p,$$

где V_s – потребность в электроэнергии стабильных потребителей, кВтч, V_a – потребность в электроэнергии активных потребителей, кВтч, V_p – потребность в электроэнергии просьюмеров, кВтч.

Стабильные потребители не имеют возможности влиять на ситуацию в региональной системе электроснабжения, потребляя постоянное количество энергии независимо от ее стоимости $V_s = \text{const}$.

Активный потребитель стремится оптимизировать свое потребление, меняя его объемы, и минимизировать расходы на энергоснабжение

$$V_{a_{\min}} \leq V_a \leq V_{a_{\max}},$$

$$V_a = \sum_{i=1}^n e_i h_i,$$

$$Z = c^t V_a \rightarrow \min,$$

где Z – величина затрат на оплату электроэнергии, c^t – стоимость электроэнергии при структуре производства t в централизованной сети, e_i – мощность отдельного электропотребляющего устройства (технологические установки, кондиционеры, обогреватели, водонагреватели, печи, лампы и др.) i -тых процессов потребления (силовые, охлаждение, отопление, освещение и т.д.), n – количество энергопотребляющих устройств, h_i – число часов использования отдельного устройства.

¹ producer + consumer

Для просьюмера необходимо найти такое сочетание объемов покупной и собственно произведенной энергии для удовлетворения текущей потребности, стоимость которой не должна превысить заданной величины затрат с учетом дохода от проданной в сеть электроэнергии. Возможны следующие основные ситуации:

- 1) вся потребность покрывается из централизованной сети

$$c^t V_p \leq \bar{Z},$$

- 2) потребность частично покрывается из централизованной сети, а частично собственным производством

$$\alpha c^t V_p + (1 - \alpha) V_p s_j - d \leq \bar{Z},$$

где α – доля покупной электроэнергии в суммарном потреблении, s_j – себестоимость собственного производства электроэнергии, d – доход от продажи электроэнергии в централизованную сеть.

- 3) потребитель полностью обеспечивает себя собственной электроэнергией

$$s_j N_j h_j - s_j V_p + d \leq \bar{Z},$$

где N_j – мощность всех собственных источников генерации j , h_j – число часов использования установленной мощности источника j .

При этом

$$\sum_j N_j h_j \geq V_p$$

В последних двух случаях возможный избыток электроэнергии потребитель может отправить в централизованную сеть и получить доход от продажи d .

Для описания взаимосвязей в региональной энергосистеме предлагается использовать возможности семантического моделирования. В условиях возрастающей неопределенности и невозможности формализованного представления взаимосвязей между объектами в системе, семантическое моделирование позволяет описать предметную область с помощью концептов и отношений между ними в виде онтологии [10] (рис. 1). Основой для ее построения является следующая информация:

- в регионе имеется централизованная электрическая сеть, состоящая из набора крупных источников электроэнергии со своими технико-экономическими показателями,
- целью централизованной системы является максимум производства,
- имеется ряд промышленных и непромышленных потребителей разного вида,
- потребители покупают электроэнергию из централизованной сети,
- целью активных потребителей является минимум затрат на используемую энергию,
- просьюмеры могут использовать собственные мощности по производству электроэнергии для удовлетворения своих потребностей, зарядки имеющихся аккумулирующих устройств или продажи в централизованную сеть.

В случае, когда стоимость электроэнергии в централизованной сети не устраивает активных потребителей и просьюмеров, они могут изменять объемы своего электропотребления. В этой ситуации возникают новые взаимосвязи, показанные в онтологии пунктирными линиями, описывающие снижение потребления и возможности использования собственной генерации для просьюмеров.

Для описания возникающих причинно-следственных связей построена когнитивная модель [10, 16, 20], представляющая собой ориентированный граф (рис. 2), вершинами в которой являются объекты региональной электроэнергетической системы, а ребрами - связи между ними.

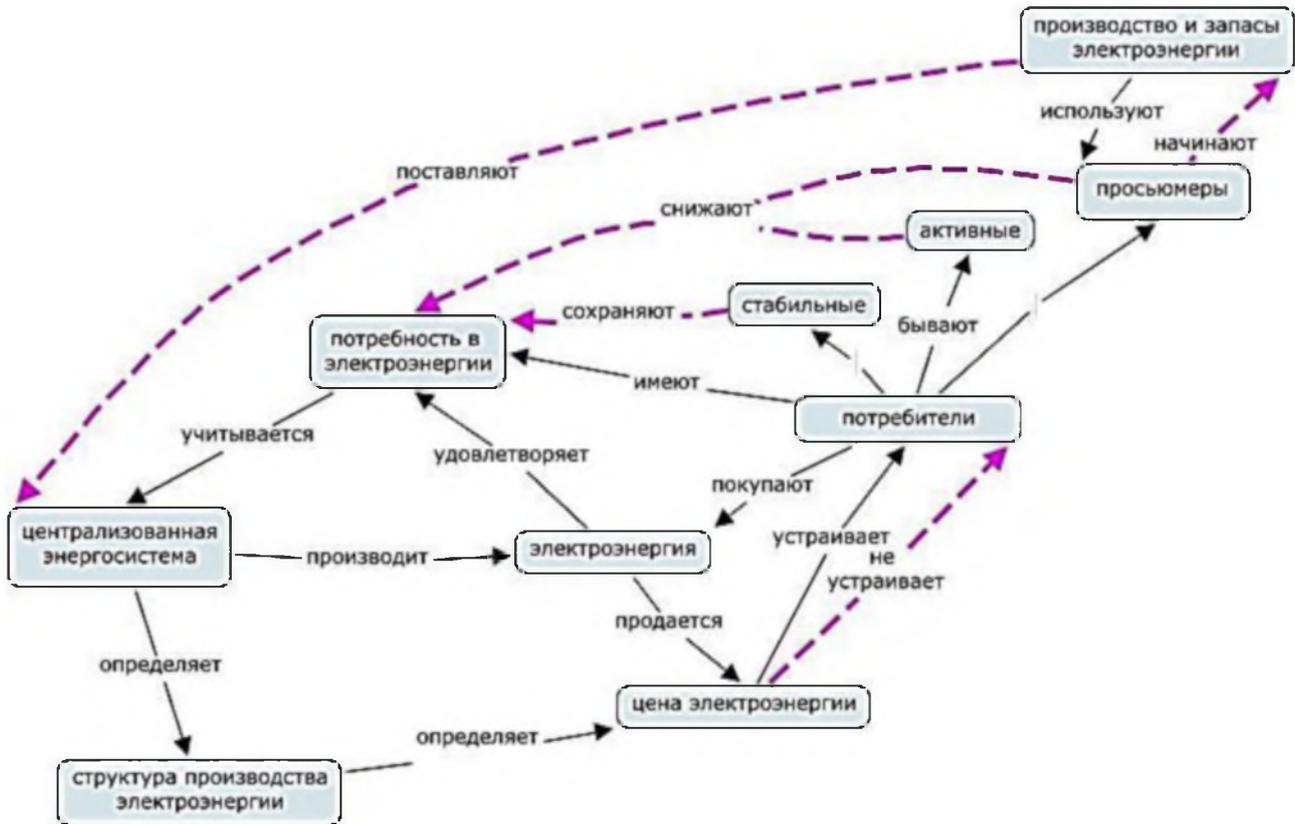


Рис. 1. Онтология региональной электроэнергетической системы при изменении стоимости электроэнергии

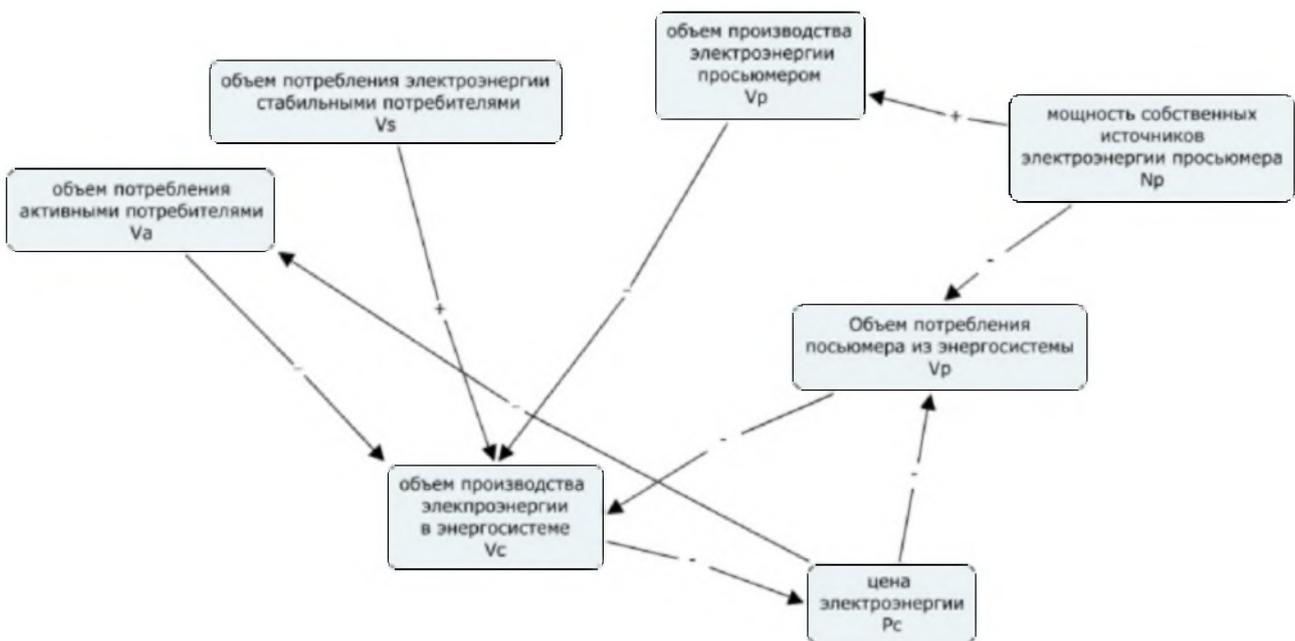


Рис. 2. Когнитивная модель региональной электроэнергетической системы

Алгоритм оценки влияния поведения потребителей на спрос в региональной энергосистеме состоит из следующих шагов (рис. 3):

- 1) находится максимально возможный уровень спроса на электроэнергию в региональной энергосистеме, как сумма потребности всех потребителей (потребность всех стабильных потребителей является неизменяемой частью объема спроса),
- 2) определяется приоритетность электропотребляющих процессов и объемы возможного снижения электропотребления для каждого активного потребителя и просьюмера,
- 3) для удовлетворения расчетного максимального объема спроса на электроэнергию определяется структура ее производства в централизованной сети на основе оптимизации по критерию минимальной стоимости 1 кВт.часа,
- 4) в соответствии с полученным значением цены электроэнергии в централизованной сети активные потребители и просьюмеры оптимизируют свое энергопотребление, определяется объем возможного его снижения и новый уровень энергопотребления для централизованной сети,
- 5) под этот уровень вновь производится оптимизация производственной структуры в сети и рассчитывается новая стоимость электроэнергии,
- 6) итеративные расчеты заканчиваются, когда просьюмерам становится выгодно полностью перейти на собственные источники производства электроэнергии, что соответствует минимальному уровню спроса на электроэнергию, получаемую из централизованной сети. Рассчитывается соответствующий этой ситуации объем спроса на электроэнергию, оценивается и анализируется величина снижения от максимального значения.

Реализация. Для моделирования всех объектов региональной энергосистемы, а также их взаимосвязей был выбран агентный подход, так как он позволяет моделировать самые сложные нелинейные прямые и обратные связи, использовать любой необходимый уровень детализации и абстракции [11, 12].

В настоящее время разрабатывается многоагентная модель централизованной электрической сети, в которой каждая электростанция представлена отдельным агентом с возможностью оптимизации собственных экономических показателей. В [5] представлен разработанный ранее, на основе типовой многоагентной системы [9], прототип многоагентной модели просьюмера, состоящий из набора агентов, каждый из которых описывает возможности функционирования отдельного энергопотребляющего и производящего устройства у потребителей. Контроль за работой каждого устройства-агента и согласование процессов их поведения осуществляет агент-менеджер, в которого закладываются описания всех возможных сценариев взаимосогласованного поведения собственных энергопотребляющих и энергопроизводящих устройств потребителя и взаимосвязей с централизованной электросетью. Развитие событий по каждому определенному сценарию описывается в виде событийных моделей с использованием аппарата Joiner-сетей [15].

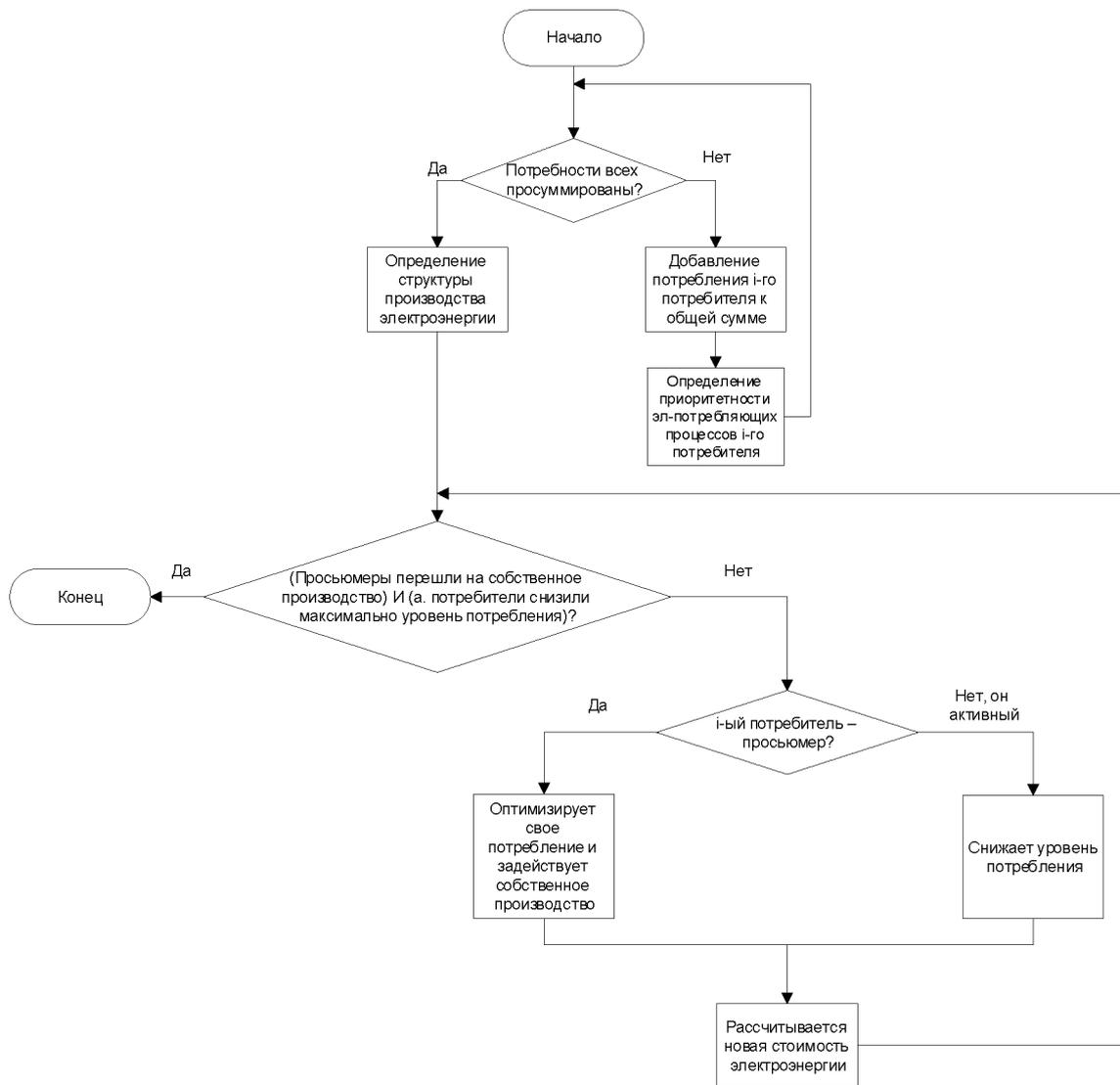


Рис. 3. Алгоритм для оценки влияния поведения активных потребителей на спрос в региональной электроэнергетической системе

Заключение. Развитие энергетики на основе концепции Smart grid, а также растущая неопределенность будущего страны и регионов предъявляют новые требования к методологии долгосрочного прогнозирования спроса на энергоносители для исследования вариантов развития ТЭК. Применение семантического подхода позволяет преодолеть трудности в моделировании развития энергосистемы, обусловленные невозможностью формализовать сложные прямые и обратные взаимосвязи потребителя и энергосистемы в условиях высокой их неопределенности.

В перспективе, способности потребителя производить и накапливать электроэнергию, а также менять объемы своего энергопотребления, могут влиять на уровень спроса и цену в региональной энергетической системе. Разработанные на основе агентного подхода алгоритм и модели позволяют имитировать поведение потребителей в зависимости от разных ситуаций в энергосистеме (уровня цен, надежности энергоснабжения, качества электроэнергии и др.) и оценить возможности и силу их влияния на структуру и условия функционирования энергосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Н.И., Шашкевич Е.В., Воропай Н.И. Координация взаимодействия электроснабжающей организации и активных потребителей при оптимизации суточных графиков нагрузки // Известия РАН. Энергетика. 2016. №3. С. 44–54.
2. Веселов Ф.В., Федосова А.В. Smart Grid - умный ответ на вызовы "умной" экономики. // Энергорынок. 2011. № 5. С. 52–58.
3. Волкова И.О., Губко М.В., Сальникова Е.А. Активный потребитель: задача оптимизации потребления электроэнергии и собственной генерации // Проблемы управления. 2013. № 6. С. 53–61.
4. Воропай Н.И., Стычински З.А., Козлова Е.В., Степанов В.С., Суслов К.В. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей // Известия РАН. Энергетика. 2014. №1. С.84–90.
5. Гальперова Е.В., Гальперов В.И. Моделирование поведения активного потребителя на основе агентного подхода // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. №4(8). С. 28–38.
6. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID. М.: ИАЦ Энергия. 2010. 208 с.
7. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / Под ред. Е.В. Фортова, А.А. Макарова. М.: ОАО «ФСК ЕЭС». 2012. 235 с.
8. Локтионов В.И. Адаптивность вариантов развития энергетических систем как показатель энергетической безопасности // Экономический анализ: теория и практика. 2015. №40. С. 11–21.
9. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентной системы оценивания состояния электроэнергетических систем с использованием событийных моделей // Наука и образование. 2015. №9. М.: МГТУ им. Баумана. Эл. №ФС77-4211. ISSN 1994-0448. DOI: 10.7463/0915.0811180.
10. Массель Л.В., Массель А.Г. Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики // Известия Томского политехнического университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. Т. 321. № 5. С. 135–141.
11. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс". 2006. 1408 с.
12. Сидоренко В.Н. Красносельский А.В. Имитационное моделирование в науке и бизнесе: подходы, инструменты, применение // Бизнес-информатика. 2008. №2 (08). С. 52–57.
13. Смирнов В.А. Процессы адаптации в развитии энергетики. М.: Наука, 1983. 196 с.
14. Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы. Режим доступа: <http://isem.irk.ru/upload/iblock/cef/cef1938237b98ee723192b6676049d89.pdf> (дата обращения 4.04.2017).
15. Столяров Л.Н., Новик К.В. Joinet-сеть для моделирования взаимодействующих параллельных процессов // Моделирование процессов управления: Сб. научных трудов. Моск. физ.-тех. ин-т. М. 2004. С. 81–97.
16. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М.: СИНТЕГ. 1998. 376 с.

17. Филиппов С.П. Прогнозирование энергопотребления с использованием комплекса адаптивных имитационных моделей // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 4. С. 41–55.
18. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Alberto Leon-Garcia. Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments // IEEE Trans. on Smart Grid. 2010. Vol. 1. N 1. Pp. 120–133.
19. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W.S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober, Alberto Leon-Garcia. Autonomous Demand Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid // IEEE Trans. on Smart Grid. 2010. Vol. 1. N 3. Pp. 320–331.
20. Axelrod R. Structure of Decision: the cognitive maps of political elites. Princeton Univ. Press. N.Y.: 1976. 395 p.
21. Bingnan Jiang, Yunsi Fei. Dynamic Residential Demand Response and Distributed Generation Management in Smart Microgrid with Hierarchical Agents // Energy Procedia. 2011. Vol. 12. Pp. 76–90.
22. Chateau B., Lapillonne B. The MEDEE Approach: Analysis and Long-term Forecasting of Final Energy Demand of Country // Energy Modelling Studies and Conservation: Proceedings of a Seminar of the United Nations Economics Commission for Europe, Washington D.C., 24-28 March 1980. Elsevier, 1982. Pp. 57–67.
23. Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. International Energy Agency. Available at: www.iea.org/etp2017 (accessed 11.12.2018)
24. Juan M. Lujano-Rojas, Claudio Monteiro, Rodolfo Dufo-Lopez, Jose L. Bernal-Agustin. Optimum residential load management strategy for real time pricing demand response programs // Energy Policy. 2012. Vol. 45. Pp. 671–679.
25. Kumarsinh Jhala, Balasubramaniam Natarajan, Anil Pahwa. Prospect Theory based Active Consumer Behavior Under Variable Electricity Pricing // IEEE Transactions on Smart Grid. PP(99):1-1 03/2018. 12 p. DOI:10.1109/TSG.2018.2810819 Available at: https://www.researchgate.net/publication/323501905_Prospect_Theory_based_Active_Consumer_Behavior_Under_Variable_Electricity_Pricing (accessed 11.12.2018)
26. Nikhil Gudi, Lingfeng Wang, Vijay Devabhaktuni. A demand side management based simulation platform incorporating heuristic optimization for management of household appliances // Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 43. Pp. 185–193.
27. Ning Zhanng, Ochoa L.F., Kirschen D.S. Investigating the impact of demand side management on residential consumers // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, Manchester, UK, December 5-7. 2011. 7 p.
28. 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 20.07.2018)

Благодарности. Исследование выполнено в рамках проекта государственного задания III.17.5.2, рег. № AAAA-A17-117030310452-7 и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проектов №17-06-00102 и № 18-010-00176)

**APPLICATION OF INTELLECTUAL METHODS FOR MODELING OF THE
INFLUENCE OF NEW FACTORS OF ENERGY SECTOR DEVELOPMENT
ON ELECTRICITY DEMAND**

Elena V. Galperova

PhD., Associate Professor, Leading Researcher. Department of Energy-Economy Interactions

e-mail: galper@isem.irk.ru

Vasily I. Galperov

PhD., Junior Researcher. Department of energy security

e-mail: galperov@gmail.com

Vadim I. Loktionov

PhD., Senior Researcher. Department of Energy-Economy Interactions

e-mail: vadlok@mail.ru

Nadezhda N. Makagonova

PhD., Associate Professor, IT Chief Specialist, Department of energy security

e-mail: mak@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. Long-term forecasting of energy demand is the first and an important stage in the development of regional and national energy strategies and policies. Changes in the conditions of future energy development by spreading smart grid impose new requirements on the methodology of energy demand forecasting. Consumers are important component of the Smart Grid concept. In future consumers as equal energy market participants can form demand and prices and influence on level of energy system adaptability. Urgent task is to estimate the impact of consumer behavior on prospective electricity demand in a regional power system. The use of semantic approach allows us to overcome the difficulties in modeling the impact of consumer behavior that are associated with high uncertainty and impossibility to formalize grid-consumer interconnections. The developed algorithm and models based on the agent approach make it possible to assess the possibilities and the strength of consumer behavior effect on the structure and operating conditions of the regional power grid.

Keywords: controlled-load consumer, semantic approach, agent-based modeling, electricity demand, ontology, cognitive model, price.

References

1. Aizenberg N.I., Stashkevich E.V., Voropai N.I. Koordinatsiya vzaimodejstviya ehlektrosnabzhayushchej organizatsii i aktivnyh potrebitelej pri optimizatsii sutochnyh grafikov nagruzki [Coordination of the interaction between electricity supply company and active consumers in the optimization of daily load schedules] // Izvestiya RAN, Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series. 2016. No 3. Pp. 44–54. (in Russian)

2. Veselov F.V., Fedosova A.V. Smart Grid – umnyj otvet na vyzovy "umnoj" jekonomiki [Smart Grid - smart answer to the challenges of the "smart" economy] // Jenergorynok = The energy market. 2011. No. 5. Pp. 52–58. (in Russian)
3. Volkova I.O., Gubko M.V., Salnikova E.A. Aktivnyj potrebitel': zadacha optimizacii potrebleniya ehlektroehnergii i sobstvennoj generacii [Active consumer: problem of joint optimization of energy consumption and local generation] // Problemy upravleniy = Control Science. 2013. No 6. Pp. 53–61. (in Russian)
4. Voropaj N.I., Stychinski Z.A., Kozlova E.V., Stepanov V.S., Suslov K.V. Optimizaciya sutochnyh grafikov nagruzki aktivnyh potrebitelej [Optimization of daily load schedules of active consumers] // Izvestiya RAN, Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series. 2014. No 1. Pp. 84–90. (in Russian)
5. Gal'perova E.V., Gal'perov V.I. Modelirovanie povedeniya aktivnogo potrebitelya na osnove agentnogo podhoda [Modeling the active consumer behavior based on the agent approach] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Informational and mathematical technologies in science and management. 2017. No 4 (8). Pp. 28–38.
6. Kobec B.B., Volkova I.O. Innovacionnoe razvitie jelektrojenergetiki na baze koncepcii SMART GRID [Innovative development of the electric power industry on the basis of the SMART GRID concept] // Moskva = Moscow. Izdatel'skij centr "Jenergija" = Publishing center «Energy». 2010. 208 p. (in Russian)
7. Koncepcija intellektual'noj jelektrojenergeticheskoj sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoj set'ju. [The concept of an intelligent electric power system in Russia with an active-adaptive network] / Pod red. E.V. Fortova, A.A. Makarova // Moskva = Moscow. OAO «FSK EJeS» = JSC FGC UES. 2012. 235 p. (in Russian)
8. Loktionov V.I. Adaptivnost' variantov razvitiya ehnergeticheskikh sistem kak pokazatel' ehnergeticheskoj bezopasnosti [Adaptability of energy systems development options as an indicator of energy security] // EHkonomicheskij analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice. 2015. No 40. Pp. 11–21. (in Russian)
9. Massel L.V., Galperov V.I. Razrabotka mnogoagentnoj sistemy ocenivaniya sostojaniya jelektrojenergeticheskikh sistem s ispol'zovaniem sobytijnyh modelej [Development of a multi-agent system for assessing the state of electric power systems using event models] // Nauka I obrazovanie = Science and Education. Moskva = Moscow. MGTU im. Baumana = MSTU them. Bauman. Jel. 2015. No 9. El.№FS77-4211. ISSN 1994-0448. DOI: 10.7463/ 0915. 0811180 (in Russian)
10. Massel L.V., Massel A.G. Intellektual'nye vychisleniya v issledovaniyah napravlenij razvitiya ehnergetiki [Intelligent computing in areas of energy development studies] // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Management, computer facilities and informatics. 2012. vol. 321. No 5. Pp. 135–141. (in Russian).
11. Rassel S., Norvig P. Iskusstvennyj intellekt: sovremennyj podhod [Artificial intelligence: a modern approach]. 2-e izd.: Per. s angl.=2nd ed.: Trans. from English. Moskva = Moscow. Izdatel'skij dom "Vil'jams" = Publishing house "Williams". 2006. 1408 p. (in Russian)

12. Sidorenko V.N. Krasnosel'skij A.V. Imitacionnoe modelirovanie v nauke i biznese: podhody, instrumenty, primenenie [Simulation modeling in science and business: approaches, tools, application] // *Biznes-informatika = Business Informatics*. 2008. No 2(08). Pp. 52–57 (in Russian)
13. Smirnov V.A. Processy adaptacii v razvitii ehnergetiki [Adaptation processes in energy development] Moskva = Moscow. Nauka = Science. 1983. 196 p.
14. Stennikov V.A. Integrirovannye intellektual'nye jenergeticheskie sistemy [Integrated Intelligent Power Systems]. Available at: <http://isem.irk.ru/upload/iblock/cef/cef1938237b98ee723192b6676049d89.pdf> (accessed 4.04.2017) (in Russian)
15. Stoljarov L.N., Novik K.V. Joiner-set' dlja modelirovanija vzaimodejstvujushhijh parallel'nyh processov [Joiner-network for modeling interacting parallel processes] // *Modelirovanie processov upravlenija: Sb. Nauchnyh trudov = Modeling of control processes: Sat. Scientific works*. Moskva = Moscow. Mosk. fiz.-teh. in-t. = Fiz.-tech.in-t. 2004. Pp. 81–97 (in Russian)
16. Trahtengerc Eh.A. Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya reshenij [Computer support of decision-making] Moskva=Moscow. SINTEG. 1998. 376 p.
17. Filippov S.P. Prognozirovanie jenergotreblenija s ispol'zovaniem kompleksa adaptivnyh imitacionnyh modelej [Energy forecasting using a complex adaptive simulation models] // *Izvestija RAN. Seriya Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series*. 2010. No. 4. Pp. 41–55. (in Russian).
18. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Alberto Leon-Garcia. Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments // *IEEE Trans. on Smart Grid*. 2010. Vol. 1. N 1. Pp. 120–133.
19. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W.S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober, Alberto Leon-Garcia. Autonomous Demand Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid // *IEEE Trans. on Smart Grid*. 2010. Vol. 1. N 3. Pp. 320–331.
20. Axelrod R. *Structure of Decision: the cognitive maps of political elites*. Princeton Univ. Press. N.Y.: 1976. 395 p.
21. Bingnan Jiang, Yunsi Fei. Dynamic Residential Demand Response and Distributed Generation Management in Smart Microgrid with Hierarchical Agents // *Energy Procedia*. 2011. Vol. 12. Pp. 76–90.
22. Chateau B., Lapillonne B. The MEDEE Approach: Analysis and Long-term Forecasting of Final Energy Demand of Country // *Energy Modelling Studies and Conservation: Proceedings of a Seminar of the United Nations Economics Commission for Europe, Washington D.C., 24–28 March 1980*. Elsevier, 1982. Pp. 57–67.
23. *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*. International Energy Agency. Available at: www.iea.org/etp2017 (accessed 11.12.2018)
24. Juan M. Lujano-Rojas, Claudio Monteiro, Rodolfo Dufo-Lopez, Jose L. Bernal-Agustin. Optimum residential load management strategy for real time pricing demand response programs // *Energy Policy*. 2012. Vol. 45. Pp. 671–679.

25. Kumarsinh Jhala, Balasubramaniam Natarajan, Anil Pahwa. Prospect Theory based Active Consumer Behavior Under Variable Electricity Pricing // IEEE Transactions on Smart Grid. PP(99):1-1 03/2018. 12 p. DOI:10.1109/TSG.2018.2810819 Available at: https://www.researchgate.net/publication/323501905_Prospect_Theory_based_Active_Consumer_Behavior_Under_Variable_Electricity_Pricing (accessed 11.12.2018)
26. Nikhil Gudi, Lingfeng Wang, Vijay Devabhaktuni. A demand side management based simulation platform incorporating heuristic optimization for management of household appliances // Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 43. Pp. 185–193.
27. Ning Zhanng, Ochoa L.F., Kirschen D.S. Investigating the impact of demand side management on residential consumers // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, Manchester, UK, December 5-7. 2011. 7 p.
28. 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 20.07.2018)

Acknowledgments. The article is supported by state task III.17.5.2, № AAAA-A17-117030310452-7 and the Russian Foundation for Basic Research (project №17-06-00102 and № 18-010-00176)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПЕРСОНАЛОМ РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Гвоздев Владимир Ефимович

Д.т.н., профессор, зав. Кафедрой «Техническая кибернетика»,

e-mail: wega55@mail.ru

Черняховская Лилия Рашитовна

Д.т.н., профессор, e-mail: lrchern@yandex.ru

Мухаметьянова Регина Ильфатовна

Инженер, e-mail: lequel@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет
им. С. Орджоникидзе», 450008 г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

Аннотация. Интеллектуальная поддержка принятия решений в процессе развития промышленного предприятия основана на менеджменте знаний, направленном на совершенствование бизнес-процессов и обеспечение конкурентных преимуществ предприятия. В современных условиях развития высоких технологий возрастает значимость управления персоналом, соответствующего долгосрочной стратегии развития предприятия. В данной статье рассматриваются задачи управления эффективностью персонала, для решения которых предлагается применить как математические методы оптимизации, так и методы искусственного интеллекта, такие, как интеллектуальный анализ данных, онтологический анализ и принятие решений с использованием базы знаний.

Ключевые слова: интеллектуальная поддержка принятия решений, управление персоналом, онтология.

Цитирование: Гвоздев В.Е., Черняховская Л.Р., Мухаметьянова Р.И. Интеллектуальная поддержка при управлении персоналом развивающегося промышленного предприятия // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 30–37. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-03

Введение. Оценка эффективности управления персоналом основана на информации о работниках: квалификационные характеристики (опыт, знания, компетенции), интеллектуальные способности к развитию, медицинские и психологические параметры, производительность труда и др. При этом нужно учитывать появление новых для российского менеджмента направлений в управлении персоналом, осуществляемых с применением информационных технологий (тестирование, тренинг, свободный режим работы, дистанционное управление персоналом). Анализ информации с применением корпоративных знаний позволяет определять проблемные ситуации, выявлять потребности в корректировке производительности труда и качества работы персонала, принимать решения для обеспечения высокой эффективности работы с персоналом. Результаты оценки и прогнозирования эффективности работы сотрудников имеют практическую ценность для принятия решений по подбору соответствующего персонала, разработке программ обучения

и развития посредством естественного и безопасного воздействия на потенциал работающего, разработке стратегии управления человеческими ресурсами.

1. Обзор существующих исследований и постановка задачи.

Производственные предприятия для сохранения конкурентных позиций обновляют технику и внедряют новые технологии, в соответствии с чем предъявляются более высокие требования к сотрудникам, которые участвуют в реализации решений. Следовательно, для поддержания высокого уровня производительности труда, рабочий ресурс должен соответствовать техническому уровню предприятия. В управлении современными промышленными предприятиями решаются задачи управления персоналом, сложность которых определяется территориальной удаленностью подразделений предприятия, применением аутсорсинга в управлении кадрами, неопределенностью факторов, влияющих на принятие управленческих решений. Для обоснованности и точности принятия решений предлагается разработать распределенную систему поддержки принятия решений, включающую интегрированную онтологию. Анализ результатов исследований в области разработки систем поддержки принятия решений (СППР) в планировании, мониторинге, обработке данных, а также оценке эффективности и качества деловых процессов показывает, что современные СППР включают интеллектуальные компоненты: онтологию, правила и прецеденты принятия решений, алгоритмы логического вывода [2, 6–8]. В то же время недостаточно внимания уделяется взаимодействию этих интеллектуальных компонентов, семантической интеграции и преобразованию различных моделей представления знаний, а также проблемам информационного и логического поиска требуемых данных.

2. Структура и взаимодействие компонентов системы поддержки принятия решений. Разработка и применение соответствующих алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия решений и предоставление рекомендаций в удобном для пользователей формате выполняются на основе взаимодействия интегрированной онтологии и программной среды *MATLAB*, что позволяет не только осуществлять информационный поиск, но и выполнять аналитическую поддержку принятия решений [1]. На рис. 1 представлена обобщенная схема распределенной интеллектуальной системы поддержки принятия решений.

Онтология есть явно понимаемая концептуализация, то есть совокупность понятий в рассматриваемой предметной области и отношений между понятиями [9]. Формально предметная онтология состоит из множества терминов предметной области, организованных в таксономию, их определений и атрибутов, а также связанных с ними аксиом и правил вывода [10]. Онтология предметной области представлена как набор элементов:

$$Onto^{App} = \langle C, Pr, V, I, R, A, D \rangle,$$

где $C = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ – множество классов сущностей,

$Pr = \{Pr_1, Pr_2, \dots, Pr_M\}$ – свойства сущностей,

$V = \{V_1, V_2, \dots, V_K\}$ – значения свойств,

$I = \{I_1, I_2, \dots, I_L\}$ – множество экземпляров класса,

R – множество отношений $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$,

$A = \{A1, A2, \dots, A_Q\}$ – множество аксиом,

$D = \{D1, D2, \dots, D_H\}$ – множество алгоритмов вывода на онтологии [5].

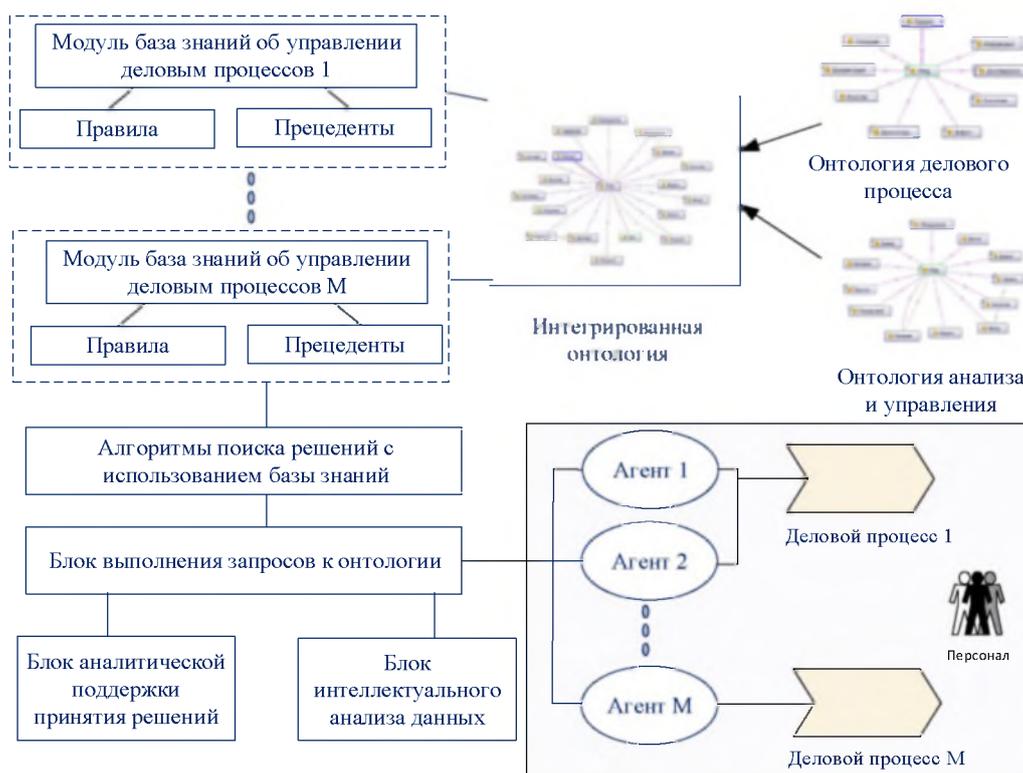


Рис. 1. Обобщенная схема распределенной интеллектуальной системы поддержки принятия решений

Интегрированная онтология рассматривается как глобальная концептуализация, представляющая общую информацию о процессах, реализуемых на предприятии, с целью поддержки запросов высокого уровня и коммуникации между сотрудниками. Под агентом здесь понимается сотрудник предприятия, работающий с определенной информацией, или программа, предназначенная для выполнения поисковых запросов в соответствующей онтологии (так как онтология есть модель представления знаний, доступная для понимания программными агентами). Блок выполнения запросов к онтологии осуществляет трансляцию запросов с использованием языков SPARQL и OWL-DL и передает результаты запросов модулю аналитической поддержки принятия решений и модулю интеллектуального анализа данных. На рис. 2 показан фрагмент интегрированной онтологии поддержки принятия решений.

Интеграция ранее созданных онтологий осуществляется с помощью процедур слияния онтологий. Для разработки онтологии поддержки принятия решений ранее были созданы отдельно онтология анализа и управления персоналом, а также онтология деловых процессов. Далее производится процесс слияния разработанных онтологий в онтологическом редакторе *Protégé*. Слияние разработанных онтологий в одну в редакторе онтологии *Protégé* осуществлено посредством выбора на вкладке «*Refactor*» пункта «*Merge ontologies...*» и выполнения шагов взаимодействия с диалоговым окном создания онтологий.

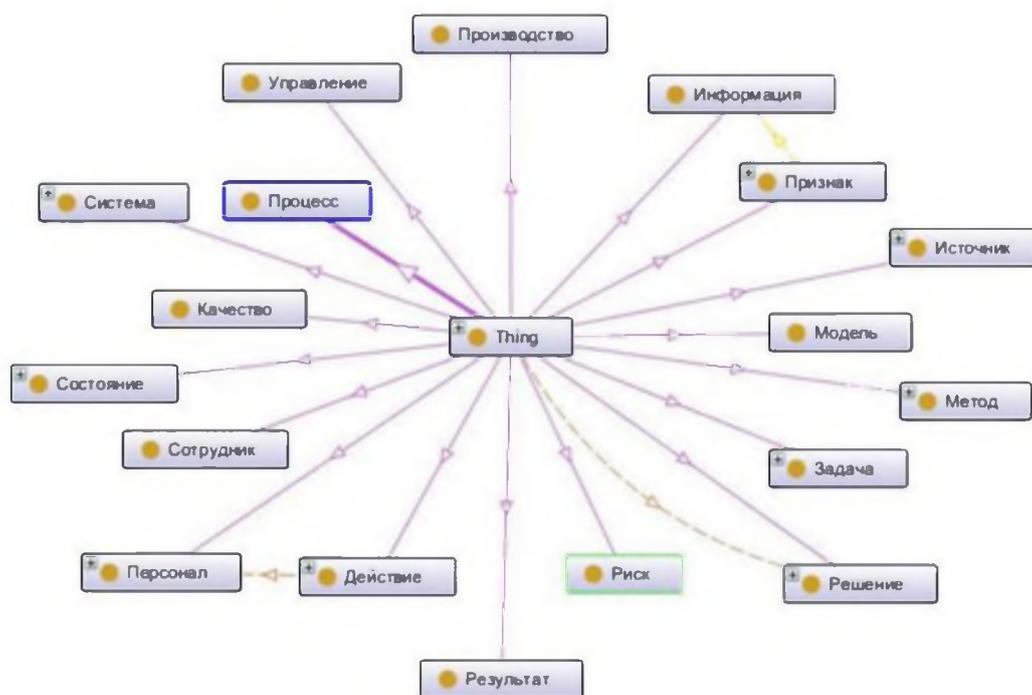


Рис. 2. Фрагмент интегрированной онтологии поддержки принятия решений

3. Разработка базы знаний системы поддержки принятия решений. Выбор модели представления знаний определяется следующими соображениями:

- ограниченными временными ресурсами управления;
- количеством и разнообразием примеров в рассматриваемой предметной области;
- особенностями экспертных знаний в предметной области и наличием квалифицированных экспертов;
- требованиями к организации диалога пользователя (управляющего) с системой поддержки принятия решений.

База знаний системы поддержки принятия решений включает правила и прецеденты проблемных ситуаций.

Системный подход к организации поддержки принятия решений в проблемных ситуациях предполагает анализ данных о проблемных ситуациях и выявление присутствующих в них детерминированных и вероятностных структур.

Для того, чтобы перейти от разрозненных описаний проблемных ситуаций к поддержке принятия решений, необходимо осуществить переход от данных к знаниям на основе методов интеллектуального анализа данных (ИАД). Методы ИАД позволяют автоматизировать процесс выявления метазнаний, определяющих организацию предметных знаний, выявляющих наличие скрытых закономерностей, отношений между элементами предметных знаний. При решении рассматриваемой проблемы поддержки принятия решений в проблемных ситуациях методы интеллектуального анализа данных используются для выявления знаний из данных о проблемных ситуациях. Интеллектуальный анализ данных, содержащихся в прецедентах проблемных ситуаций, проводится с целью установления соответствия между классами прецедентов проблемных ситуаций и управляющими решениями [3, 4]. Таким образом, становится возможным построить альтернативные модели

типовых вариантов процесса развития проблемных ситуаций и принятия управляющих решений и сохранять их в базе знаний.

Постановка задачи создания продукционных правил соответствует формальному представлению онтологии, включающему классы сущностей и прецеденты как экземпляры классов сущностей.

Прецеденты есть конкретные экземпляры объектов или событий, принадлежащие данной предметной области управления процессами на предприятии. Иерархия классов онтологии включает класс «Проблемная ситуация», подклассами которой являются классы типовых проблемных ситуаций (ПС), требующих принятия решений, например «ПС назначения сотрудника на работу», «ПС аттестация сотрудника», «ПС оценки выполнения работы», «ПС выбор вида обучения сотрудника» и др. Рассмотрим некоторый i -й класс ПС, включающий множество экземпляров классов $Case_i$ как прецедентов ПС:

$$Case_i = \{Case_{1i}, Case_{2i}, \dots, Case_{ki}, Case_{ki}\}, k=1, \dots, K.$$

Таким образом, прецедент $Case_{ki}$ есть совокупность следующих объектов:

$$Case_{ki} = \langle Case_name_{ki}, C_i, \{X_{kil}\}, D_r, E_r \rangle,$$

где $Case_name_{ki}$ – название прецедента (идентификатор); C_i – класс проблемной ситуации, к которой относится прецедент; $\{X_{kil}\}$ – множество значений признаков описания прецедента, относящегося к классу C_i ; $l = 1, \dots, L$, D_r – подмножество управляющих решений, содержащихся в прецеденте; E_r – множество оценок эффективности принятых решений $r = 1, \dots, R$. Для каждого l -го признака k -го прецедента i -го класса ПС определены: тип признака $type_X_{kil}$, соответствующий типу класса ПС, и вес признака w_X_{kil} , вектор весов признаков обычно нормируется.

Задача обучения по прецедентам формулируется с применением алгоритма интеллектуального анализа данных ID3. Для реализации алгоритма ID3 было выбрано программное средство See5. Несмотря на то, что алгоритм ID3 строит простое дерево решений, совсем не очевидно, что с помощью этих деревьев можно эффективно классифицировать неизвестные примеры. Поэтому алгоритм ID3 был протестирован на контрольных примерах и реальных приложениях. Тесты подтвердили его хорошую работоспособность.

Результатом обучения является множество продукционных правил вида «Если - То», основанных на, сформированном ID3, дереве решений.

Правила $R_q \in Rule$, где $q = 1, \dots, Q$, определены в следующей форме:

$$\langle S, a_1, U_1, \dots, a_n, U_n; P_1, \dots, P_m; b, U_b, S' \rangle,$$

S' – ситуация, возникающая в результате принятого решения; S – исходная ПС; $a_i \in A$ есть предпосылки ПС, $n \geq 1$; $U_i \in U$ – требуемые оценки степени уверенности в предпосылках; b – заключение с оценкой степени уверенности U_b ; $P_j \in P$, где $j = 1, \dots, m$ есть предикаты, $m \geq 1$.

Например, правила для подбора персонала формируются по результатам интеллектуального анализа данных (ИАД) и создаются в онтологии с применением языка Semantic Web Rule Language.

Заключение. Результаты оценки и прогнозирования эффективности работы сотрудников имеют практическую ценность для принятия решений по подбору соответствующего персонала, разработке программ обучения и развития посредством

естественного и безопасного воздействия на потенциал работающего, разработке стратегии управления человеческими ресурсами.

Благодарности. Работа поддержана грантом РФФИ 18-00-00238 «Методы и модели поддержки принятия решений при управлении инновационными проектами на основе инженерии знаний».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилова Т.А., Муромцев Д.И. Интеллектуальные технологии в менеджменте: инструменты и системы: Учеб. пособие, 2-е изд. СПб.: Изд-во С.-Петербур. гос. ун-та. 2008. 488 с.
2. Люгер Дж. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс». 2003. 864 с.
3. Никулина Н.О., Черняховская Л.Р. Модели информационной поддержки принятия решений с использованием систем электронным документооборотом: учебное пособие. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет. 2009. 134 с.
4. Поддержка принятия решений при стратегическом управлении предприятием на основе инженерии знаний. Монография / Л.Р. Черняховская, Е.Б. Старцева, П.В. Муксимов, А.И. Малахова, К.А. Макаров. Уфа: АН РБ, Гилем. 2010. 128 с.
5. Тузовский А.Ф., Чириков С.В., Ямпольский В.З. Системы управления знаниями (методы и технологии). Под общ. ред. В.З. Ямпольского. Томск: Издательство научно-технической литературы. 2005. 260 с.
6. Anderlik S., Stumptner R., Freudenthaler B. and Fritz M. A Proposal for Ontology-based Integration of Heterogeneous Decision Support Systems for Structural Health Monitoring // The 12th International Conference on Information Integration and Web Based Applications & Services (iiWAS2010). 2010.
7. Cheyer A., Park J., Giuli R. IRIS: Integrate, Relate, Infer, Share // Proc. of Semantic Desktop Workshop at the ISWC, Galway, Ireland, November 6, 2005, CEUR Workshop Proceedings, ISSN 1613-0073. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-175/17_park_iris_fm.pdf (accessed 09.04.2019)
8. Cruz I. F., Xiao H., Lab A. The Role of Ontologies in Data Integration // International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications. CRL Publishing, Leicester. 2005. 13(4). Pp. 245–252.
9. Gruber T.R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications // Knowledge Acquisition. 1993. 5(2). Pp. 199–220.
10. Guarino N., Giaretta P. Ontologies and Knowledge Bases: Towards a Terminological Clarification. In book: Towards very large knowledge bases: knowledge building and knowledge sharing. ISO Press, Amsterdam. 1995. Pp. 25–32.

**INTELLIGENT SUPPORT IN THE PERSONNEL MANAGEMENT
OF A DEVELOPING INDUSTRIAL ENTERPRISE**

Vladimir E. Gvozdev

Dr., Professor, Head. Laboratory «Technical Cybernetics»

e-mail: wega55@mail.ru

Liliya R. Chernyahovskaya

Dr., Professor Laboratory «Technical Cybernetics»

e-mail: lrchern@yandex.ru

Regina I. Mykhametyanova

Engineer Laboratory «Technical Cybernetics»

e-mail: lequel@mail.ru

Ufa State Aviation Technical University them. S. Ordzhonikidze ,
12, K. Marks str., 450008, Ufa, Russia

Abstract. Intellectual decision support in the development of an industrial enterprise is based on knowledge management, aimed at improving business processes and ensuring the competitive advantages of an enterprise. In modern conditions of development of high technologies, the importance of personnel management, the corresponding long-term strategy for the development of the enterprise. This article discusses the tasks of personnel efficiency management, for solving which it is proposed to apply both mathematical optimization methods and artificial intelligence methods, such as data mining, ontological analysis and decision making using the knowledge base.

Keywords: intellectual decision support, personnel management, ontology.

References

1. Gavrilova T.A., Myromtcev D.I. *Intellektual'nyye tekhnologii v menedzhmente: instrumenty i sistemy: Uchebnoye posobiye, 2-ye izd.* [Intellectual technologies in management: tools and systems: Tutorial, 2nd ed. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. gos. un-ta = St. Petersburg: Publishing house of Saint Petersburg State University. 2008. 488 p. (in Russian)]
2. Luger G. *Iskusstvennyy intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem [Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving].* Moscow. Publishing house «Williams». 2003. 864 p. (in Russian)
3. Nikylyina N.O., Chernyahovskaya L.R. *Modeli informatsionnoy podderzhki prinyatiya resheniy s ispol'zovaniyem sistem elektronnykh dokumentooborotom: uchebnoye posobiye [Models of information decision support using electronic document management systems: tutorial].* Ufa: Ufimskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskii universitet = Ufa: Ufa State Aviation Technical University. 2009. 134 p. (in Russian)
4. *Podderzhka prinyatiya resheniy pri strategicheskoy upravlenii predpriyatiyem na osnove inzhenerii znaniy [Decision support in strategic enterprise management based on knowledge engineering]* / Edited by L.R. Chernyahovskaya. Ufa. AN RB, Gilem. 2010. 128 p. (in Russian)
5. Tyzovskii A.F., Chirikov S.V., Yampolskii V.Z. *Sistemy upravleniya znaniyami (metody i tekhnologii) [Knowledge management system (methods and technologies)]* / Edited by

- Yampolskii V.Z. Tomsk. Izdatel'stvo nauchno-tehnicheskoy literatury = Publishing House of Scientific and Technical Literature. 2005. 260 p. (in Russian)
6. Anderlik S., Stumptner R., Freudenthaler B. and Fritz M. A Proposal for Ontology-based Integration of Heterogeneous Decision Support Systems for Structural Health Monitoring // The 12th International Conference on Information Integration and Web Based Applications & Services (iiWAS2010). 2010.
 7. Cheyer A., Park J., Giuli R. IRIS: Integrate, Relate, Infer, Share // Proc. of Semantic Desktop Workshop at the ISWC, Galway, Ireland, November 6, 2005, CEUR Workshop Proceedings, ISSN 1613-0073. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-175/17_park_iris_fm1.pdf (accessed 09.04.2019)
 8. Cruz I. F., Xiao H., Lab A. The Role of Ontologies in Data Integration // International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications. CRL Publishing, Leicester. 2005. 13(4). Pp. 245–252.
 9. Gruber T.R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications // Knowledge Acquisition. 1993. 5(2). Pp. 199–220.
 10. Guarino N., Giaretta P. Ontologies and Knowledge Bases: Towards a Terminological Clarification. In book: Towards very large knowledge bases: knowledge building and knowledge sharing. ISO Press, Amsterdam. 1995. Pp. 25–32.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР ЭНЕРГЕТИКИ

Ворожцова Татьяна Николаевна

К.т.н., вед. инженер лаборатории информационных технологий в энергетике,

e-mail: tnn@isem.irk.ru

Няткова Наталия Ивановна

К.т.н., ст. науч. сотрудник лаборатории развития ТЭК

e-mail: nata@isem.irk.ru

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

664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. В статье предлагается концептуальная модель знаний для исследования топливно-энергетического комплекса как критической инфраструктуры. Предложено в качестве концептуальной модели использовать систему взаимосвязанных онтологических моделей, отражающих базовые понятия предметной области и их взаимосвязи. Рассматривается структура объектов топливно-энергетического комплекса, задачи исследований с позиций энергетической безопасности и требуемая информационная база. Разработанная система онтологий используется для структурирования, интеграции знаний при исследованиях критических инфраструктур энергетики.

Ключевые слова: критическая инфраструктура, энергетическая безопасность, топливно-энергетический комплекс, онтология, метаонтология, концептуальная модель, моделирование знаний, фрактальная модель

Цитирование: Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Концептуальная модель знаний для исследований критических инфраструктур энергетики // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 38–46. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-04

Введение. В настоящее время исследования критических инфраструктур становятся все более актуальными. За рубежом исследования критических инфраструктур начались в 90-х годах прошлого века, были предложены различные трактовки термина «критическая инфраструктура» [9, 10], созданы исследовательские центры.

Под критической понимается «инфраструктура, элементы которой имеют особое значение для государства и общества, выход из строя или ограничение работоспособности которых привели бы к длительным перебоям в снабжении, серьезным нарушениям общественной безопасности или иным драматическим последствиям» [4]. К критически важной инфраструктуре относятся объекты, сети, службы и системы, сбой в работе которых отразится на здоровье, безопасности и благосостоянии граждан. В соответствии с этим определением к категории критических инфраструктур можно отнести как отраслевые системы энергетики, так и топливно-энергетический комплекс [ТЭК], представляющий собой взаимосвязанную инфраструктуру, состоящую из отдельных систем энергетики.

1. ТЭК как критическая инфраструктура. Федеральный закон «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса» [6] определяет важнейшие объекты

топливно-энергетического комплекса. К ним относятся объекты, нарушение или прекращение работы которых приведет к потере контроля над экономикой Российской Федерации, субъекта Российской Федерации или административно-территориальной единицы, ее необратимым отрицательным изменениям (уничтожению) или значительному уменьшению безопасности жизни населения.

В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева исследование топливно-энергетического комплекса как критической инфраструктуры является одним из важных направлений исследований надежного энергоснабжения потребителей.

Указанный закон дает следующие определения рассматриваемой предметной области. Объектами ТЭК являются объекты электроэнергетики, нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, газовой, угольной, сланцевой и торфяной промышленности, а также объекты нефтепродуктообеспечения, теплоснабжения и газоснабжения.

Линейные объекты ТЭК – электрические сети, магистральные газопроводы, нефтепроводы и нефтепродуктопроводы, предназначенные для обеспечения передачи электрической энергии, транспортировки газа, нефти и нефтепродуктов.

К критическим элементам объекта ТЭК относятся потенциально опасные элементы (участки), совершение акта незаконного вмешательства в отношении которых приведет к прекращению нормального функционирования объекта ТЭК, его повреждению или к аварии на объекте ТЭК.

Потенциально опасные объекты (участки) ТЭК – это объекты (территориально выделенные зоны (участки), конструктивные и технологические элементы объектов), на которых используются, производятся, перерабатываются, хранятся, эксплуатируются, транспортируются или уничтожаются радиоактивные, взрыво-, пожароопасные и опасные химические и биологические вещества, а также гидротехнические и иные сооружения, аварии на которых могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций с опасными социально-экономическими последствиями.

Охраняемые объекты ТЭК – это здания, строения, сооружения, а также прилегающие к ним территории и акватории в пределах установленных границ.

Эти определения являются базовыми при описании исследуемой предметной области.

Закон также предусматривает категорирование объектов ТЭК с учетом степени потенциальной опасности совершения акта незаконного вмешательства и его возможных последствий. При этом учитываются следующие факторы:

- является ли объект критически важным объектом для инфраструктуры и жизнеобеспечения ТЭК,
- масштабы возможных социально-экономических последствий вследствие аварий,
- наличие критических элементов объекта ТЭК,
- наличие потенциально опасных участков объекта ТЭК,
- наличие на объекте уязвимых мест.

Главной целью обеспечения безопасности объектов ТЭК является их устойчивое и безопасное функционирование, защита интересов личности, общества и государства от актов незаконного вмешательства.

2. Задачи исследований. В ИСЭМ СО РАН проводятся исследования критических инфраструктур с позиций энергетической безопасности. Энергетическая безопасность страны и ее регионов предполагает сбалансированность спроса и предложения энергоресурсов в критических или чрезвычайных ситуациях [7]. На рис. 1 представлена схема, отражающая взаимосвязи базовых характеристик, учитываемых при моделировании функционирования объектов топливно-энергетического комплекса.

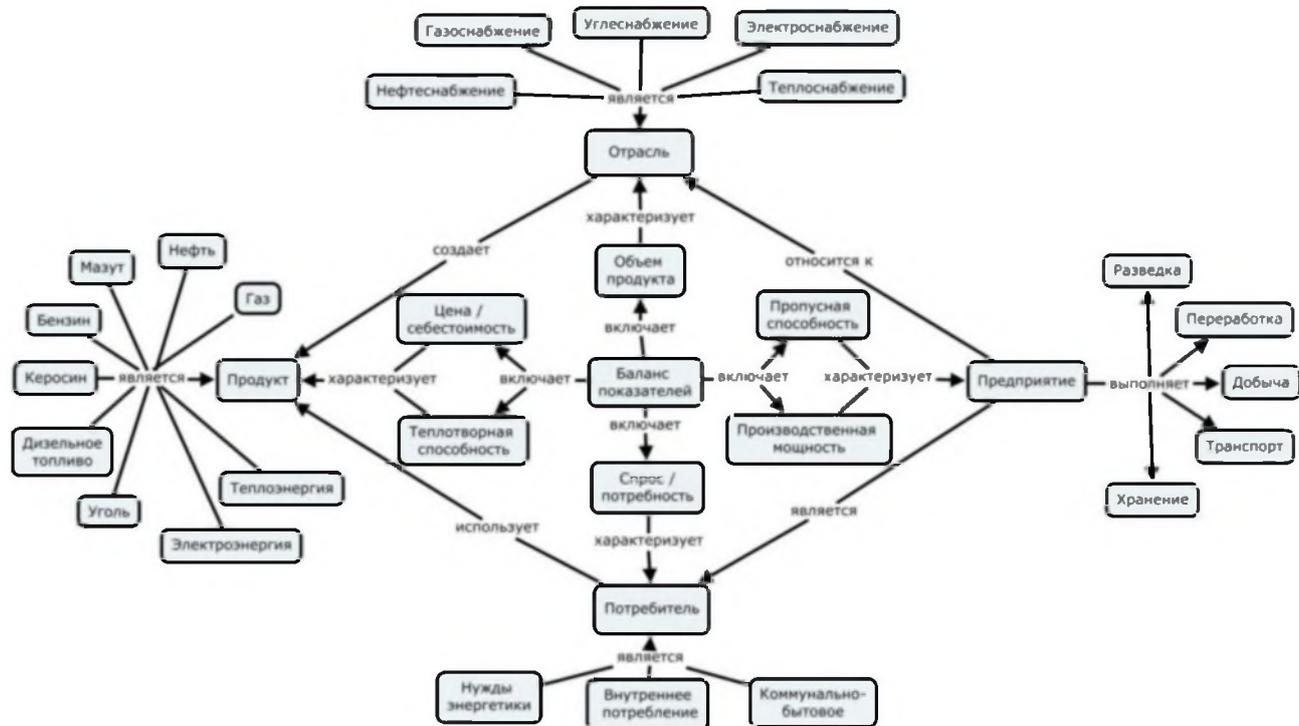


Рис. 1. Схема взаимосвязей показателей объектов ТЭК

При этом должно учитываться множество характеристик (показателей) объектов ТЭК, а также достаточно подробно представлена территориально-производственная структура ТЭК. Одна из основных целей исследований состоит в выявлении ключевых объектов (или их совокупности), воздействие на которые может оказать наиболее негативный эффект на отрасль, ключевой ресурс или всю инфраструктуру. Необходимо оценить последствия такого воздействия и разработать механизмы снижения таких рисков.

При этом решаются следующие задачи:

- Формирование возможных угроз.
- Разработка сценариев потенциальных угроз.
- Анализ уязвимых мест.
- Оценка последствий негативного воздействия.
- Разработка механизмов защиты.
- Прогнозирование состояния систем энергетики.
- Оценка функционирования систем энергетики.

Исследования критических инфраструктур выполняются на базе вычислительных экспериментов с применением экономико-математических моделей. При этом решаются задачи по прогнозированию, функционированию и оценке состояния систем энергетики с учетом возможных нештатных ситуаций, а также выбору мер по снижению их негативного воздействия.

Для решения этих задач разработана система экономико-математических моделей функционирования систем энергетики (СЭ) и ТЭК в целом [2]. Используемые территориально-производственные модели отражают технологический цикл преобразований энергоресурсов, имитируют работу ключевых отраслевых объектов в заданных условиях функционирования. При этом моделируются возможные состояния объектов энергетики в условиях нештатных ситуаций.

3. Знания для исследований критических инфраструктур. Для выполнения исследований требуется достаточно сложная информационная база, включающая:

- Техничко-экономические характеристики энергетических объектов
- Отчетные данные о состоянии систем энергетики
- Местоположение объекта
- Взаимосвязи объектов
- Значимость объекта для взаимосвязанных этапов производственного процесса
- Взаимодействие с другими элементами инфраструктуры

При моделировании используются результаты исследований развития ТЭК и другие показатели, характеризующие цикл преобразований энергетических ресурсов. Учитывается территориальное, отраслевое, временное деление и множество топливно-энергетических ресурсов, объектов и территориальных образований. Объекты описываются протекающими в них процессами, технологическими и экономическими характеристиками. Используемые модели учитывают межотраслевые связи, состояние систем энергетики и ТЭК в нештатных ситуациях и позволяют выявить ограничения, которые негативно влияют на надежное топливо- и энергоснабжение потребителей [1].

4. Концептуальная модель знаний. Для систематизации и структурирования сложной информационной составляющей предлагается разработка базы знаний, включающей описание свойств, структуры и взаимосвязи объектов и систем данной предметной области. Количественные характеристики объектов, как правило, накапливаются в базах данных.

Концептуальные модели используются для построения систем, основанных на знаниях. Концептуальное моделирование – это формальное описание аспектов исследуемой предметной области с целью понимания и коммуникации [11 - 14].

Концептуальная модель знаний – это системное описание используемых знаний, состоящее из множества взаимосвязанных понятий, их свойств и характеристик, с классификацией этих понятий по типам, ситуациям и признакам. В качестве концептуальной модели предлагается онтологическая модель в виде системы онтологий, объединенных метаонтологией [3, 8].

При разработке онтологической модели используется фрактальный подход [5], позволяющий представить необходимую информацию о предметной области в виде непересекающихся слоев – информационных миров, объединяющих однотипные объекты. При этом каждый информационный мир может быть расслоен и детализирован.

Метаонтология включает базовые понятия, например, система, отрасль, объект, ресурс и другие. Для рассматриваемой предметной области предлагается метаонтология, демонстрирующая понятия, используемые при исследовании и моделировании ТЭК. Она показана на рис. 2.

Онтологии каждого следующего уровня детализируют разделы исследуемой предметной области, например, задачи исследований, модели ТЭК, цикл преобразования ресурсов и др.

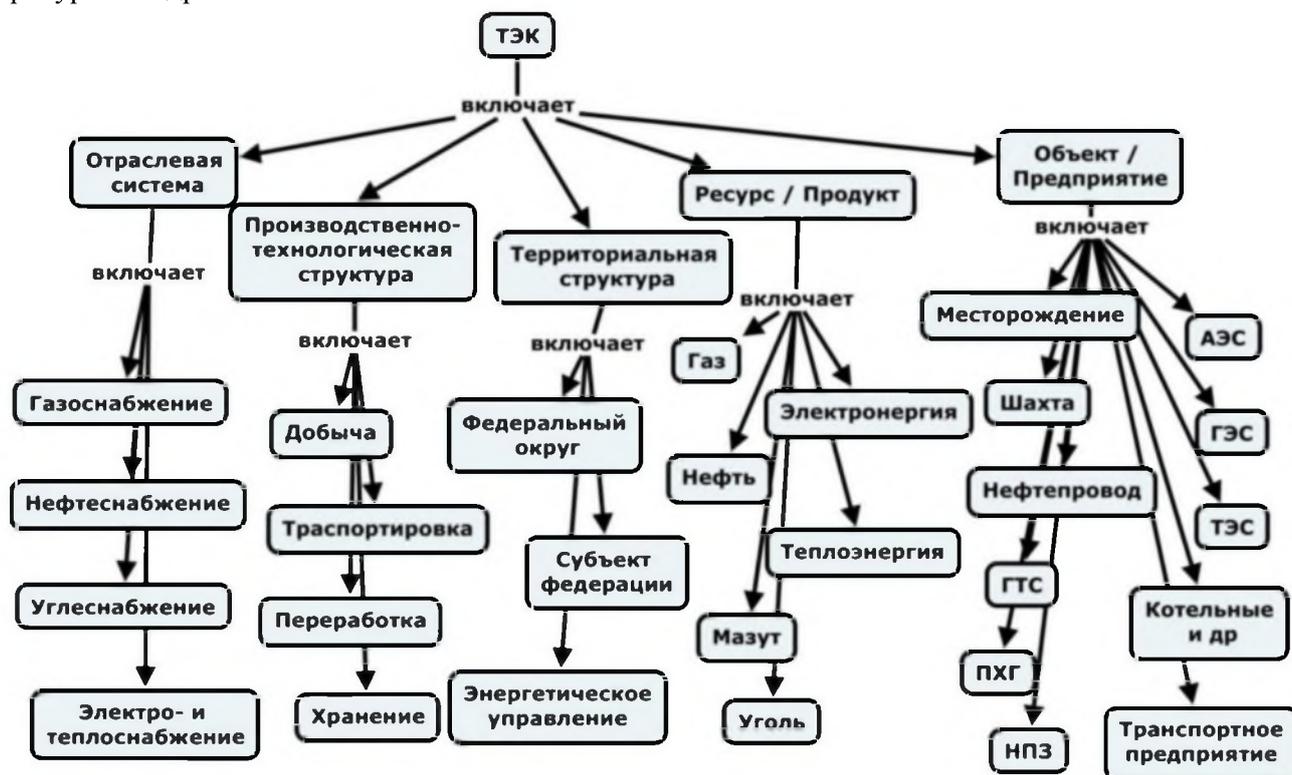


Рис. 2. Метаонтология исследований ТЭК

Добывающие отрасли представлены месторождениями ресурсов, агрегированными по территории. Системы электро- и теплоснабжения представлены соответственно различными типами электростанций и котельных.

Понятие «Производственно-технологическая структура» детализирует этапы производственного процесса – добычу, транспортировку, переработку и хранение энергоресурсов.

К понятию «Территориальная структура», используемому в метаонтологии, относятся федеральные округа, субъекты федерации и районные энергетические объединения. Аналогичным образом онтологии отражают типы производимых и потребляемых энергоресурсов, виды предприятий энергетики.

Каждый из элементов не только детализируется на следующем уровне рассмотрения, но и имеет взаимосвязи с другими концептами на своем уровне, например, на рис. 3 представлены связи концепта «Ресурс» с другими концептами метаонтологии.



Рис. 3. Взаимосвязи концепта «Ресурс»

Онтологии детального уровня, содержащие описание технико-экономических характеристик объектов, предлагается использовать для формирования баз данных, содержащих требуемую количественную информацию. При этом онтологические модели используются для разработки инфологических моделей данных, на основе которых затем проектируются базы данных

Заключение. Предложенная концептуальная модель знаний для исследования критических инфраструктур в энергетике представляет собой систему взаимосвязанных онтологий, представленных на верхнем уровне метаонтологией исследований ТЭК. Метаонтология объединяет несколько слоев онтологий, отражающих разные аспекты знаний, учитываемых при моделировании и выполнении исследований, а именно, отраслевую и производственную структуру, территориальные связи, структуру ресурсов и энергетических объектов. На более детальных уровнях онтологии включают описание систем энергетики, их состояние и характеристики, задачи и модели исследования, возможные угрозы, сценарии функционирования объектов, программное обеспечение и др. Эта информация представляется в графическом виде и может быть преобразована в форматы, удобные для автоматизированной обработки. Предложенная концептуальная модель знаний используется для структурирования и интеграции знаний при исследованиях критических инфраструктур энергетики. Разработанная система онтологий обеспечивает обмен знаниями и взаимодействие исследователей данной предметной области.

Благодарности. Работа выполняется в рамках проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН №АААА-А17-117030310444-2 и при частичной поддержке грантом РФФИ № 19-07-00351 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Береснева Н.М., Еделев А.В., Пяткова Н.И. Исследование критических инфраструктур энергетики с позиций энергетической безопасности // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 68. Исследование и обеспечение надежности систем энергетики / Отв. ред. Н.И. Воропай. ИСЭМ СО РАН. 2017. С. 93-102.
2. Береснева Н.М., Пяткова Н.И. Особенности моделирования функционирования критических инфраструктур энергетики с учетом энергетической безопасности // Энергетическая политика. 2018. № 1. С. 3–12.
3. Бухановский А.В., Нечаев Ю.И. Метаонтология исследовательского проектирования морских динамических объектов // Онтология проектирования. 2012. № 1. С. 53–64.
4. Защита критической инфраструктуры Концепция основных мер защиты Рекомендации для предприятий. Режим доступа: <https://docplayer.ru/26181451-Zashchita-kriticheskoy-infrastruktury-koncepciya-osnovnyh-mer-zashchity.html> (дата обращения 18.03.2019)
5. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // Онтология проектирования. 2016. №2(20). С. 149–161. DOI:10.18267/2223-9537-2016-6-2-149-161.
6. Федеральный закон № 256-ФЗ «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса». Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/12088188/> (дата обращения 18.03.2019)

7. 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.
 8. Hofweber, Thomas (Aug 30, 2011). Edward N. Zalta, ed. "Logic and Ontology: Different conceptions of ontology". The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2013 Edition). Available at: <https://plato.stanford.edu/archives/spr2013/entries/logic-ontology/#DifConOnt> (accessed 10.03.2019)
 9. Keating C., Rogers R., Dryer D., Sousa-Poza A. and other. System of Systems Engineering // Engineering Management Journal. 2003. Vol. 15. № 3 (2003).
 10. Rinaldi S., Peerenboom J., and Kelly T. Identifying, understanding and analyzing critical infrastructure interdependencies // IEEE Control Systems Magazine, IEEE, 2001 December, Pp. 11–25
 11. Robinson, S.: Conceptual Modelling: Who Needs It? SCS M&S Magazine 2010/n2 (April). Available at: http://www.scs.org/magazines/2010-04/index_file/Files/Robinson.pdf (accessed 10.03.2019)
 12. Roger J Brooks, Wang Wang. Conceptual modelling and the project process in real simulation projects: a survey of simulation modelers // Journal of the Operational Research Society. Vol 66, Issue 10, Pp 1669–1685. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1057%2Fjors.2014.128> (accessed 8.02.2019)
 13. Sokolowski, John A.; Banks, Catherine M., ed. Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons. 2010. 437 p. doi:10.1002/9780470590621. ISBN 9780470486740.
 14. Tatomir, A., McDermott, C., Bensabat, J., Class, H., Edlmann, K., Taherdangkoo, R., & Sauter, M. Conceptual model development using a generic Features, Events, and Processes (FEP) database for assessing the potential impact of hydraulic fracturing on groundwater aquifers // Advances in Geosciences. 2018. V.45. Pp. 185–192. Available at: <https://www.adv-geosci.net/45/185/2018/> (accessed 8.02.2019)
-

UDK 004.8

**A CONCEPTUAL KNOWLEDGE MODEL FOR RESEARCH
OF CRITICAL ENERGY INFRASTRUCTURES**

Tatiana N. Vorozhtsova

PhD., leading engineer, Laboratory "Information Technology", e-mail: tnn@isem.irk.ru

Natalia I. Pyatkova

PhD., Senior researcher, Laboratory of fuel and energy development, 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 article proposes a conceptual model of knowledge for the study of the fuel and energy complex as a critical infrastructure. A system of interrelated ontological models reflecting the basic concepts of the subject area and their relationship is proposed as a conceptual model. The structure of the fuel and energy complex objects,

the tasks of research from the standpoint of energy security, the models used for research and the corresponding information base are considered. Quantitative information is presented by technical and economic characteristics of energy facilities, reporting data and research results on the development of the fuel and energy complex. The developed system of ontologies is using to structure and integrate knowledge in the study of critical energy infrastructures.

Keywords: critical infrastructure, energy security, fuel and energy complex, ontology, metaontology, conceptual model, knowledge modeling, fractal model.

References

1. Beresneva N.M., Yedeleev A.V., Pyatkova N.I. Issledovaniye kriticheskikh infrastruktur energetiki s pozitsiy energeticheskoy bezopasnosti [Investigation of critical energy infrastructures from the standpoint of energy security] // Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki: = Methodical issues of the study of the reliability of large energy systems. Iss. 68. Research and ensuring the reliability of energy systems / Resp. ed. N.I. Voropay. ISEM SB RAS. 2017. Pp. 93–102 (in Russian)
2. Beresneva N.M., Pyatkova N.I. Osobennosti modelirovaniya funktsionirovaniya kri-ticheskikh infrastruktur energetiki s uchetom energeticheskoy bezopasnosti [Features of modeling the functioning of critical energy infrastructures with regard to energy security] // Energeticheskaya politika = The energy policy. 2018. № 1. Pp. 3–12 (in Russian)
3. Bukhanovsky A.V., Nechaev Y.I. Metaontologiya issledovatel'skogo proyektirovaniya morskikh dinamicheskikh ob"yektov [Metaontology research designing of sea dynamic objects] // Ontologiya proyektirovaniya = Ontology of designing. 2012. № 1. Pp. 53–64 (in Russian)
4. Zashchita kriticheskoy infrastruktury Kontseptsiya osnovnykh mer zashchity Rekomenda-tsii dlya predpriyatiy [Protection of critical infrastructure. Basic protection concept. Recommendations for enterprises]. Available at: <https://docplayer.ru/26181451-Zashchita-kriticheskoy-infrastruktury-koncepciya-osnovnyh-mer-zashchity.html> (accessed 07.02.2019). (in Russian)
5. Massel' L.V. Fraktal'nyy podkhod k strukturirovaniyu znaniy i primery yego primeneniya [Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application] // Ontologiya proyektirovaniya = Ontology of designing. 2016. №2(20). Pp. 149–161. DOI:10.18267/2223-9537-2016-6-2-149-161. (in Russian)
6. Federal'nyy zakon № 256-FZ «O bezopasnosti ob"yektov toplivno-energeticheskogo kompleksa». [Federal Law No. 256-ФЗ “On the Safety of Fuel and Energy Complex Facilities”] Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/12088188/> (accessed 10.03.2019). (in Russian)
7. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i puti resheniya [Energy security of Russia: problems and solutions] / N.I. Pyatkova [i dr.], otv. red. N.I. Voropay, M.B. Chel'tsov; Ros. Akad. Nauk, Sib. otd-niye, In-t sistem energetiki im. L.A. Melent'yeva. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 2011. 198 p (in Russian)
8. Hofweber, Thomas (Aug 30, 2011). Edward N. Zalta, ed. "[Logic and Ontology: Different conceptions of ontology](#)". The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2013 Edition).

Available at: <https://plato.stanford.edu/archives/spr2013/entries/logic-ontology/#DifConOnt> (accessed 10.03.2019)

9. Keating C., Rogers R., Dryer D., Sousa-Poza A. and other. System of Systems Engineering // Engineering Management Journal. 2003. Vol. 15. № 3 (2003).
10. Rinaldi S., Peerenboom J., and Kelly T. Identifying, understanding and analyzing critical infrastructure interdependencies // IEEE Control Systems Magazine, IEEE, 2001 December, Pp. 11–25
11. Robinson, S.: Conceptual Modelling: Who Needs It? SCS M&S Magazine 2010/n2 (April). Available at: http://www.scs.org/magazines/2010-04/index_file/Files/Robinson.pdf (accessed 10.03.2019)
12. Roger J Brooks, Wang Wang. Conceptual modelling and the project process in real simulation projects: a survey of simulation modelers // Journal of the Operational Research Society. Vol 66, Issue 10, Pp 1669–1685. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1057%2Fjors.2014.128> (accessed 8.02.2019)
13. Sokolowski, John A.; Banks, Catherine M., ed. Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons. 2010. 437 p. doi:10.1002/9780470590621. ISBN 9780470486740.
14. Tatomir, A., McDermott, C., Bensabat, J., Class, H., Edlmann, K., Taherdangko, R., & Sauter, M. Conceptual model development using a generic Features, Events, and Processes (FEP) database for assessing the potential impact of hydraulic fracturing on groundwater aquifers // Advances in Geosciences. 2018. V.45. Pp. 185–192. Available at: <https://www.adv-geosci.net/45/185/2018/> (accessed 8.02.2019)

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ
НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПО ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ**

Массель Алексей Геннадьевич

К.т.н., с.н.с., e-mail: amassel@isem.irk.ru

Бахвалов Кирилл Сергеевич

Соискатель, e-mail: kbakhvalov@yandex.ru

Лаборатория «Информационные технологии в энергетике»,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. В статье описывается решение фундаментальной научной проблемы, заключающейся в разработке методов и интеллектуальных технологий для научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики, с учетом требований кибербезопасности, на основе концепции ситуационного управления, с применением методов машинного обучения, эволюционных вычислений, математического и семантического моделирования.

Ключевые слова: интеллектуальные технологии, цифровая трансформация энергетики, кибербезопасность, ситуационное управление, семантическое моделирование.

Цитирование: Массель А.Г., Бахвалов К.С. Применение интеллектуальных технологий для решения проблемы научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 47–60. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-05

Введение. Получившие в последнее время распространение концепции цифровой экономики и энергетики в РФ обуславливают необходимость решения ряда возникающих при их реализации проблем. В частности, анализ Государственной программы "Цифровая экономика" и федерального проекта "Цифровая энергетика" показывает, что в перечне рекомендуемых информационных технологий отсутствуют «Интеллектуальные технологии поддержки принятия стратегических решений по развитию цифровой энергетики» и «Технологии обеспечения кибербезопасности объектов цифровой энергетики». Разработка этих направлений необходима для решения ряда проблем, возникающих при реализации вышеуказанных концепций. Для разработки теоретических основ этих направлений предлагается интегрировать методы математического и семантического моделирования, а также методы машинного обучения, включающие аппарат глубоких нейронных сетей и эволюционные вычисления (генетические алгоритмы), для определения управляющих воздействий при реализации концепции ситуационного управления. Разработка этих направлений относится к фундаментальным научным задачам (проект поддержан грантом РФФИ №19-07-00351), что обуславливает необходимость разработки теоретических основ этих направлений.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН является одним из лидеров в области системных исследований энергетики России. Основные научные

направления ИСЭМ СО РАН: теория создания энергетических систем, комплексов и установок и управления ими; научные основы и механизмы реализации энергетической политики России и ее регионов. В рамках этих направлений выполняются: исследования систем энергетики (электроэнергетических, газо-, нефте-, нефтепродукто-снабжения, теплосиловых); энергетической безопасности России; региональных проблем энергетики; взаимосвязей энергетики и экономики; перспективных энергетических источников и систем; исследования в области прикладной математики и информатики [15]. В исследованиях систем электроэнергетики использовались искусственные нейронные сети (ИНС) и генетические алгоритмы (ГА), но они до сих пор не применялись для решения проблемы научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики.

В статье рассматривается предлагаемый методологический подход к решению проблемы поддержки обоснования и принятия стратегических решений по развитию энергетики, разрабатываемый в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ №19-07-00351. Новизна предлагаемого подхода обусловлена развитием и интеграцией методов интеллектуальной поддержки принятия решений, базирующихся на ситуационном управлении и сематическом моделировании, и реализующих их научных прототипов, разрабатываемых в коллективе, представляемом авторами.

1. Анализ современного состояния исследований в области цифровой трансформации энергетики. В исследованиях, связанных с цифровой трансформацией энергетики, можно выделить следующие направления:

- 1) умные сети (Smart Grid);
- 2) искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы;
- 3) ситуационное управление;
- 4) семантическое моделирование;
- 5) агентные вычисления;
- 6) кибербезопасность энергетических объектов и систем.

1.1. Умные сети (Smart Grid). В последнее время широкое распространение получили концепции интеллектуальной (Smart Grid) [1–2, 4] и цифровой [18, 19] энергетики. В процессе перехода к интеллектуальным энергетическим системам (ИЭС) и решения проблем, возникающих в результате этого перехода, необходимо выделять две взаимосвязанные области – технологическая инфраструктура и информационно-телекоммуникационная инфраструктура. Современные информационные технологии, являющиеся неотъемлемой частью ИЭС, могут быть в полной мере успешно применены только в случае наличия развитой современной технологической инфраструктуры. Решения по развитию технологической инфраструктуры, безусловно, относятся к классу стратегических решений.

Как отмечается в экспертно-аналитическом докладе Центра стратегических разработок «Цифровой переход в электроэнергетике России» [21], во многих развитых странах мира реализуются сценарии, трансформирующие электроэнергетику на базе клиентоцентричных распределенных архитектур энергосистем. В этом случае подразумевается переход к новой технологической парадигме в электроэнергетике, представляющей организацию энергоснабжения в розничном секторе как экосистему производителей и потребителей энергии, которые беспрепятственно интегрируются в общую инфраструктуру и обмениваются энергией. Такой подход по аналогии

осуществляемых взаимодействий получил название «Интернет энергии» (Internet of Energy) [21].

Ряд проблем, возникающих при переходе к цифровой энергетике, рассматривающийся в источниках [4, 6], можно условно разделить на три класса: когнитивные и управленческие проблемы, связанные с отсутствием достаточного опыта использования когнитивных технологий в управление, научные и технологические ограничения, определяемые отсутствием полноценной современной технологической базы, и кадровые проблемы.

Необходимо отметить, что, с одной стороны, отмечается дефицит научных исследований и доступных прикладных технологических решений в области цифровой энергетики, а с другой, не используются в полной мере потенциал и существующие заделы научных организаций в области исследований энергетики.

1.2. Искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы. На сегодняшний день для интеллектуальной поддержки обоснования и принятия стратегических решений в разных областях деятельности широко применяются адаптивные системы обработки информации, работающие на основе генетических и нейросетевых алгоритмов.

В контексте машинного обучения и эволюционных вычислений необходимо отметить развитие нейронных сетей и генетических алгоритмов. Сегодняшний тренд развития нейросетевых архитектур при обработке динамической информации заключается не только в увеличении количества скрытых слоев [24, 27], но и в более сложном взаимодействии между ними. Современные алгоритмы глубокого обучения совмещают принципы как градиентного, так и эволюционного поиска значений весовых коэффициентов [24, 31]. Так же при работе с глубокими нейронными сетями широкое распространение получил новый функциональный элемент нейрона, называемый блоком краткосрочной-долгосрочной памяти [26].

В настоящее время не используется интеграция методов машинного обучения и эволюционных алгоритмов в области научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики, отсутствуют как соответствующий инструментарий их поддержки, так и методический подход к его реализации. В связи с этим для развития методов машинного обучения и эволюционных алгоритмов, предлагается адаптация методов и бионических моделей выбора управляющих воздействий [23] в концепции ситуационного управления, предложенной для применения при научном обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики.

1.3. Ситуационное управление. Термин «ситуационное управление» сформировался в 60-е годы прошлого века. Основоположником этого направления по праву считается Д.А. Поспелов. Первоначально использовался термин «модельное управление», эта концепция активно развивалась В.Н. Пушкиным и Д.А. Поспеловым, затем возник термин «ситуационная модель». С появлением статьи Д.А. Поспелова [12] термин «ситуационное управление» вытесняет все остальные. Главным достижением этого направления в то время стала идея Д.А. Поспелова о необходимости применения в этой области методов искусственного интеллекта [13].

В настоящее время можно констатировать новый виток интереса к этому направлению, который подкрепляется как наличием более совершенной техники, так и появлением новых методов и подходов, в том числе семантического моделирования:

В настоящий момент получают распространение более прагматические трактовки ситуационного управления. В словаре терминов МЧС (2010) ситуационное управление

определяется как деятельность органов управления, при которой решения и управляющие воздействия субъекта управления основываются на анализе вариантов принятия решения с учетом: текущего состояния объекта управления, располагаемых вариантов действий и прогноза последствий принимаемых управленческих воздействий. Иногда ситуационное управление определяется как оперативное управление, осуществляемое в дополнение к стратегическому, перспективному и заключается в принятии управленческих решений по мере возникновения проблем в соответствии со складывающейся ситуацией.

Данную концепцию ситуационного управления возможно и целесообразно применить в области обоснования стратегических решений [14]. В качестве основных методов ситуационного управления рассматриваются как ситуационный анализ и ситуационное моделирование, опирающиеся на технологии семантического моделирования - онтологического, когнитивного, событийного и вероятностного (на основе Байесовских сетей доверия), так и визуальная аналитика (3D-геовизуализация).

1.4. Семантическое моделирование. Это одно из активно развиваемых в настоящее время направление искусственного интеллекта [20], в котором до последнего времени ведущим направлением было онтологическое моделирование. Коллективом, представляемым авторами, было обосновано и принято научным сообществом, что к семантическому моделированию относятся также когнитивное, событийное и вероятностное моделирование [9].

Под *когнитивным моделированием* понимается построение когнитивных моделей, или, иначе, когнитивных карт (ориентированных графов), в которых вершины соответствуют факторам (концептам), а дуги – связям между факторами (положительным или отрицательным), в зависимости от характера причинно-следственного отношения [17].

Под *событийным моделированием* понимается построение поведенческих моделей, причем в качестве объектов моделирования могут рассматриваться как люди, так и технические объекты. Сущность событийного метода моделирования заключается в отслеживании на модели последовательности событий в том же порядке, в каком они происходили бы в реальной системе. Одним из инструментов событийного моделирования может быть использован аппарат Joiner-сетей (JN) – одна из разновидностей алгебраических сетей, предложенной Л.Н. Столяровым [16]. Особенностью JN является то, что они предусматривают как графическое представление, так и описание в виде логических формул, обработку которых можно автоматизировать

Вероятностные модели на основе Байесовских сетей доверия – это графические модели вероятностных и причинно-следственных отношений в наборе переменных, которые описываются направленным ациклическим графом, вершинами которого являются переменные, а ребра показывают условные зависимости между ними. В основе этого инструмента лежит теорема Байеса. Основы инструмента графических вероятностных моделей (в частности, байесовских сетей) разрабатывались Дж. Перлом, Р.Дж. Кауэллом и др. [25].

1.5. Агентные вычисления. Агентные (многоагентные) вычисления (Agent-based computing) - вычисления с использованием агентов. В настоящее время это одно из самых развивающихся направлений, применяемых, в частности, при реализации распределённых систем искусственного интеллекта, систем сетевого управления и др. [3].

«Агент» - это метафора, используемая в агентно-ориентированных системах, являющихся результатом синтеза технологий объектно-ориентированного программирования и искусственного интеллекта. В основе концепции построения мультиагентных систем лежит понятие агента, которого можно рассматривать как некий автономно функционирующий и обладающий целенаправленным поведением программный компонент. При разработке интеллектуальных энергетических систем (ИЭС) предполагается использовать многоагентный подход как один из основных, в частности, предложено использование интеллектуальных агентов в качестве интеллектуальных компонентов ИЭС [7].

1.6. Кибербезопасность энергетических объектов и систем. Вопрос кибербезопасности критически важных энергетических систем и систем электроэнергетики, в частности, с каждым годом становится все актуальнее. Вследствие процесса «цифровизации» энергетических систем [5, 19], повсеместного использования интеллектуальных технологий, датчиков, сенсоров и Интернета в работе объектов энергетики, повысились и риски в области кибербезопасности энергетических предприятий. В работах [28, 29] выполнен анализ киберугроз и состояния в области кибербезопасности в энергетике (до 2015 г.).

Информационно-коммуникационная подсистема ЭЭС с каждым годом становится сопоставимой по сложности и уязвимости с технологической подсистемой. Несмотря на то, что «цифровизации» ЭЭС имеет очевидные преимущества, в то же время это приводит к повышенной уязвимости ЭЭС в целом и отдельных ее инфраструктур к различным видам несанкционированного злонамеренного доступа, в частности, кибератакам.

Несмотря на широкий спектр технических и организационных мер, применяемых для защиты объектов электроэнергетики от кибератак, полностью предотвратить их возникновение невозможно. Поэтому важным и необходимым свойством современной ЭЭС является ее способность противостоять кибератакам. В Совете РФ в 2013 г. состоялись парламентские слушания, посвященные проекту Концепции стратегии кибербезопасности Российской Федерации, но стратегия до сих пор не утверждена.

Системы SCADA и СМПП являются наиболее уязвимыми к кибератакам компонентами информационно-коммуникационной подсистемы, вместе с тем, от качества измерений, поступающих от этих систем, зависит качество управления физической подсистемой ИЭС. Для разработки мер по обеспечению кибербезопасности ЭЭС необходимо определить киберуязвимости рассмотренных инфраструктур с учетом их взаимозависимости, провести анализ воздействий и возможных последствий кибератак.

2. Постановка проблемы. Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что на данном этапе остро стоит проблема научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики в России. Необходима разработка методов и программных средств соответствующих мировому уровню разработок, ведущихся в этой области.

С целью повышения эффективности принимаемых решений по цифровой трансформации энергетики необходима разработка комплексной методологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики, на основе адаптации и интеграции:

- концепции ситуационного управления и интеллектуальных технологий семантического моделирования (онтологического, когнитивного, событийного и вероятностного) и визуальной аналитики;
- существующих на данный момент исследований направлений развития энергетических систем и топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в целом (математические методы, модели и программные комплексы).

В то же время, необходима разработка методов построения интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) как многоагентной интеллектуальной среды (МАИС) на основе агентных и облачных вычислений, реализация и интеграция научных прототипов основных компонентов МАИС в виде агентов-сервисов [10]. В дальнейшем необходима апробация и разработка методологии многоагентной интеллектуальной среды ее поддержки на примере конкретных энергетических задач.

Все вышесказанное определяет задачу, для решения, которой необходима разработка совокупности методов:

- развития и применения, совместно с семантическими моделями, искусственных нейронных сетей (ИНС) и генетических алгоритмов (ГА) для определения управляющих воздействий при реализации концепции ситуационного управления;
- построения интеллектуальных инструментальных средств мониторинга кибербезопасности объектов цифровой энергетики;
- интеграции информационных, математических и семантических моделей, нейронных сетей и генетических алгоритмов в рамках интеллектуальной СППР (многоагентной интеллектуальной среды);
- разработки, развития и/или адаптации интеллектуальных средств семантического моделирования, средств визуальной аналитики, средств управления знаниями и программных комплексов, реализующих математические модели, как компонентов интеллектуальной СППР;
- интеграции интеллектуальных средств и программных комплексов для обоснования стратегических решений по развитию цифровой энергетики в рамках интеллектуальной СППР (многоагентной интеллектуальной среды).

В связи с вышеизложенным можно определить основное направление решения проблемы научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики путем развития методического подхода к построению многоагентных систем в энергетике и его применения при разработке архитектуры интеллектуальной СППР (многоагентной интеллектуальной среды МАИС) для научного обоснования стратегических решений по развитию цифровой энергетики, интегрирующей информационные, математические и семантические модели, нейронные сети и генетические алгоритмы; реализацию компонентов ИСППР как агентов-сервисов в соответствии с предложенной архитектурой; апробацию предложенной методологии и научного прототипа многоагентной интеллектуальной среды МАИС на конкретных примерах обоснования и поддержки принятия стратегических решений по цифровой трансформации энергетики.

3. Предлагаемые подходы и методы. Решение поставленной задачи основывается на применении методов системного и ситуационного анализа, методических основ построения информационных технологий в исследованиях энергетики, методов поддержки

принятия решений, методов инженерии знаний, методов машинного обучения (ИНС и ГА), методов объектного подхода (анализ, проектирование, программирование), методов системного и прикладного программирования, методов проектирования баз данных, информационных систем и экспертных систем, а также методов семантического моделирования и ситуационного анализа и моделирования. При решении поставленной задачи предлагается использовать предложенные Д.А. Поспеловым и его учениками подходы к ситуационному управлению и построению семиотических систем, которые были развиты в работах коллектива, представляемого авторами, в частности, выполнены развитие идеи ситуационного управления применительно к стратегическому управлению в энергетике отображение идей Д.А. Поспелова на современные информационные технологии, в первую очередь, технологии семантического моделирования, для построения интеллектуальных СППР семиотического типа.

Предлагается использовать результаты исследований сотрудников лаборатории информационных технологий в энергетике ИСЭМ СО РАН для решения поставленной задачи, в частности, фрактальный подход к структурированию знаний (Л.В. Массель) [8], к построению онтологического пространства знаний в энергетике, (Ворожцова) [30]. к разработке языка ситуационного управления с использованием исчисления ситуаций (Л.В. Массель, В.Р. Кузьмин) [11].

Кроме того, будет использован методический подход к построению многоагентных систем в энергетике (Л.В. Массель, В.И. Гальперов) [7]. При реализации методов машинного обучения (ИНС и ГА) в ситуационном управлении будут применены авторские методы и бионическая модель выбора управляющих воздействий (Гергет О.М.) [23]. Будут использованы подходы, методы и математические модели, применяемые для исследований направления развития ТЭК (Пяткова Н.И.) [14]. Кроме того, при реализации проекта будут применены методы построения интеллектуальных систем поддержки коллективной экспертной деятельности, методы построения интеллектуальных СППР семиотического типа, методы построения интеллектуальной системы анализа угроз и оценки рисков нарушения информационно-технологической безопасности энергетических объектов (Массель А.Г., Гаськова Д.А.) [22]. Предлагаемые методы и подходы будут усовершенствованы и адаптированы для решения поставленной задачи, так же, как и научные прототипы инструментальных средств семантического моделирования, базовые компоненты построения многоагентных систем и базовые компоненты разработанных в ИСЭМ СО РАН интеллектуальных систем.

4. Ожидаемые результаты реализации проекта и их научная и прикладная значимость.

- Методология научного обоснования стратегических решений на основе концепции ситуационного управления, с применением технологий семантического и математического моделирования, методов машинного обучения, интегрирующих ИНС и ГА, и визуальной аналитики.
- Методы разработки и применения, совместно с семантическими моделями, бионической модели (на основе интеграции ИНС и ГА) для реализации концепции ситуационного управления.
- Классификация киберуязвимостей энергетических объектов и систем, принципы учета требований кибербезопасности и методы построения интеллектуальных

инструментальных средств мониторинга кибербезопасности объектов цифровой энергетики

- Проектирование архитектуры интеллектуальной СППР (многоагентной интеллектуальной среды МАИС) для научного обоснования стратегических решений по развитию цифровой энергетики, интегрирующей информационные, математические и семантические модели, нейронные сети и генетические алгоритмы.
- Методы интеграции информационных, математических и семантических моделей, нейронных сетей и генетических алгоритмов в рамках интеллектуальной СППР (многоагентной интеллектуальной среды МАИС).
- Методы разработки и/или адаптации интеллектуальных средств семантического моделирования, средств визуальной аналитики, средств управления знаниями и программных комплексов, реализующих математические модели, как компонентов интеллектуальной СППР (МАИС).
- Технология и методы интеграции интеллектуальных средств для обоснования стратегических решений по развитию цифровой энергетики с использованием многоагентной интеллектуальной среды (МАИС)
- Разработка (адаптация) инструментальных средств интеграции информационных, математических и семантических моделей, нейронных сетей и генетических алгоритмов, в рамках многоагентной интеллектуальной среды (МАИС); адаптация и реализация основных компонентов МАИС как агентов-сервисов.
- Апробация предложенной методологии и научного прототипа многоагентной интеллектуальной среды МАИС на конкретных примерах обоснования и поддержки принятия стратегических решений по цифровой трансформации энергетики

Заключение. В статье рассмотрена постановка задачи, предлагаемые методы и подходы для решения задачи научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики. Научная значимость решения проблемы научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики заключается в разработке новых методов и подходов к построению интеллектуальных средств обоснования и поддержки принятия стратегических решений. Прикладная значимость заключается в разработке научного прототипа интеллектуальной СППР (многоагентной интеллектуальной среды) и возможности ее применения для обоснования и поддержки принятия стратегических решений по цифровой трансформации энергетики.

Работа выполняется при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-07-00351. Предполагается, что полученные результаты будут применены, в том числе, при выполнении проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН № АААА-А17-117030310444-2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев В.В. Основные положения стратегического направления развития электросетевого комплекса России // Энергетик. 2018. № 6. С. 12–14.
2. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Изв. РАН. Энергетика. 2014. №1. С. 64–78.

3. Городецкий В.И., Скобелев П.О., Бухвалов О.Л. Промышленные применения многоагентных систем: прогнозы и реалии // Труды XVIII Международной конференции. Самара: ООО «Офорт». 2016. С. 137–162.
4. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ Энергия. 2010. 208 с.
5. Материалы 2-й отраслевой конференции «Цифровая трансформация электроэнергетики России», Москва, октябрь 2017. Режим доступа: <http://digitenergy.ru/> (дата доступа 13.11.2017)
6. Массель Л.В., Аршинский В.Л., Массель А.Г. Интеллектуальные информационные технологии поддержки принятия решений в исследованиях и обеспечении энергетической безопасности // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного эксперимента: Труды Международной конференции. Евпатория. 2010. С. 192–196.
7. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентных систем распределенного решения энергетических задач с использованием агентных сценариев // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. №5. С. 45–53. Режим доступа: <http://izvestiya.tpu.ru/ru/archive/new/article.html?id=319463&journalId> (дата доступа 13.11.2017) (Scopus, ВАК)
8. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // Онтология проектирования. 2016. Т. 6. №2 (20). С. 149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161 (ВАК)
9. Массель Л.В., Массель А.Г. Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования // Материалы III международной научно-технической конференции «OSTIS-2013». Беларусь, Минск: БГУИР. 2013. С. 247–250.
10. Массель Л.В. Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 30–42.
11. Массель Л.В., Кузьмин В. Р. Ситуационное исчисление как развитие семиотического подхода к построению интеллектуальной системы поддержки принятия решений // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2017. Т. 15. № 4. С. 43–52. DOI 10.25205/1818-7900-2017-15-4-43-52 (ВАК)
12. Поспелов Д.А. Принципы ситуационного управления // Известия РАН СССР. Техническая кибернетика. 1971. №2 . С. 10–17.
13. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. - М.: Энергия, 1981. – 231 с.
14. Пяткова Н.И., Массель Л.В., Массель А.Г. Методы ситуационного управления в исследованиях проблем энергетической безопасности // Известия Академии наук. Энергетика. №4. 2016. С. 156–163.
15. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2010. 686 с.
16. Столяров Л.Н. Философия событийного моделирования на примере сценария энергетической катастрофы // Труды Международной конференции «Информационные

- технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе». Украина, Гурзуф. 2010. С. 197–200.
17. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М.: СИНТЕГ. 1998. 376 с.
 18. Федеральный проект «Цифровая энергетика». Режим доступа: <http://minsvyaz.ru/uploaded/files/programma.pdf> (дата доступа 22.04.2019). С. 65–66.
 19. Филимонов А.Г. и др. Внедрение элементов цифровой экономики в электроэнергетике // Журнал «Надежность и безопасность энергетики». 2018. Т.11. №2. С. 94–102 (изд. ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»)
 20. Хорошевский В.Ф. Семантические технологии: ожидания и тренды // Труды II Международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем». Беларусь, Минск: БГУИР. 2012. С. 143–158.
 21. Экспертно-аналитический доклад «Цифровой переход в электроэнергетике России». Режим доступа: <https://www.csr.ru/issledovaniya/tsifrovoj-perehod-v-elektroenergetike-rossii/> (дата доступа 10.08.2018).
 22. Gaskova D.A., Massel A.G. Methods to analyze critical facilities in energy with regard to cyber threats // Proceedings of the Vth International workshop "Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security" (IWCI 2018). 2018. Pp. 129–135. Available at: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/iwci-18/> (accessed 10.08.2018) doi:10.2991/iwci-18.2018.11
 23. Gerget O.M. Bionic models for identification of biological systems // Journal of Physics // Conference Series. 2017. Vol. 803. Pp. 1–6. Available at: <https://istina.msu.ru/journals/75027/> (accessed 10.08.2018) (Scopus)
 24. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Book in preparation for MIT Press.
 25. Heckerman D. A Tutorial on Learning with Bayesian Networks // Technical Report MSR-TR-95-06, Microsoft Research. 1995. March. 57p
 26. Hochreiter S., Y. Bengio, P. Frasconi, and J. Schmidhuber. Gradient flow in recurrent nets: the difficulty of learning long-term dependencies. 2001.
 27. Malada H.R., Ivakhnenko A.G. Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling. CRC Press. 1994.
 28. Massel L., Massel A. Cyber security of Russia's energy infrastructure as a component of national security // Proceeding of the International Conference on Problems of Critical Infrastructures (Saint Petersburg, 25-27 June 2015). Edited by Z.A. Styczynski and N.I. Voropai. Irkutsk. Energy Systems Institute. 2015. Pp. 66–72.
 29. Massel A., Massel L. The current state of cyber security in Russia's energy systems and the proposed activities for situation improving // Proceeding of the International Conference on Problems of Critical Infrastructures (Saint Petersburg, 25-27 June 2015). Edited by Z.A. Styczynski and N.I. Voropai. Irkutsk. Energy Systems Institute. 2015. Pp. 183–189.
 30. Massel L.V., Vorozhtsova T.N. Ontological Engineering of Knowledge Space for Situational Management in Russian Energy Sector // Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC) (Vladivostok, Russia 18-25 August, 2018).

IEEE. 2018. Pp. 1–5. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=8469127> (accessed 10.08.2018)

31. Tsoy Y.R., Spitsyn V.G. Using genetic algorithm with adaptive mutation mechanism for neural networks design and training // Optical memory and neural networks. 2004. vol. 13. no. 4. Pp. 225–232.

UDK 004:620.9

**APPLICATION OF INTELLECTUAL TECHNOLOGIES TO SOLVE THE PROBLEM OF
SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF STRATEGIC DECISIONS ON THE DIGITAL
TRANSFORMATION OF ENERGETICS**

Alexey G. Massel

PhD., Senior Resercher, Laboratory "Information Technology in Energetic"

Melentiev Energy Systems Institute

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: massel@isem.irk.ru

Kirill S. Bakhvalov

Graduate student, Laboratory "Information Technology in Energetic"

Melentiev Energy Systems Institute

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: kbakhvalov@yandex.ru

Abstract. The article describes the solution of the fundamental scientific problem, which consists in the development of methods and intelligent technologies for the scientific substantiation of strategic decisions on the digital transformation of energy, taking into account the requirements of cybersecurity, based on the concept of situational management, using methods of machine learning, evolutionary computing, mathematical and semantic modeling.

Keywords: intellectual technologies, digital transformation of energy, cybersecurity, situational management, semantic modeling.

References

1. Bushuev V.V. Osnovnye polozheniya strategicheskogo napravleniya razvitiya elektrosetevogo kompleksa Rossii [The main provisions of the strategic direction of development of the electric grid complex of Russia] // Energetik. 2018. vol. 6. Pp. 12–14. (in Russian)
2. Voropaj N.I., Stennikov V.A., Integrirovannye intellektual'nye energeticheskie sistemy [Integrated Intelligent Energy Systems] // Izv. RAN. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering Journal. 2014. Vol. 2. Pp. 64–78. (in Russian)
3. Gorodetsky V.I., Skobelev P.O., Bukhvalov O.L. Promyshlennye primeneniya mnogoagentnyh sistem: prognozy i realii [Industrial applications of multi-agent systems: forecasts and realities]. Trudy XVIII Mezhdunarodnoj konferencii. Samara: OOO «Ofort» =

- Proceedings of the XVIII International Conference. Samara: LLC. 2016. Pp. 137–162. (in Russian)
4. Kobec B.B., Volkova I.O., Innovacionnoe razvitie elektroenergetiki na baze koncepcii Smart Grid [Innovative development of electric power industry based on the concept of Smart Grid]. Izdatel'sko-analiticheskiy tsentr "Energiya" = Publishing and Analytical Center "Energy". 2010. 208 p. (in Russian)
 5. Materialy 2-j otraslevoj konferencii «Cifrovaya transformaciya elektroenergetiki Rossii» (Moskva, oktyabr' 2017) [Proceedings of the 2nd sectoral conference "Digital transformation of the electric power industry in Russia" (Moscow, October 2017)]. Available at: <http://digitenergy.ru/> (accessed 13.11.2017) (in Russian)
 6. Massel L.V., Arshinskiy V.L., Massel A.G., Intellektual'nye informacionnye tekhnologii podderzhki prinyatiya reshenij v issledovaniyah i obespechenii energeticheskoy bezopasnosti [Intelligent information technology decision support in research and energy security] // Intellektual'nye sistemy prinyatiya reshenij i problemy vychislitel'nogo eksperimenta: Trudy Mezhdunarodnoj konferencii = Intellectual decision-making systems and problems of computational experiment: Proceedings of the International Conference. Evpatoria. 2010. Pp. 192–196. (in Russian)
 7. Massel L.V., Galperov V.I. Razrabotka mnogoagentnyh sistem raspredelenного resheniya energeticheskikh zadach s ispol'zovaniem agentnyh scenarijev [Development of multi-agent systems of distributed solution of energy problems using agent scenarios] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = News of Tomsk Polytechnic University. 2015. vol. 5. Pp. 45–53. (in Russian)
 8. Massel L.V. Fraktal'nyj podhod k strukturirovaniyu znanij i primery ego primeneniya [Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application] // Ontologiya proektirovaniya = Ontology of designing. 2016. vol. 6. no. 2 (20). Pp. 149–161. DOI: 10.18287 / 2223-9537-2016-6-2-149-161. (in Russian)
 9. Massel L.V., Massel A.G. Semanticheskie tekhnologii na osnove integracii ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytijnogo modelirovaniya [Semantic technologies based on the integration of ontological, cognitive and event modeling] // Materialy III mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «OSTIS-2013» = Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference "OSTIS-2013". Belarus, Minsk: BSUIR. 2013. Pp. 247–250. (in Russian)
 10. Massel L.V. Metody i intellektual'nye tekhnologii nauchnogo obosnovaniya strategicheskikh reshenij po cifrovoj transformacii energetiki [Methods and intellectual technologies of scientific substantiation of strategic decisions on the digital transformation of energy] // Energeticheskaya politika = Energy Policy. 2018. no 5. (in Russian)
 11. Massel L.V., Kuzmin V. R. Situacionnoe ischislenie kak razvitie semioticheskogo podhoda k postroeniyu intellektual'noj sistemy podderzhki prinyatiya reshenij [Situational calculus as the development of a semiotic approach to building an intelligent decision support system] // Vestnik NGU. Seriya: Informacionnye tekhnologii = Vestnik NSU. Series: Information Technologies. 2017. vol. 15. no 4. Pp. 43–52. DOI 10.25205 / 1818-7900-2017-15-4-43-52. (in Russian)

12. Pospelov D.A. Principy situacionnogo upravleniya [Principles of Situational Management] // Izvestiya RAN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika = News of the RAS of the USSR. Technical cybernetics. 1971. vol. 2. Pp. 10–17(in Russian)
13. Pospelov D.A. Logiko-lingvisticheskie modeli v sistemah upravleniya [Logical linguistic models in control systems]. Moscow. Energiya = Energy. 1981. 231 p. (in Russian)
14. Pyatkova N.I., Massel L.V., Massel A.G. Metody situacionnogo upravleniya v issledovaniyah problem energeticheskoy bezopasnosti [Methods of situational management in the study of problems of energy security] // Izvestiya Akademii nauk. Energetika. = Proceedings of the Academy of Sciences. Energy. 2016. no.4. Pp. 156–163. (in Russian)
15. Sistemnye issledovaniya v energetike: Retrospektiva nauchnyh napravlenij SEI–ISEM [Systems Research in the Energy Sector: Retrospective of the scientific directions of the SEI – ESI Modernization of Power Systems. Edited by Z.A. Styczynski and N.I. Voropai] Novosibirsk: Nauka = Novosibirsk: Science. 2015. 686 p. (in Russian)
16. Stolyarov L.N. Filosofiya sobytijnogo modelirovaniya na primere scenariya energeticheskoy katastrofy [Philosophy of event modeling on the example of the energy disaster scenario] // Trudy Mezhdunarodnoj konferencii «Informacionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii, telekommunikacii i biznese = Proceedings of the International Conference "Information technology in science, education, telecommunications and business". Ukraine, Gurzuf. 2010. Pp. 197–200. (in Russian)
17. Trahtengerc E.A. Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya reshenij [Computer decision support]. Moscow. SINTEG. 1998. 376 p. (in Russian)
18. Federal'nyj proekt «Cifrovaya energetika» [The federal project "Digital Energy"]. Available at: <http://minsvyaz.ru/uploaded/files/programma.pdf> (accessed 08.07.2018) (in Russian)
19. Filimonov A.G. Vnedrenie elementov cifrovoj ekonomiki v elektroenergetike [Introduction of elements of the digital economy in the electric power industry] // Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety & Reliability of Power Industry. 2018. vol. 11. no. 2. Pp. 94–102. (in Russian)
20. Horoshevskiy V.F. Semanticheskie tekhnologii: ozhidaniya i trendy [Semantic technologies: expectations and trends] // Trudy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem» = Proceedings of the second international scientific and technical conference "Open semantic technologies for designing intelligent systems." Belarus, Minsk: BSUIR. 2012. Pp. 143–158. (in Russian)
21. Ekspertno-analiticheskij doklad «Cifrovoj perekhod v elektroenergetike Rossii» [Expert-analytical report "Digital transition in the power industry of Russia"]. Available at: <https://www.csr.ru/issledovaniya/tsifrovoj-perekhod-v-elektroenergetike-rossii/> (accessed 10.08.2018). (in Russian)
22. Gaskova D.A., Massel A.G. Methods to analyze critical facilities in energy with regard to cyber threats // Proceedings of the Vth International workshop "Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security" (IWCI 2018). 2018. Pp. 129–135. Available at: <https://www.atlantispress.com/proceedings/iwci-18/> (accessed 10.08.2018) doi:10.2991/iwci-18.2018.11

23. Gerget O.M. Bionic models for identification of biological systems // *Journal of Physics // Conference Series*. 2017. Vol. 803. Pp. 1–6. Available at: <https://istina.msu.ru/journals/75027/> (accessed 10.08.2018) (Scopus)
24. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Book in preparation for MIT Press.
25. Heckerman D. *A Tutorial on Learning with Bayesian Networks* // Technical Report MSR-TR-95-06, Microsoft Research. 1995. March. 57p
26. Hochreiter S., Y. Bengio, P. Frasconi, and J. Schmidhuber. Gradient flow in recurrent nets: the difficulty of learning long-term dependencies. 2001.
27. Malada H.R., Ivakhnenko A.G. *Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling*. CRC Press. 1994.
28. Massel L., Massel A. Cyber security of Russia's energy infrastructure as a component of national security // *Proceeding of the International Conference on Problems of Critical Infrastructures (Saint Petersburg, 25-27 June 2015)*. Edited by Z.A. Styczynski and N.I. Voropai. Irkutsk. Energy Systems Institute. 2015. Pp. 66–72.
29. Massel A., Massel L. The current state of cyber security in Russia's energy systems and the proposed activities for situation improving // *Proceeding of the International Conference on Problems of Critical Infrastructures (Saint Petersburg, 25-27 June 2015)*. Edited by Z.A. Styczynski and N.I. Voropai. Irkutsk. Energy Systems Institute. 2015. Pp. 183–189.
30. Massel L.V., Vorozhtsova T.N. Ontological Engineering of Knowledge Space for Situational Management in Russian Energy Sector // *Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC) (Vladivostok, Russia 18-25 August, 2018)*. IEEE. 2018. Pp. 1–5. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=8469127> (accessed 10.08.2018)
31. Tsoy Y.R., Spitsyn V.G. Using genetic algorithm with adaptive mutation mechanism for neural networks design and training // *Optical memory and neural networks*. 2004. vol. 13. no. 4. Pp. 225–232.

УДК:51.7:514.762:911.7

**МЕТАТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРИРОДНЫХ И СОЦИАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ
В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ**

Черкашин Александр Константинович

Д.г.н., профессор, главный научный сотрудник,
зав. лабораторией теоретической географии,
Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1, e-mail: akcherk@irnok.net

Аннотация. Обсуждаются метатеоретические (МТ) основы интертеоретического математического моделирования природных и социально-экономических систем разного рода при реализации математических и информационных технологий. Основные МТ-положения формулируются в терминах дифференциальной геометрии касательного расслоения и слоения на многообразиях с учетом опыта построения полисистемных моделей географической науки. Многообразие трактуется как географическая среда формирования явлений и процессов. Уравнения для их моделирования появляются соответственно в результате послыйного отображения оценочных функций в векторные поля состояний и скоростей расслоенного пространства. Точка касания слоя интерпретируется как тип среды реализации моделируемых закономерностей, а ее глобальные координаты как условия средового смещения параметров системы. С учетом этих смещений формируется локальная система координат. Получившиеся МТ-уравнения связи и изменений относительных параметров не зависят от выбора глобальных (внешних) и локальных (внутренних) систем координат. Слоение многообразия среды определяет топологическую и типологическую структуры пространства исследования как геоинформационного источника знаний о неоднородности местных условий. МТ-моделирование выделяет универсальные уравнения и позволяет учесть в расчетах своеобразие систем и их среду через содержательную интерпретацию абстрактных понятий и средовое смещение показателей. Особое значение для МТ-моделирования имеют структуры и функции, связанные со слоями, в частности, подвижные трехгранники и тетраэдры линий и поверхностей. Их аналогами являются формальные категории – коммутативные диаграммы связи понятий, генерирующие законы создания системных моделей разного рода.

Ключевые слова: метатеоретическое знание, интертеоретическое моделирование, полисистемные модели, многообразие среды, средовая относительность, векторные поля и функционалы, уравнения процессов и явлений

Цитирование: Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и социальных процессов и явлений в неоднородной среде // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 61–84. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-06

Введение. Главным среди множества вопросов математического моделирования (ММ) [11, 13, 19, 40] становится вопрос выбора адекватных средств и методов построения моделей, т.е. превращения поставленной практикой содержательной проблемы в математическую задачу и решение ее аналитическими и вычислительными средствами. Особенно это

актуально в тех областях исследований природных и общественных процессов и явлений, где формализованные подходы еще не получили необходимого развития. Это связывается со своеобразным «искусством» моделирования [13], предполагающим хорошее представление об объекте и предмете изучения, владение математическими знаниями и в целом с наличием достаточных оснований для построения моделей. Опыт работы в данной области убедительно показывает, что ни одна проблема не решается тем же способом, что используется при обсуждении других проблем: всякий раз приходится искать оригинальные решения, что говорит о многообразии форм и методов ММ.

Распространенный подход к ММ – имитационный, выраженный в прямом использовании статистических данных и математических формул, когда нет иных аналитических оснований для построения моделей. Этот подход, прежде всего, свойственен исследователям, недостаточно понимающим суть проблемы, что обычно встречается в первых постановочных публикациях по теме, но чаще применяется в случае исходной сложности изучаемой системы, что требует проведения многовариантного вычислительного эксперимента [18]. Глубокие исследования и моделирование основываются на теоретических построениях и серьезной математике, как это постоянно происходит, например, в физике [20]. Желание разобраться в основаниях изучаемых связей по существу представляет ядро не только ММ, но и всей науки, поскольку требует выявления и объяснения, скрытых в информационных потоках закономерностей. Модели возникают как результат эмпирических обобщений (индуктивно), как следствие теоретических выводов (дедуктивно) и «третьим методом» познания - по аналогии с эмпирическими фактами и теоретическими построениями, что придает методам ММ универсальность. В связи с этим возникает задача информационного поиска, основываясь на опыте моделирования, общих оснований формирования теорий и моделей для решения задач ММ систем различного рода, т.е. определения метатеоретических принципов системного ММ для реализации алгоритмов математической технологии генерации новых научных знаний.

Для решения поставленной проблемы последовательно рассмотрим ряд общих и частных задач моделирования географических процессов и явлений, решение которых основано на применении результатов касательного расслоения на многообразиях, уделяя особо внимание учету особенностей географической среды в расчетах состояния и изменения природных и социальных систем.

1. Основные понятия и модели.

1.1. Метатеоретическое знание. В информационной технологии системное моделирование подразумевает создание систем моделирования для предметных областей исследования [17] в виде системы моделей объектов, рассматриваемых в качестве систем разного рода. Система трактуется традиционно как упорядоченное множество (структуры) элементов и связей между ними и с окружающей средой. В зависимости от того, как конкретно понимаются элементы и связи, формируются системы разного рода, для которых разрабатываются специальные теории со своим набором базовых понятий, аксиом и фундаментальных законов. Опыт ММ показывает, что даже в простейших случаях для моделирования одного объекта требуется использовать нескольких законов, и одними и теми же моделями могут описываться разные объекты, подчиняющиеся различным законам [19]. В итоге один и тот же объект представляется как множество (полисистема) моделей систем разных теорий, а каждая специальная теория описывает любые объекты, т.е. является

предметной интертеорией, сквозным образом объединяющей специальные знания о природных и общественных процессах и явлениях.

Метатеоретический (МТ) уровень познания обычно связывается с философскими, методологическими и общенаучными основаниями теорий [12]. МТ-уровень научной информации – это метатеория всех теорий, возможная регулятивная основа, определяющая правила создания каждой системной теории, своеобразная системология – наука о системах разного рода. В разрабатываемой полисистемной концепции ММ [27, 28, 32, 35], МТ-уровень научной информации находится на границе абстрактной математики и содержательных теорий, отражающих с разных сторон системные свойства реальных объектов [30]. Математическая технология обеспечивает дедуктивный переход от математических форм к МТ-представлению знаний, специальным теориям и формирующимся в рамках каждой теории моделям. В итоге в терминах каждой системной теории создается соответствующая математическая модель объекта, в силу чего возможно множество системных моделей одного и того же объекта – полисистема теоретических знаний и полисистема моделей (полимодель) объекта [27, 28, 32, 35]. Из них выбирается та модель, что наилучшим образом решает поставленную проблему в технологической последовательности процедур системного анализа на основе имеющихся данных и знаний об объекте.

В этом направлении особо актуальны исследования, связанные с разработкой интертеорий и полимоделей сложных географических систем на МТ-основе полисистемного расслоения и моделирования многообразия географической среды, чтобы приблизить географию к уровню математического решения задач в передовых областях науки, дать математическое обоснование ее известных моделей и методов, вывести новые знания. Для этого через полисистему теорий происходит предметное расслоение данных и знаний результатов физико- и экономико-географических исследований территориальной организации [31] на основе идей дифференциальной геометрии, соответствующих уровню МТ-анализа [32]. Такой подход широко используется в современной физической науке [20, 15]. В его основе лежат представления о расслоении множеств и пространств на различных базах, в частности, на гладких многообразиях. Касательное расслоение на многообразиях трудно представить наглядно, поэтому всякие иллюстрации и чертежи полезны для понимания сущности формальных связей и преобразований [15]. Поиск аналогий между понятиями дифференциальной геометрии и реальными процессами, и явлениями затруднен в силу существующего абстрактного изложения математического материала, в связи с чем любые примеры и содержательные интерпретации важны для понимания возможностей использования теории расслоения для МТ-анализа. Наглядное сходство прослеживается в научных процедурах типизации и картографирования, в пространственных и сетевых моделях типа «центр-периферия» и др. [23, 36].

1.2. Расслоенные пространства. И.Л. Герловин [6] дал своеобразную трактовку расслоения в терминах геометрии континуально-дискретных пространств - математической конструкции, в которой рассматривается объемлющее пространство $P=M \times N \subset X$, охватывающее все его элементы и вложенные в него множества подпространств слоев $Y_i \subset Y$, базы расслоения M с элементами $i \in M$ и слоев $Z_j \subset Z$ базы расслоения N с элементами $j \in N$. Эти формы представления информации иллюстрируем линейно-сетчатой структурой на рис. 1.

Слои Y_i соответствуют вертикальным, слои Z_j – горизонтальным линиям. Среди них выбираются типичные слои расслоения T_Y, T_Z , с которыми сравниваются $Y_i \leftrightarrow T_Y$ все остальные. Постулируется существование типичного объекта-эталона (универсума) и типичной системной теории (общей теории систем). Пространство X называется объемлющим пространством реальности, пространством (множеством) расслоения, пространства Y и Z – расслоенными пространствами соответственно на базах M и N . Пространство $Q=Y \times Z \subset X$ задает структуру объемлющего пространства X , а $P=M \times N$ – это своеобразный информационный код с элементами (i, j) .

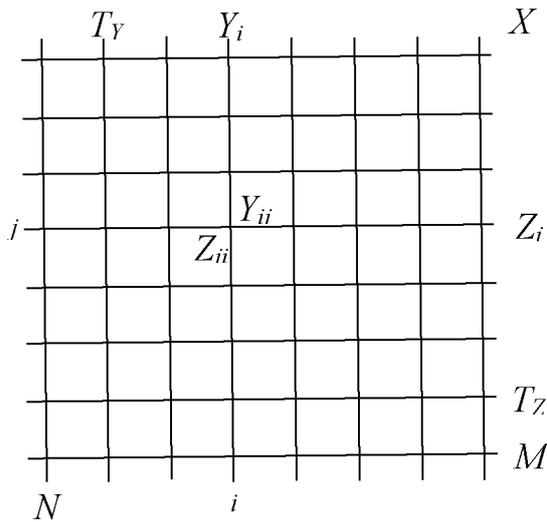


Рис. 1. Линейно-сетчатая структура $M \times N$ расслоения на независимых многообразиях объектов M и предметов N исследования и моделирования (здесь и далее пояснения в тексте).

В общем случае расслоением называется отображение $\pi: X \rightarrow M$, обратное которому $\pi^{-1}: M \rightarrow X$ разбивает непрерывное пространство расслоения X на множество $Y = \{Y_i\}$ непересекающихся дискретных слоев Y_i , соответствующих элементам $i \in M$. В частности, по И.Л. Герловину, наблюдаемое физическое подпространство является базой M объектного расслоения, вне которой находятся подпространства Y_i , где проявляется скрытая структура элементов (объектов) i и осуществляются их скрытые взаимодействия в объемлющем пространстве физической реальности X . Он считает, что разработанный математический аппарат может быть использован не только в физике, но и в других естественных и общественных науках, поэтому в общем случае пространство X является всеобъемлющим. Реальные свойства объектов i формируются по законам расслоенного пространства Y , поэтому невозможно рассчитать значения этих свойств средствами наблюдаемого пространства M . Для полного описания существующего объекта i в Y_i его необходимо представить одновременно в разных слоях $Z_j \in Z$ всеобъемлющего расслоенного пространства $Q = Y \times Z$. Связанное с ним пространство $P = M \times N$ может быть любой размерности, т.е. объединять разные основания расслоений, на пересечении которых кодом (i, j) обозначаются разнообразные познавательные ситуации j с объектами i .

Эти положения иллюстрируют закон системности Ю.А. Урманцева [24], согласно которому все объекты i существуют и выделяются как системы Y_{ij} одного j или разного рода. Любой объект-система Y_i принадлежит хотя бы одной системе объектов Z_j данного рода j . Слой Y_{ij} является пересечением, т.е. элементом декартового произведения $Q = Y \times Z$, объектного Y_i и предметного слоя Z_j (см. рис. 1). Множество $Y_i = \{Y_{ij}\}$ представляет объект как полисистему, а множество $Z_j = \{Z_{ji}\}$ объединяет объекты-системы одного рода j , одной предметной области исследований и моделирования. Множество $Y = \{Y_i\}$ есть множество

объектов, а $Z=\{Z_j\}$ – множество предметов исследования. Пространству Z_j соответствует системная интертеория j -го типа, а системе Y_{ij} – модель объекта i , сформулированная на языке j -й теории. В этом контексте элементы j базы N расслоения реальности X по слоям Z_j отражают специальное понимание объекта как системы особого рода j и связаны с инвариантами и базовыми понятиями j -й интертеории. Системная модель объекта Y_{ij} является проекцией объекта i в теоретический слой Z_j , или j -м срезом объекта в этом слое. В итоге реализуется своеобразная комбинаторика слоев $Y_{ij}=Y_i \times Z_j$ – синтез двух объектных и предметных начал M и N . Отсюда появляется возможность проективного $Y_i \rightarrow Z_j$ и альтернативного $Z_k \leftarrow Y_i \rightarrow Z_j$ моделирования разнокачественных объектов Y_i .

Далее, по И.Л. Герловину [6, с.37], все слои дополнены и рассматриваются относительно друг друга как бы находящиеся в мнимой, другой области пространства X (принцип пространственного полиморфизма). В этом смысле они являются противоположностями, независимыми, не пересекающимися, параллельными или ортогональными друг другу формами, в частности, образуют своеобразное конфигурационное пространство обобщенных координат $Z=\{Z_j\}$ представления объектов $Y=\{Y_i\}$ разными способами $Y_i=\{Y_{ij}\}$. Условием функциональности объектов и их математических моделей в терминах расслоенных пространств является "пространственный метаморфоз", что определяет существование связей различных геометрических форм (систем) Y_{ij} одного и того же объекта Y_i в подпространствах Z_j всего объемлющего пространства реальности X [6]. Все слои одной базы M или N имеют согласованные структуры и функции. Для этого между слоями имеется информационная связь в виде морфизмов-отображений слоя в слой, что является основанием для их сравнения и вывода свойств одного слоя из другого. Системы морфизмов слоев описываются в терминах формальных категорий, где объектом категории является слой, а морфизмы-стрелки соответствуют их связям, удовлетворяющим условию коммутативности. Появляется возможность создавать новые модели и теории по образу и подобию известных моделей и теорий [26–29].

Главным условием функциональной связности объектов Y_i является наличие коммутативных отображений между их системными слоями Y_{ij} [6]. В этом случае объект рассматривается как сложная система – комплекс. Отображения-морфизмы могут быть полными (изоморфизм, подобие), формирующими отношения эквивалентности слоев, и неполными, когда связи слоев реализуются с потерей информации, с ростом энтропии. В последнем случае сложность объекта снижается, его целостность нарушается, существование прекращается. По этой причине в комплексе разные системные модели Y_{ij} эквивалентны, а в не-комплексе каждая из них по-своему описывает только одну сторону процесса или явления, т.е. сложные системы проще в смысле реализации процедур ММ, когда модель одного типа дает полное представление о состоянии и поведении сложной системы в целом.

Изложенная МТ-методология решения задач ММ позволяет получить выводимое знание из определения расслоения пространств разного свойства, т.е. создавать в виде категорий различные формальные онтологии. Для этого необходимо по аналогии со структурами и функциями эталонных образцов T сформировать новые теории и на их основе построить системные модели, в которых своеобразно понимаются элементы и связи. При этом необходимо исходить из абстрактных представлений, и для эффективного

использования математики требуется проследить весь путь от абстрактного к наблюдаемому конкретному знанию.

1.3. Касательные расслоения. Аналитические соотношения ММ получаются при использовании в качестве базы расслоения гладких, необходимое число раз дифференцируемых многообразий – основных объектов дифференциальной геометрии. Такие многообразия M – это хаусдорфовые отделимые пространства со счетной базой, локально похожие на евклидовы линейные пространства R^n размерности n [4]. Многообразия обобщают представления о поверхности [16], что задаются выпуклыми функциями $F=F(x)$ переменных x в координатах $x = \{x_k\}$ ($k=1,2,\dots,n$) n -мерного объемлющего (тотального) пространства X . Поверхность многообразия M , или скалярное поле на X , задаются функциями в неявном виде $G(x)=0$, в явном виде $F=F(x)$ или вектор-функцией $R=R(\mathbf{r})$ радиус-вектора $\mathbf{r}=x(u,v)$, вычерчивающей эту поверхность в соответствии со значениями координат $x_k(u,v)$ в зависимости от изменения параметров (u,v) . Начало вектора находится в начале O заданной системы координат (системы измерения), а конец - в точке (R,x) на поверхности $R=R(\mathbf{r})$ (рис.2). Линии-пути γ_x, η_x на поверхности параметрически описываются вектором $R=R(\mathbf{r})$ в координатах $x(t)$, значение которых зависит от произвольного параметра, например, времени t , или от естественного (натурального) параметра $x(s)$, где s – в некотором смысле расстояние вдоль линии пути от ее начала $s=0$.

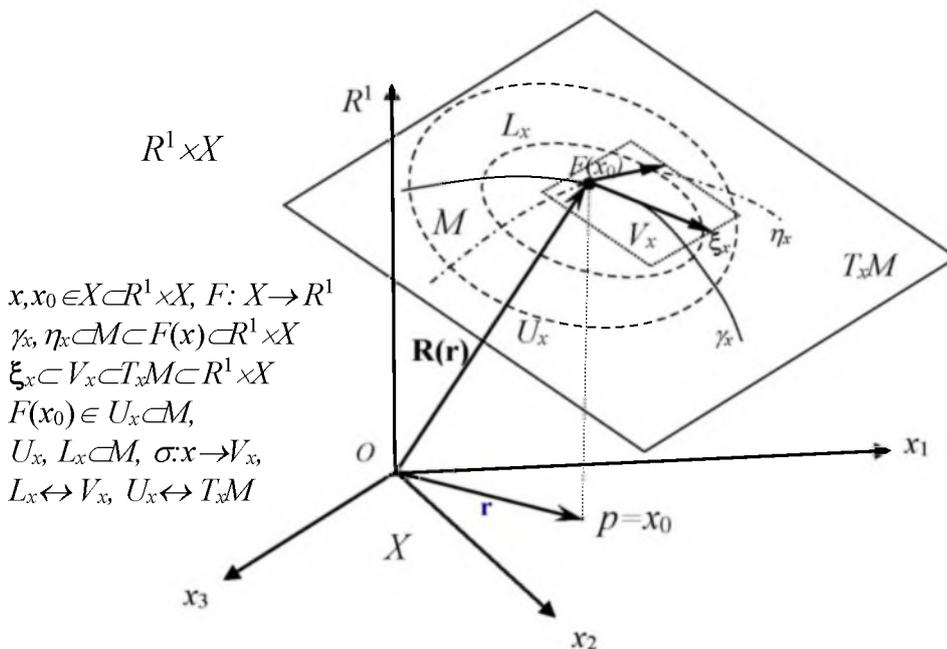


Рис. 2. Схема касательного расслоения на многообразии M с выделением касательного слоя $T_x M$, локального векторного пространства $V_x \subset T_x M$, слоя $L_x \subset M$ и окрестности $U_x \subset M$ точки x_0 .

Например, вектор $R=R(\mathbf{r})$ с началом в центре масс Земли формально описывает форму рельефа $F=F(x)$, где в качестве параметров (u,v) используются сферические географические координаты. Уклон местности определяется вектором градиента - направлением и величиной наибольшего возрастания скалярного поля $F(x)$:

$$V(a) = \nabla F = \text{grad} F = \sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} \mathbf{i}_k, \quad a = \{a_k\}, \quad a_k = \frac{\partial F}{\partial x_k}, \quad \partial_k = \frac{\partial}{\partial x_k} \mathbf{i}_k, \quad (1)$$

где \mathbf{i}_k - элементарные независимые векторы (орты) по каждому координатному направлению x_k , определяющие базис исходного физического векторного пространства; $a = \{a_k\}$ – компоненты двойственного ковекторного пространства, дуального исходному $x = \{x_k\}$. От величины уклона и в целом от градиента различных скалярных полей на планете зависят все

географические процессы, что принимается во внимание при создании климатических, геоморфологических, экономических и социальных потоковых моделей территориальной системы, ее преобразования в неоднородном физическом пространстве. В формуле для $\hat{\partial}_k$ символ \mathbf{i}_k фактически дублирует символ $\frac{\partial}{\partial x_k}$ дифференцирования по направлению. По этой и другим формальным соображениям символ \mathbf{i}_k упускается, и база векторного пространства задается реперами $\hat{\partial}_{pk}$ локальной системы координат (СК) с началом в точке p , что позволяет перейти к более широкой (немеханистической) трактовке многомерного пространства независимых признаков \mathbb{R}^n разнокачественных систем.

С математической точки зрения оказывается неважно, какой конкретный вид имеет функция $F(x)$ для поверхности, особенно в случае ее неявного задания, поэтому в качестве многообразия M обычно рассматривается само пространство $M \subset X = \mathbb{R}^n$. Однако для наглядности считается, что M является, например, двумерной выпуклой поверхностью, описываемой соответствующими функциями $F: X \rightarrow \mathbb{R}^1$ и дополнительной координатой \mathbb{R}^1 многомерного пространства (F, x) , что позволяет получать объясняющие уравнения ММ.

Формально, для каждой точки многообразия $p \in M$ определена окрестность U_p – открытое множество $U_p \subset M$, $p \in U_p$. Топологическим n -мерным многообразием M называется пространство, каждая точка p которого обладает окрестностью U_p , гомеоморфной открытому множеству $D_p \subset \mathbb{R}^n$ (пространству реального существования или научного представления реальности $x \in \mathbb{R}^n$). Картой в наблюдаемом пространстве M называется пара (U_p, φ_p) , где φ_p – гомеоморфизм $\varphi_p: U_p \rightarrow D_p \subset \mathbb{R}^n$. Это позволяет задавать координаты точек $p \in M$ соответствующими глобальными $x_p = \{x_{pk}\}$ и локальными $y_p = \{y_{pk}\}$ координатами множества $D_p \subset \mathbb{R}^n$. Локальные координаты точки y всегда зависят от ее глобальных координат: $y = y(x)$. Совокупность карт (U_p, φ_p) точек $p \in M$ называется n -мерным координатным атласом, если объединение U_p совпадает с M [3]. Так происходит при топографическом картографировании земной поверхности, когда отдельный участок местности $U_p \subset M$ в окрестности пункта $p \in M$ отображается на соответствующую топокарту D_p . Совокупность таких карт составляет атлас карт с координатами, соответствующими географическим координатам участка. Всякое топологическое многообразие M является пространством, обладающим атласом, состоящим из счетного множества карт D_p . Требование делимости предполагает, что у любых двух точек p и q из M всегда есть окрестности, которые не пересекаются, но существуют и перекрывающиеся области этих точек, в которых необходимо согласование локальных координат (J_{pq} – матрица Якоби):

$$y_q = J_{pq} y_p, J_{pq} = \left(\frac{\partial y_{qk}}{\partial y_{pk}} \right). \quad (2)$$

Вариантами множества D_p могут быть разные подпространства пространства $X = \mathbb{R}^n$, например, касательные слои $T_p M \subset X$. Отображение сравнения (2) по сути, переводит, количественно интерпретирует информацию одного слоя в информацию другого, устанавливает эквивалентность карт, в частности, их тождество, когда J_{pq} – единичная матрица.

В общем случае, расслоением называется четверка (X, M, π, T) , где X – пространство расслоения, M – база расслоения с непрерывной, так и дискретной топологией. Проекция

$\pi: X \rightarrow M$ ставит в соответствие каждой точке $p \in M$ слой $T_p M \subset TM$, например, касательную (гипер)плоскость к поверхности M в точке p . Пространство T называется типичным слоем расслоения, образующим расслоенное пространство $TM = M \times T$ как прямое произведение многообразия и типичного слоя, которое с проекцией на первый сомножитель $\pi: M \times T \rightarrow M$ дает тривиальное расслоение с базой M и типичным слоем T . Аналогично проекция $\pi_0: M \times T \rightarrow T$ на второй сомножитель является тривиальным расслоением с базой T и типичным слоем M . Такая ситуация проиллюстрирована на рис. 1 для прямого произведения $X \times Y$, где T соответствует универсальному объекту T_Y или предмету T_Z исследования и моделирования.

Типичный (общий, модельный) слой T расслоения является эталоном моделей в виде структур или функций, послойно заданных на многообразии, которые с изменениями можно индуцировать в других слоях по правилу (2). Это означает, что пространство расслоения TM представляет собой объединение множества непересекающихся слоев $T_p M$, каждый из которых диффеоморфен типичному слою T и отмечен точкой базы p . Кроме того в определении расслоения должно реализоваться условие, чтобы дифференцируемые структуры на многообразиях X , TM , M и T были коммутативно согласованы между собой в целом и по каждой карте [9]. Для касательного расслоения размерности базы и типичного слоя совпадают, поэтому расслоенное пространство $TM = M \times T$ имеет удвоенную размерность по сравнению с многообразием M .

Расслоенное пространство $TM = \{T_p M\}$ пространства расслоения $X = \mathbb{R}^n$ соответствует морфизму $\pi^{-1}: M \rightarrow TM$ для всех точек $p \in M \subset X$, и $\pi: TM \rightarrow M$. В структуре конкретного слоя $T_p M$ выделяется индивидуальный центр – точка p с координатами $x_p = \{x_{pk}\}$ в пространстве X , и ядро-карта V_p , соответствующая открытой окрестности U_p ($\pi^{-1}: U_p \rightarrow V_p$), где имеется наибольшее сходство свойств многообразия и данного слоя $T_p M$. Остальное пространство слоя $T_p M \setminus V_p$ трактуется как периферия. Такие построения задают естественную структуру для распространенных моделей типа «центр-периферия» [23, 36].

В каждом слое с началом в этом центре $y_p = \{0\}$ строится локальная СК $y_p = \{y_{pk}\}$ ядра V_p , совпадающая с координатами окрестности U_p точки $p \in M$ на многообразии, и внутренняя СК $\xi = \{\xi_{pk}\}$ слоя $T_p M$. Причем $y_{pk} = x_k - x_{pk}$ и $\xi_{pk} = \xi_{pk}(y_p)$, т.е. вектор ξ определенным образом трансформирует СК x и y . Векторное поле ξ – это гладкая векторная функция (набор функций) на многообразии M , значение которой в каждой точке – вектор V_p с началом в точке $p \in M$, касательный к M и лежащий в $T_p M$. Векторное поле на M называется сечением касательного расслоения $\sigma: M \rightarrow TM$ (см. рис. 2).

На связном открытом многообразии M помимо касательного расслоения может быть сформировано соответствующее слоение размерности m , определяющее специальное членение пространства M размерности n [21, 32]. Разность $n-m$ называется коразмерностью слоения. На M задается слоение коразмерности 1, если M наделено разбиением на линейно связные подмножества L_p – слои слоения $L = \{L_p\}$ – со следующим свойством: в окрестности U_p любой точки $p \in M$ найдется локальная СК $x_p: U_p \rightarrow \mathbb{R}$, в которой связные компоненты множества $L_p \cap U_p$ состоят из решений $x_n = \text{const}$. Конкретно, слоение коразмерности 1 – это разбиение M на непересекающиеся подмножества L_p , которые локально выглядят как поверхности уровня гладких регулярных функций. Для поля на двумерном пространстве аналогом поверхности уровня является изолинии, например, горизонтальны высот на

топокарте. Поверхностями уровня для скалярного поля на R^n являются гиперповерхности L_p размерности $n-1$. Слоение локально устроено как семейство параллельных плоскостей размерности m в евклидовом пространстве n . Слои слоения L_p подобно изолиниям не пересекаются, полностью покрывают M и определяют его топологический базис. Слои L_p имеют одну $x_n = \text{const}$, несколько или все постоянные значения координат (уровней). Слоение устанавливает на M отношения эквивалентности точек $M \times M_p \rightarrow M_p$, т.е. формирует M как фактор-пространство, в котором слой L_p соответствует множеству точек одного типа (уровня). Типологическая структура многообразия M определяет его пространственную неоднородность, причем контур-ареал слоя L_p может состоять из нескольких фрагментов в разных местах многообразия, как на типологической карте природной среды.

Любое локально тривиальное расслоение $\pi: Z \times Y \rightarrow Y$ является слоением (см. рис. 1, где Z задает уровень слоя). Теория слоений разрабатывает методы качественного (топологического) исследования дифференциальных уравнений. Теория касательного расслоения предлагает количественные методы таких исследований и моделирования.

1.4. Каноническое векторное поле. Количественные связи переменных, функций и слоев проясняет первая дифференциальная форма (Пфаффа) в виде полного дифференциала функции $F(x)$ разных наборов переменных $x \in M$ [15, с. 186–187]:

$$a) dF = \sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} dx_k = \sum_{k=1}^n a_k(x) dx_k = \sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} dx_k, \quad b) d = \sum_{k=1}^n dx_k \frac{\partial}{\partial x_k} . \quad (3)$$

Коэффициенты a дифференциальных форм разного порядка (dF, d^2F) определяют тензорное поле на многообразии. Соотношение (3б) выражает сумму произведения двух двойственных, независимых элементарных векторов с компонентами $\partial_k = \frac{\partial}{\partial x_k}$ и dx_k (рис.3). Векторы

$\partial = \{\partial_k\}$ в каждой карте образуют базис касательного пространства $T_p M$ векторов с компонентами $\xi_p = \{\xi_{pk}\}$:

$$\xi_p = \sum_{k=1}^n \xi_{pk} \frac{\partial}{\partial x_k} = \sum_{k=1}^n \xi_{pk} \partial_k . \quad (4)$$

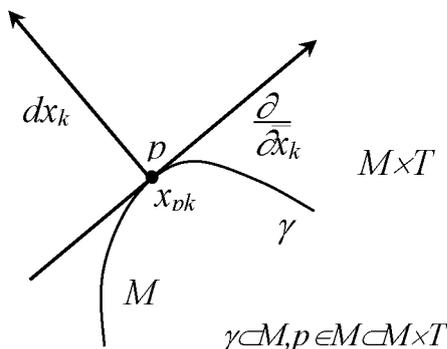


Рис. 3. Двойственные элементарные координатные векторы ∂_k и dx_k касательного векторного и ковекторного полей по линии γ в точке p

Отображение $\pi: TM \rightarrow M$ ставит в соответствие каждому касательному вектору ξ_p точку касания $p \in M$, в которой он задан в слое $T_p M$. Вектор ξ_p - это линейный функционал или оператор дифференцирования, подобный d в (3б):

$$\xi_p(F) = \sum_{k=1}^n \xi_{pk} \frac{\partial F}{\partial x_k} . \quad (5)$$

Дифференцирование разных функций осуществляется по направлению вдоль векторного поля.

Каждый вектор $\xi_p(F)$ является касательным вектором соответствующей линии γ на поверхности $F(x)$ из множества линий, проходящих через точку $p \in M$ (см.рис.2). В каждой точке с координатами x формируется пучок векторов $V_x = \{\xi_x\}$ и прямых линий такой, что направляющий вектор всякой прямой, касающейся поверхности в данной точке, является линейной комбинацией координатных векторов $\partial_p = \{\partial_{pk}\}$, соответствующих этой точке. Пучки векторов и линий обладают симметрией и структурой проективной топологии с центром $p \in M$, поэтому слои расслоенных пространств представляют конгруэнции различных линий и плоскостей.

Касательной гиперплоскостью (слоем) T_pM к многообразию M в точке p называется линейное пространство касательных векторов в этой точке. С каждой локальной СК касательная плоскость T_pM получает каноническую СК, в частности, координатный репер $\partial_p = \{\partial_{pk}\}$. Для определения векторного поля $V = \{V_x\}$ на многообразии M необходимо задать его компоненты послойно V_x в некотором атласе и указать правило преобразования координат вида (2) [9]:

$$dx_q = J_{pq} dx_p, J_{pq} = \begin{pmatrix} \partial x_{qk} \\ \partial x_{pk} \end{pmatrix}, \partial_q = J_{qp} \partial_p, J_{qp} = \begin{pmatrix} \partial x_{pk} \\ \partial x_{qk} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Векторное поле V на многообразии M является инвариантным геометрическим объектом, не зависит от выбора СК и атласа.

Множество ξ_p разных точек $p \in M$ с координатами x_p задает векторное поле, которое определяет увеличение значений функций по направлению вектора. Зная характеристики векторного поля, появляется возможность восстановить вид функции $F(x)$. Разные функции $F(x)$ определяются на точках многообразия $x \in M$ в виде отображения $F: M \rightarrow \mathbb{R}^1$. Конкретный вид функции $F(x)$ на практике обычно неизвестен, поэтому основной вопрос математической технологии состоит в том, как восстановить $F(x)$ по набору функций разных касательных слоев, опираясь на дифференциальные свойства многообразий относительно соответствующих расслоенных пространств. Касательное расслоение пространства – это пространственная система, в которой каждая точка пространства $x \in M$ и соответствующие ему функции $F(x)$ рассматриваются как вход-терминал в дополнительные измерения. Расслоенное пространство TM имеет удвоенную размерность $2n$, поскольку каждая точка $y \in T_pM$ определяется внешними координатами $x_p = \{x_{pk}\}$ ($k=1, 2, \dots, n$) тотального пространства $X = \mathbb{R}^n$ и соответственно локальными координатами $y_p = \{y_{pk}\}$ выделенной точки p с базой $dx = \{dx_{pk}\}$ и внутренними координатами вектора $\xi_p = \{\xi_{pk}\}$ в подпространстве каждого касательного слоя T_pM с базой $\partial_p = \{\partial_{pk}\}$ (см. рис. 3). Поверхность $F(x)$ является огибающей множества слоев и может быть восстановлена на основе особенностей функций расслоенного пространства TM .

Для любой выпуклой дифференцируемой функции $F(x)$ справедливо касательное преобразование Лежандра $F(x) \rightarrow \Phi(a)$ [14], переводящее функцию исходного набора переменных $x = \{x_k\}$ в функцию $\Phi(a)$ дуальных переменных $a = \{a_k\}$:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n a_i x_i - \Phi(a), \quad (7)$$

где $b = -\Phi(a) = F(0)$ - свободный член линейного неоднородного уравнения (7). Это позволяет по пространственным и временным рядам данных $x(t)$ статистически восстанавливать вид функции $\Phi(a)$. В разных отраслях науки [5, 34, 41] давно отмечено наличие линейной связи b с коэффициентами $a = \{a_k\}$:

$$\Phi(a) = F_0 - \sum_{i=1}^n a_i x_{pi}. \quad (8)$$

В этом случае, рассматривая $x_p = \{x_{pk}\}$ в качестве точки касания, приходим к

$$f(y, x_p) = \sum_{k=1}^n y_k \frac{\partial f}{\partial y_k}(y, x_p) = \sum_{k=1}^n a_k y_k, \quad \xi = \sum_{k=1}^n y_k \frac{\partial}{\partial y_k}, \quad (9)$$

где $f(\cdot)$ является однородной функцией первого порядка по y , и компоненты вектора ξ соответствуют $\xi_k = y_k$ значениям локальной СК, откуда вектор $\xi(y) = y$ является вектором канонического эйлера поля [2], отражающего состояние (y, x_p) систем. Для объектов в этих координатах осуществляется параллельный перенос без изменения формы, поэтому уравнения $\xi(f) = f$ в слое $T_p M$ соответствует такому же уравнению другого слоя. Это означает тождественное преобразование координат (2) и говорит о простоте и универсальности билинейных по y и a моделей вида (9). При ММ основной задачей является определение на основе соотношения (7) переменных компонентов ковектора $a = \{a_k\}$, величина которых зависит от вида функции $f(\cdot)$ и текущих значений $y = \{y_k\}$.

Здесь есть прямая аналогия со свойствами пространства Финслера [37], в каждом слое которого реализуется функция связи координат $f(y, x_p)$ как метрика этого пространства, удовлетворяющая формуле (9). Для каждой модели связи переменных в уравнении (9) задаются свои функции $F(x)$ и метрики-оценки $f(y, x_p)$, имеющие различный содержательный смысл. Набор таких независимых функций формирует новое координатное пространство моделирования с канонической вектор-функцией ξ вида (9). Все модели связи имеют эквивалентный вид симметрического преобразования $\xi(f) = f$. Для статистической достоверности соотношений (9) проверяется гипотеза линейной зависимости (8) коэффициентов билинейных уравнений.

Функции $f(y, x_p)$, 1-однородные по первому аргументу $y = \{y_k\}$, обладают уникальным свойством: все касательные линии и плоскости к этим функциям в разных точках пересекаются в центре - начале локальных координат $y = 0$ [10], образуют пучки разной размерности из геометрических объектов, симметричных относительно аффинного поворота вокруг этого центра [2] и формирующих проективную топологию пространства слоя [9]. Уравнение (9) можно рассматривать как расширенный вариант базовой формы (3а), когда дифференциалы dx_k в окрестности точки $x = \{x_k\}$ заменяются конечными разностями $y_k = \Delta x_k = x_k - x_{pk}$, что соответствует заявленным свойствам многообразия M быть локально линейными.

Первыми интегралами дифференциального уравнения $\xi(f) = f$ являются функции вида

$$c_k = \frac{f}{y_k}, \quad c_{kl} = \frac{y_k}{y_l}, \quad (10)$$

где c_k, c_{kl} - однородные координаты СК, разные функции от которых определяют решения

этого уравнения. Производная первых интегралов по направлению векторного поля $\xi(c_k)=0$, $\xi(c_{kl})=0$, т.е. их значения сохраняются (постоянны) на любых решениях уравнения.

Система уравнений (9) является автономной [2, с.95], т.е. функции $f(y, x_p)$ переходят в себя $\xi(f)=f$ при сдвигах во времени, т.е. $f(\cdot)$ здесь явно не зависит от времени t . Эти уравнения описывают разнообразные явления самостоятельного преобразования систем без переменного внешнего влияния (установившиеся процессы). Если $f(y, x_p)$ - решение автономной системы дифференциальных уравнений (в векторном виде), то эта функция остаётся решением и при сдвиге аргумента $x=y+x_p$. Это означает, что функции связи явлений в локальных y и глобальных x координатах эквивалентны.

Процессы трансформации описываются системой неавтономных уравнений, явно зависящих от времени. В этом случае соотношения (3) принимают вид

$$a) \frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{k=1}^n v_k \frac{\partial f}{\partial y_k}, \quad \xi = \frac{\partial}{\partial t} + \sum_{k=1}^n v_k \frac{\partial}{\partial y_k}, \quad v_k = \frac{dx_k}{dt} = \frac{dy_k}{dt}. \quad (11)$$

где v_k - скорость изменения переменных x и y со временем. Касательные векторы ξ задают векторное поле скоростей и направлений изменения функций $f(t, y(t), x_p)$ вдоль этого поля по параметру t . Уравнения (11a) - это своеобразные потоковые уравнения вида $df/dt = \xi(f)$ для временного изменения f по разным направлениям $y=\{y_k\}$. Вектор df/dt направлен по касательной к линии $f(t)$ на поверхности, заданной вектор-функцией $R=R(r)$ вектора $r(u(t), v(t))$.

1.5. Сопровождающий трёхгранник и тетраэдры поверхности. С каждым слоем связаны разнообразные соприкасающиеся структуры и функции, позволяющие создавать различные модели. Пусть $f(t)$ – параметрическое векторное выражение регулярной кривой γ с компонентами $f(t)=\{f_k(t)\}$. Вектор $\tau = f' = df/dt$ - производная от радиуса-вектора постоянной длины точки кривой по параметру t есть вектор, направленный по касательной к этой кривой. Вектор $f'' = d^2f/dt^2$ направлен по главной нормали $n = f''/|f''|$ к кривой в соприкасающейся плоскости, проходящей также через вектор τ . Нормаль $b = f' \times n$, перпендикулярная соприкасающейся плоскости, называется бинормалью [7] (рис. 4).

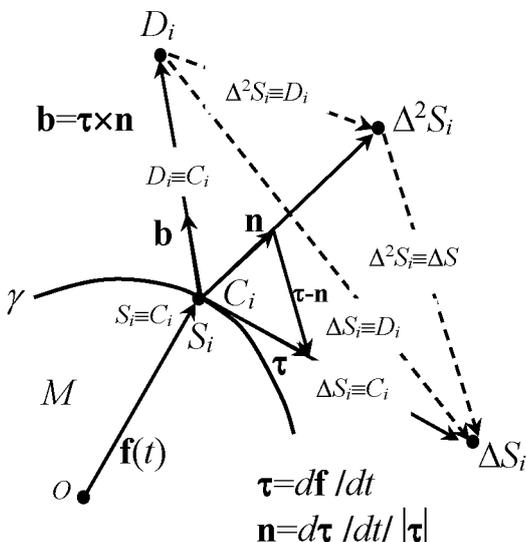


Рис. 4. Сопровождающий трёхгранник (τ, n, b) и соответствующая формальная категория связи системных понятий.

Набор ортогональных векторов $(\tau, \mathbf{n}, \mathbf{b})$ определяет в каждой точке кривой γ трёхгранник с тремя прямыми углами при вершине, совпадающей с точкой на кривой. Он называется сопровождающим (основным, натуральным) трёхгранником Френе. Трёхгранник позволяет связать с каждой точкой на кривой γ прямоугольную систему координат (см. рис. 4). Трёхгранник не зависит от способа параметризации функции f кривой по произвольным t или натуральным s параметрам. Векторы трёхгранника меняются при движении точки по кривой. Эти изменения описываются формулами Френе как результат взаимодействия единичных векторов $(\tau, \mathbf{n}, \mathbf{b})$ с учетом коэффициентов кривизны и кручения кривой.

Сопровождающий трёхгранник (ортонормированный репер в трёхмерном пространстве), является своеобразной надстройкой над слоем, определяющей дополнительную структуру слоя наподобие различных функций, увлекаемых векторным полем вида (4) или (11б).

Имеется также возможность определить не линию, а поверхность компонентами движения тетраэдра. Пусть \mathbf{M} – произвольная точка поверхности с переменными координатами, заданных в \mathbb{R}^3 тремя функциями $\mathbf{f}(u, v) = \{f_k(u, v)\}$ параметров (u, v) . К точке \mathbf{M} присоединяется еще три точки $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$ и \mathbf{M}_3 , не лежащие в одной плоскости и вместе определяющие положения вершин тетраэдра $\mathbf{T}(\mathbf{M}, \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3)$, который принимается за координатный тетраэдр при определении всех точек и линий, связанных с точкой \mathbf{M} поверхности [36]. С изменением параметров (u, v) точка \mathbf{M} передвигается по поверхности, и тетраэдр \mathbf{T} переходит в новое положение. Объект $\mathbf{f}(u, v)$ будет по-разному выглядеть в разных системах координат \mathbf{T} .

Идеи сопровождающего трёхгранника и тетраэдра интересны с точки зрения организации и трансформации онтологического пространства знаний – связей понятий, моделируемых векторами-стрелками (морфизмами, функциями) их отображений $\varphi_{ij}: Y_i \rightarrow Y_j$ в категориях объектов расслоенных множеств $Y = \{Y_i\}$. С каждой стрелкой φ_{ij} связано два специальных объекта категории: её начало Y_i и конец Y_j – множества определения и значений функции φ_{ij} . В связи с этим вектор можно рассматривать как комбинацию множеств $\varphi_{ij}: Y_i Y_j$, соответствующему новому множеству $Y_i Y_j \rightarrow Y_k$. По этой причине категории организуется в треугольные $Y_i Y_j Y_k$ и более сложные коммутативные ($Y_i Y_k \equiv Y_j Y_k$) диаграммы связи объектов-категорий через стрелки-морфизмы, что выглядит как векторное поле (система) передачи информации от объекта к объекту категории.

1.6. Векторная организация знаний. Сопровождающий трёхгранник или тетраэдр выражают элементарные коммутативные диаграммы отображения из одного слоя информации в другой, связывает начальные и конечные позиции стрелок разными способами в тетраэдр (симплекс) (см. рис. 4). Стрелки отражают разные отношения типа причинно-следственных и логических связей (\rightarrow), тождества противоположностей (\leftrightarrow, \equiv), равенства различного ($=$). В категориях они могут быть взаимно направлены, оборачиваться или исчезать в зависимости от результатов трансформации векторного поля. Разность векторов вида $\Delta\tau = \tau - \mathbf{n}$ – вектор, соединяющий их концы – рассматриваются как новое знание, устанавливающее связь исходных понятий, результата их коммутации (вывода).

Согласно смысловому содержанию векторов трёхгранника выделяются четыре независимых множества $(\mathbf{f}, \tau, \mathbf{n}, \mathbf{b})$ компонентов (f_i, τ_i, n_i, b_i) . В обобщенном смысле их

можно трактовать соответственно как множества систем S_i , их изменений ΔS_i , ускоренных изменений $\Delta^2 S_i$ и действий D_i . Дополнительно рассматриваются инварианты слоя C_i , соответствующие началу координат - точки касания x_p к поверхности, что отображено в формуле $f_p(y) = f(y, x_p)$. В этом смысле каждое многообразие есть множество точек инвариантов – начал разных локальных систем координат (категорий связи знаний). Элементы перечисленных множеств с помощью стрелок и их аналогов попарно сочетаются (комбинируются), формируя некоторые законы-высказывания [9], базовые из которых следующие

$$1) S_i \equiv C_i, 2) \Delta S_i \equiv C_i, 3) \Delta S_i \equiv D_i. \quad (12)$$

Их можно считать аксиомами общей теории систем, которая рассматривается как типовой слой теоретической организации знаний в виде тетраэдра аксиоматических связей понятий, движение которого в другие точки инвариантного многообразия должно порождать новые системные теории и модели через интерпретацию понятий.

Как координатные векторы, законы (12) независимы, взаимно не выводимы. В касательном векторном пространстве выражению $S_i \equiv C_i$ соответствуют первые интегралы дифференциальных уравнений (10), тождеству $\Delta S_i \equiv D_i$ – соотношения вида (11). В разных теориях действие D_i обычно воспринимается как векторное или скалярное произведение векторов, а также в виде функционалов других типов. Изменения трактуются как производные по параметрам, например, по времени или расстоянию. Аксиоматический тетраэдр допускает другие сочетания понятий, кроме указанных в списке (12). В частности, тождество $\Delta S_i \equiv S_i$ моделирует автономный процесс саморазвития $f = \xi(f)$, тождество $\Delta^2 S_i \equiv \Delta S_i$ отражает переходный процесс $S_i \rightarrow S_j = S_i + \Delta S_i$. Различные комбинации понятий становятся возможны в силу произвольности выбора функций f в уравнениях (9) и (11) для анализа свойств векторных полей на многообразиях связи разных переменных $x = \{x_k\}$.

Действие $D_i = D(S_i)$ в законах относятся к правой части соотношений, отражающей причину существования явлений или процессов изменения, например, $\Delta S_i = D(S_i)$ или $C_i = D(S_i)$; последнее выражает закон сохранения действия. В конкретных уравнениях от выбора вида изменений зависят особенности поведения системы. Особый случай – постулирование постоянства вектора действия $D = \xi$ для развивающихся систем, поиск соответствующих векторных полей, определяющих интегральные линии решений.

Простое понимание вектора как стрелки, связывающей некоторые начальные и конечные позиции, позволяет обобщить представление о векторе, векторном пространстве и поле с соответствующими координатными базисами в виде дифференциалов и частных производных или законов связи понятий. Это дает возможность ввести в ММ новые аналитические методы исследований, например, представить элементы структуры графов и формальных категорий в соответствующем расслоенном метрическом или ином удобном для ММ пространстве.

В математико-технологических методах построения моделей есть много общего знания МТ-уровня, непосредственно следующего из математических формулировок связи понятий и переменных с ограничениями, определяющими особенности существования инвариантных многообразий разного вида и векторных пространств их касательных векторных расслоений качественного и количественного содержания, что полезно использовать для решения задач ММ по единой исследовательской схеме.

2. Примеры системного моделирования. При системном моделировании МТ-положения интерпретируются в терминах систем разного рода. Аксиоматически принимается существование специального многообразия M как локально линейного пространства связи параметров $x \in X$ систем и двойственного ему касательного векторного пространства TM удвоенной размерности с касательными слоями T_pM . Пространство X может быть не только трехмерным физическим, но и пространством различных природных и социально-экономических измеримых показателей, в котором при моделировании многообразия воспринимается как сплошная неоднородная среда, в частности, среда географическая. Такое многообразие является поверхностью-средой, инвариантной относительно TM , так что структуры и функции каждого слоя T_pM становятся средообусловленными. Учет средового смещения $x \rightarrow y$ дает эквивалентные соотношения $\xi[f(y)]$ – одинаковые в каждом слое.

Считается [1], что касательное пространство ξ в точке p – это линейное приближение гладкого многообразия M в окрестности U_p этой точки. На самом деле каждый касательный слой T_pM имеет самостоятельное значение и неограниченное (сквозное) распространение в X и только в слое соответствует ограниченному слою $L_p \subset M$ с точным описанием локальной ситуации моделью векторного поля $\xi \subset T_pM$ в слое $L_p \subset M$ различного типа и местоположения с разными константными характеристиками (инвариантами) существования (см. рис. 2). В итоге многообразие трактуется в различных смыслах как континуум среды (скалярное поле), слоевание L , касательное расслоение TM , векторное поле ξ , пучки линейных связей, система дифференциальных уравнений $z = \xi(f)$, системы локальных координат, сопровождающих трехгранников и тетраэдров и как множество других формальных представлений наблюдаемых процессов и явлений, которые могут быть выражены в соответствующих моделях представления знаний.

Например, в географической проблематике, слоеваниями являются ландшафтно-типологическая структура территории, уровни территориальной иерархии, природные и экономические районы, суверенные государства, отрасли народного хозяйства, независимые органы власти и т.д. Векторное поле в соответствующих слоях расслоения задаются причинно-следственными связями слоев и векторами интересов. Здесь возникает сочетание количественного и качественного подходов, необходимых для ММ и позволяющих перевести графические схемы в дифференциальные уравнения. Возникает проблема содержательной интерпретации МТ-представлений в терминах разных наук, поскольку аналогичные суждения прослеживаются в различных областях знаний.

Одним из простейших решений дифференциального уравнения (9) является линейная функция (α_k – константы, компоненты ξ_k векторов):

$$f(y, x_p) = \sum_{k=1}^n \alpha_k y_k.$$

В частности, она выражает балансовое соотношение массы или стоимости (y_k) с положительными ($\alpha_k=1$) или отрицательными ($\alpha_k=-1$) составляющими баланса. Если в качестве y_k рассматривать объем товарной массы, поступившей на рынок, коэффициент α_k считается ценой товара k -го вида, а функция $f(y, x_p)$ – совокупной стоимостью товара, связанной с рыночной ситуацией в регионе p со средовыми характеристиками рынка x_p ,

соответствующими, например, нереализованной массе товаров на складах или объему экспорта по разным сортаментам.

Для выявления средовой характеристики $x_p = \{x_{pk}\}$ используется связь коэффициентов (8) на основе данных из различных источников, однородных по показателям географической среды. Аллометрические уравнения, отражающие парные причинно-следственные связи в живых организмах, получаются из выражения (9) при задании переменных в логарифмическом масштабе (константа c_k):

$$F = F_p (x_k / x_{pk})^{c_k} = \Phi x_k^{c_k}, \ln F = c_k \ln x_k - c_k \ln x_{pk} + \ln F_p, \ln \Phi(c_k) = -c_k \ln x_{pk} + \ln F_p. \quad (13)$$

Зависимость высоты деревьев $F(x_k)$ от диаметра x_k описывается уравнением (13) с коэффициентами Φ , c_k и x_{pk} , определяемыми условиями среды. Коэффициенты меняются в зависимости от породы, типов условий среды, периодов развития, например, есть 6 вариантов уравнений вида $F = 0,580 x_k^{1,221}$ для сосны [22]. Коэффициенты этой связи действительно линейно связаны: $\ln \Phi = -2,63 c_k + 2,63$, $r = -0,98$. Отсюда величины среднего смещения равны $\ln x_{pk} = 2,63$, $\ln F_p = 2,63$, следовательно, $\ln F - 2,63 = c_k (\ln x_k - 2,63)$ - в логарифмической шкале эта зависимость представляет собой пучок линий с разным наклоном c_k . Эмпирически эту закономерность для аллометрических соотношений давно выявил Г. Лумер [39], и она естественно следует из автономного уравнения (9) при особом понимании элементов и связей.

Направленные процессы описываются потоковыми уравнениями (11), решение которых находится при определении их левой части, что позволяет конкретизировать зависимость искомой функции $f(t, y)$ от времени и факторов влияния $y = \{y_k\}$. Пусть $P^*(t, y)$ - вероятность отказа системы выполнять свои функции, $E(t, y) = -\ln P^*(t, y)$ - величина

интегрированной опасности $E(t, y) = -\ln P^*(t, y) = \int_0^t \rho(t, y) dt$, $\rho(t, y) = P(t, y) / P^*(t, y)$ -

интенсивность отказов (риск). Отсюда $dP^* / dt = -\rho P^*$ и $dE / dt = \rho(t, y)$, следовательно,

$$\rho P^* = \xi(P^*) = \frac{\partial P^*}{\partial t} + \sum_{k=1}^n v_k \frac{\partial P^*}{\partial y_k}, \rho(t, y) = \xi(E) = \frac{\partial E}{\partial t} + \sum_{k=1}^n v_k \frac{\partial E}{\partial y_k}.$$

В первом случае $\rho = \xi$, т.е. различие риска по факторам соответствует векторному полю скоростей изменения факторов. Для случая постоянного поля $\rho = const$ функция отказа становится экспоненциальной функцией времени $P^*(t, y) = \exp(-pt)$, что характерно для физических систем. Во втором случае $\rho(t, y)$ является функцией времени и набора факторов риска. Постоянное векторное поле $\rho_0 = \xi$ в этом случае приводит к зависимости $E(t, y) = \exp(\rho_0 t)$, откуда $\rho(t, y) = \rho_0 \exp(\rho_0 t)$ и

$P^*(t, y) = \exp\left[-\rho_0 \int_0^t \exp(\rho_0 t) dt\right] = \exp[-(\exp(\rho_0 t) - 1)]$. Здесь $P^*(t, y)$ имеет вид функции

Гомпертца, распространенной в практике моделирования динамики популяций [5].

Этот анализ показывает, что правильный аксиоматический выбор постоянного вектора и соответствующего постоянного поля направлений решений уравнений определяет

вид искомой зависимости. В последнем варианте при $\rho = \xi = \text{const}$ появляется эволюционное уравнение

$$\rho_0 E(t, y) = \frac{\partial E}{\partial t} + \sum_{k=1}^n v_k \frac{\partial E}{\partial y_k},$$

для решения которого находятся первые интегралы C, C_k, C_{kl} :

$$E = C \exp(\rho_0 t), E = C_k \exp\left(\rho_0 \frac{y_k}{v_k}\right), \frac{y_k}{v_k} = \frac{y_l}{v_l} + C_{kl}, y_k = x_k - x_{pk}.$$

Эти соотношения указывают на возможные типы зависимости $E(t, y)$ и производных функций надежности от времени и факторов, что позволяет создавать модели влияния факторов x_k и условий x_{0k} на величину риска в различных географических ситуациях [33].

Многовариантность задания функций в дифференциальных уравнениях в соответствие с разнообразием аксиоматических комбинаций понятий позволяет получить системные модели разного типа. Например, в (9) функцию $f(y, x_p)$ можно считать скоростью изменения координат положения объекта в пространстве признаков $v_l(y, x_p) = dy_l(y, x_p) / dt$. В этом случае

$$\frac{d(x_l - x_{pl})}{dt} = \sum_{k=1}^n a_{kl} (x_k - x_{pk}). \quad (18)$$

Такие уравнения используются при ММ эколого-экономических систем [8], где $x = \{x_k\}$ и $x_p = \{x_{pk}\}$ - агрегированные показатели текущего состояния природных ресурсов и их потенциальных равновесных значений; a_{kl} - коэффициенты самовосстановления и взаимовлияния природных ресурсов (в общем случае переменные величины, 0-однородные функции). Значения x_p зависят от разных аспектов природопользования, величины хозяйственных воздействий на природную среду. Равенство $x = x_p$ соответствует тривиальному решению уравнения (18), а именно естественному восстановительному ресурсному потенциалу, характеризующему особенности региональной географической среды. В формальном смысле состояние $x = x_p$ - это координаты точки касания многообразия природных ресурсов процессом природопользования в регионе.

Заключение. Уравнения системного моделирования явлений (9) и процессов (11) - автономных и неавтономных систем - напрямую связаны со своеобразными свойствами векторных полей касательных подпространств на многообразиях, которые в науке широко трактуются как среда, в том числе - географическая среда. Уравнения моделирования систем появляются в результате послойного погружения оценочных функций в векторные поля состояний и скоростей. Эти уравнения в касательном слое обладают универсальностью, т.е. не зависят от выбора глобальных (внешних) и локальных (внутренних) систем координат, соответствующих набору измеряемых показателей пространства исследования. На многообразии среды задаются векторные поля и касательные плоскости, порождающие расслоенное пространство этого многообразия, где каждый слой описывает изменение объекта, его структуры и функции в конкретной ситуации, определяемой точкой касания (местной средой). Коррелированное с расслоением слоение многообразия среды отражает топологическую и типологическую структуру пространства исследования как

геоинформационного поля – источника знаний о своеобразии местных условий. Расслоенное познание и моделирование позволяет выделить универсальные среднезависимые уравнения и затем при расчетах учесть среду и ее динамику через смещение показателей.

Всякому пути на многообразии соответствует сопровождающий трехгранник или тетраэдр с локальными свойствами, однозначно определенными точкой касания. В расширенном смысле такой тетраэдр можно трактовать как формальную категорию, векторы-стрелки которой связывают базовые понятия интертеории моделирования в специальной предметной области. Независимые комбинации понятий порождают законы их связи в приложении к природным и социально-экономическим системам различного рода. Каждую функцию связи одинаково успешно можно описать как зависимость от параметра (расстояния, времени) и, что существенно, от показателей-факторов влияния, отразив причинно-следственные связи с учетом особенностей условий местоположения.

Прослеживается единство качественного и количественного подхода в ММ, выраженного соответственно в схемах (чертежах, графах, категориях) и аналитических формулах, в структурных и функциональных, топологических и геометрических построениях. Предлагается расширенная трактовка векторности, что позволяет создавать модели по универсальным правилам организации научного знания, облегчить процесс моделирования, определив виды допустимых уравнений и ограничения их применения.

Для исследования и моделирования процессов и явлений в природе и обществе пока используется малая часть тех информационных возможностей, что предоставляет современная математика. Прослеживается необходимость применения финслеровых пространств, теорий связности, конечных непрерывных групп, теории категорий и др. В основе методов ММ лежит аксиоматическое утверждение, что наблюдаемый мир устроен как многообразие, частным выражением чего является неоднородная географическая среда, которую можно изучать, типизировать и картографировать в соответствии с принципами дифференциальной геометрии и топологии. Это утверждение необходимо эмпирически проверять и практически использовать в разных областях науки и прикладной деятельности, где проявляется принцип средовой относительности оценки явлений и прогнозирования развития процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аграчев А.А., Сачков Ю.Л. Геометрическая теория управления. М.:Физматлит. 2005. 392с.
2. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука. 1971. 240 с.
3. Васильев А.М. Теория дифференциально-геометрических структур. М.: Изд-во МГУ. 1987. 190 с.
4. Волобуев И.П., Кубышкин Ю.А. Дифференциальная геометрия и алгебры Ли и их приложения в теории поля. М.: Эдиториал УРСС. 1998. 224 с.
5. Гаврилов Л.А., Гаврилова Н.С. Биология продолжительности жизни. М.:Наука. 1991. 385с.
6. Герловин И.Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе. Л.: Энергоатомиздат. 1990. 432 с.
7. Готман А.Ш. Дифференциальная геометрия и ее использование в проектировании обводов судов. Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водного транспорта. 2011. 43 с.

8. Гурман В.И. (ред.) Модели управления природными ресурсами. М.: Наука. 1981. 264 с.
9. Катанаев М.О. Геометрические методы в математической физике. М.: Математический институт имени В. А. Стеклова РАН, Казанский федеральный университет. 2016. 1570 с. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1311.0733.pdf> (дата доступа 26.03.2019)
10. Картан Э. Ж. Теория конечных непрерывных групп и дифференциальная геометрия, изложенная методом подвижного репера. М.: Изд-во МГУ. 1963. 368 с.
11. Ковеня В.М. Некоторые проблемы и тенденции развития математического моделирования // Прикладная механика и техническая физика. 2002. т.43. №3. с. 3-14.
12. Лебедев С.А. Метатеоретическое знание // Философия науки: Терминологический словарь. М.: Академический Проект. 2011. С. 87.
13. Меншуткин В.В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Санкт-Петербург ; Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН. 2010. 416 с.
14. Натанзон С. Краткий курс математического анализа. М.: Московский центр непрерывного математического образования (МЦНМО). 2018. 96 с.
15. Пенроуз Р. Путь к реальности или законы, управляющие Вселенной. Москва, Ижевск: R&C Dynamics, Институт компьютерных исследований. 2007. 911 с.
16. Позняк Э.Г., Шикин Е.В. Дифференциальная геометрия: первое знакомство. М.: Из-во МГУ. 1990. 384 с.
17. Савин Г. И. Системное моделирование сложных процессов. М.: Финансы и статистика. 2000. 276 с.
18. Самарский А. А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вестн. АН СССР. 1979. № 5. С. 38–49.
19. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи, методы, примеры. М.: Физматлит. 2001. 320 с.
20. Сарданашвили Г. А. Современные методы теории поля. 1. Геометрия и классические поля. М.: УРСС. 1996. 224 с.
21. Тамура И. Топология слоений. М: Мир. 1979. 317 с.
22. Терсков И.А., Терскова М.И. Рост одновозрастных древостоев. Новосибирск: Наука. 1980. 208 с.
23. Удалов В.С., Колобов О. А. Система «Центр – Периферия» в современном политическом процессе // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2011. №1 (2). С. 297–301.
24. Урманцев Ю.А. Общая теория систем: состояние, приложение и перспективы развития // Система. Симметрия. Гармония. М.: 1988. С. 38-130.
25. Фиников С.П. Проективно-дифференциальная геометрия. М.: КомКнига. 2006. 264 с.
26. Черкашин А.К. Логические аспекты в решении теоретических проблем в географии // Методологические проблемы конкретных наук. Новосибирск: Наука. 1984. С.149-160.
27. Черкашин А. К. Полисистемный анализ и синтез. Новосибирск: Наука. 1997. 502 с.
28. Черкашин А. К. Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука. 2005. 280 с.
29. Черкашин А.К. Полисистемные исследования развития теоретической географии // География и природные ресурсы. №3. 2007. С. 27-37.
30. Черкашин А.К. Гомология и гомотопия в математике и математическом моделировании // Гомология и гомотопия географических систем. Новосибирск: Академическое издательство «Гео». 2009. С. 47–102.

31. Черкашин А.К. Модели и методы анализа территориальной организации общества // Региональные исследования. 2016. №1 (51). С. 23–36.
32. Черкашин А.К. Математические основания синтеза знаний междисциплинарных исследований социально-экономических явлений // Журнал экономической теории. №3. 2017. С. 108–124.
33. Черкашин А.К., Красноштанова Н.Е. Моделирование оценки риска хозяйственной деятельности в районах нового нефтегазового освоения // Проблемы анализа риска. 2015. № 6. С. 21–29.
34. Черкашин А.К., Мяззелец А.В. Характеризация развития региональной экономики с учетом макроэкономических факторов и условий // Экономика и математические методы. 2017. т.53. №4. С. 13–25.
35. Cherkashin A.K. Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and Society // Mathematical modelling of natural phenomena. 2009. V.4. № 5. Pp. 4–20.
36. Borgatti S.P., Everett M.G. Models of core/periphery structures // Social Networks. 1999. V.21. Pp. 375–395.
37. Dahl M. An brief introduction to Finsler geometry. 2006. Available at: <https://math.aalto.fi/~fdahl/fmsler/fmsler.pdf> (accessed 25.03.2019)
38. Lawson H.B. Foliations // Bull. Amer. Math. Soc., 1974. v.80. N 3. Pp. 369–418.
39. Lumer H. The dimentions and interrelationship of the Relative Growth Constants // The American Naturalist. V. 73. № 747. 1939. Pp. 339–346.
40. Richardson B.C., Joscelyn K.B., Saalberg J.H. Limitations on the use of mathematical models in transportation policy analysis // Transportation research, policy analysis studies. Report Number UM-HSRI-79-46. UMI Research Press. 1979. 15 p. Available at: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/509/43459.0001.001.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (accessed 25.03.2019)
41. Strehler B.L., Mildvan A.S. General Theory of mortality and aging // Science. V.132. № 418. 1960. Pp. 14–21.

UDK 51.7:514.762:911.7

**METATHEORETICAL SYSTEM MODELLING OF NATURAL AND SOCIAL
PROCESSES AND PHENOMENA IN HETEROGENIOUS ENVIRONMENT**

Alexander K. Cherkashin

Dr., Professor, Chief Researcher,

Head of the Laboratory "Theoretical geography"

V.B. Sochava Institute of Geography

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

664033, Russia, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya 1, e-mail: akcherk@irnok.net

Abstract. Metatheoretical (MT) bases of intertheoretical mathematical modeling of natural, economic and social systems are discussed. The main MT-statements are formulated in terms of differential geometry of tangent fibration and foliation on

manifolds taking into account experience of creation of polysystem models in geographical science. The manifold is interpreted as the geographical environment of formation of the phenomena and processes. The equations for their modeling appear respectively as a result of mapping estimation functions upon vector fields of states and velocities of the fiber space. The tangent point of fiber contact is interpreted as environmental type of realization of the modelled regularities, and its global coordinates correspond to conditions of environmental shift of system parameters. Taking into account these shifts the local system of coordinates is formed. The created MT-equations of connections and changes of relative parameters don't depend on the choice of global (external) and local (internal) coordinate systems. The foliation of the environment manifolds defines topological and typological structures of a research space as geoinformation source of knowledge on heterogeneity of local conditions. MT-modeling proposes the universal equations and allows taking into account an originality of systems and their environment through content-related interpretation of abstract concepts and environmental shift of variables. For MT-modeling the structures and functions connected with fibers are of importance, in particular, trihedrons and tetrahedrons of lines and surfaces. Their analogs are formal categories as the commutative diagrams of connections of concepts generating laws of creation of any system models.

Keywords: metatheoretical knowledge, intertheoretical modeling, polysystem models, environmental manifolds, environmental relativity, vector fields and functionals, equations of processes and phenomena.

References

1. Agrachev A.A., Sachkov YU.L. Geometricheskaya teoriya upravleniya [Geometrical theory of management]. Moscow. Fizmatlit. 2005. 392 p. (in Russian)
2. Arnol'd V.I. Obyknoennye differentsial'nye uravneniya [Ordinary differential equations]. Moscow. Nauka = Science. 1971. 240 p. (in Russian)
3. Vasil'ev A.M. Teoriya differentsial'no-geometricheskikh struktur [Theory of differentially-geometrical structures]. Moscow. Izd-vo MGU = Moscow State University publishing house. 1987. 190 p. (in Russian)
4. Volobuev I.P., Kubyshekin YU.A. Differentsial'naya geometriya i algebrы Li i ikh prilozheniya v teorii polya [Differential geometry and algebra Li and their application in the theory of the field theory]. Moscow. Editorial URSS. 1998. 224 p. (in Russian)
5. Gavrilov L.A., Gavrilova N.S. Biologiya prodolzhitel'nosti zhizni [Biology of life-span]. Moscow. Nauka = Science. 1991. 385 p. (in Russian)
6. Gerlovin I.L. Osnovy edinoj teorii vseh vzaimodejstvij v veshchestve [Bases of unique theory of all interactions in substance]. Leningrad. Energoatomizdat. 1990. 432 p. (in Russian)
7. Gotman A.S.H. Differentsial'naya geometriya i ee ispol'zovanie v proektirovanii obvodov sudov [Differential geometry and its usage in designing ship outlines]. Novosibirsk. Novosibirskaya gosudarstvennaya akademiya vodnogo transporta = Novosibirsk State Academy of Water Transport. 2011. 43 p. (in Russian)
8. Gurman V.I. (red.) Modeli upravleniya prirodnymi resursami [Model of control on natural resources]. Moscow. Nauka = Science. 1981. 264 p (in Russian)

9. Katanaev M.O. Geometricheskie metody v matematicheskoy fizike [Geometrical methods in mathematical physics]. Moscow. Matematicheskij institut imeni V.A. Steklova RAN, Kazanskij federal'nyj universitet = Mathematical Institute named after V.A. Steklov RAS, Kazan Federal University. 2016. 1570 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1311.0733.pdf> (accessed 26.03.2019) (in Russian)
10. Cartan E.ZH. Teoriya konechnykh nepreryvnykh grupp i differentsial'naya geometriya, izlozhennaya metodom podvizhnogo repera [Theory of finite continuous groups and differential geometry expounded by the method of moving frame]. Moscow. Izd-vo MGU = Moscow State University publishing house. 1963. 368 p. (in Russian)
11. Kovenya V.M. Nekotorye problemy i tendentsii razvitiya matematicheskogo modelirovaniya [Some problems and progress in mathematical modelling // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = Applied mechanics and technical physics. 2002. v.43. № 3. Pp. 3–14. (in Russian)
12. Lebedev S.A. Metateoreticheskoe znanie [Metatheoretical knowledge // Filosofiya nauki: Terminologicheskij slovar' // Science Philosophy: the terminological dictionary. Moscow. Akademicheskij Proekt = Academic Project. 2011. Pp. 87. (in Russian)
13. Menshutkin V.V. Iskusstvo modelirovaniya (ekologiya, fiziologiya, evolyutsiya) [Art of modelling (ecology, physiology, evolution)]. Sankt-Peterburg; Petrozavodsk: Karel'skiy nauch. tsentr RAN = St. Petersburg ; Petrozavodsk: Karelian scientific center of RAS. 2010. 416 p. (in Russian)
14. Natanzon S. Kratkij kurs matematicheskogo analiza [Short course on mathematical analysis]. Moscow. Izdatel'stvo Moskovskiy tsentr nepreryvnogo matematicheskogo obrazovaniya (MTSNMO) = Publishing House Moscow Center for Continuous Mathematical Education. 2018. 96 p. (in Russian)
15. Penrose R. The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. London: Jonathan Cape. 2004. 1094 p. (Russ. Ed.: Penrose R. Put' k real'nosti ili zakony, upravlyayushchiye Vselennoy. Moscow. Nauchno-izdatel'skiy tsentr «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» (NITS «RKHD»)) = Scientific and Publishing Center "Regular and Chaotic Dynamics" (SIC "RHD"). 2007. 911 p.
16. Poznyak E.G., SHikin E.V. Differentsial'naya geometriya: pervoe znakomstvo [Differential geometry: the limited theory]. Moscow. Izd-vo MGU = Moscow State University publishing house. 1990. 384 p. (in Russian)
17. Savin G.I. Sistemnoe modelirovanie slozhnykh protsessov [System modelling of complex processes]. Moscow. Finansy i statistika = Publisher "Finance and Statistics". 2000. 276 p. (in Russian)
18. Samarskij A.A. Matematicheskoe modelirovanie i vychislitel'nyj eksperiment [Mathematical modelling and computational experiment] // Vestnik AN SSSR = Bulletin of the USSR Academy of Sciences. 1979. № 5. Pp. 38–49. (in Russian)
19. Samarskij A.A., Mikhajlov A.P. Matematicheskoe modelirovanie. Idei, metody, primery [Mathematical modelling: ideas, methods, examples]. Moscow. Fizmatlit. 2001. 320 p. (in Russian)
20. Sardanashvili G.A. Sovremennye metody teorii polya. 1. Geometriya i klassicheskie polya [Modern methods on the field theory. 1. Geometry and classic fields]. Moscow. URSS. 1996. 224 p. (in Russian)

21. Tamura I. Topologiya sloenij [Topology of foliations]. Moscow. Mir. 1979. 317 p. (in Russian)
22. Terskov I.A., Terskova M.I. Rost odnovozrastnykh drevostoev [Growth of even-aged stands]. Novosibirsk. Nauka= Science. 1980. 208 p. (in Russian)
23. Udalov V.S., Kolobov O.A. Sistema «TSentr – Periferiya» v sovremennom politicheskom protsesse [The system "Center - Periphery" in a modern political process] // Vestnik Nizhegorodskogo un-ta im. N.I. Lobachevskogo = Bulletin of Nizhny Novgorod University N.I. Lobachevsky. 2011. № 1 (2). Pp. 297–301. (in Russian)
24. Urmantsev YU.A. Obshchaya teoriya sistem: sostoyanie, prilozhenie i perspektivy razvitiya [General systems theory: the state, application and prospects of development] // Sistema. Simmetriya. Garmoniya = System. Symmetry. Harmony. 1988. Pp. 38–130. (in Russian)
25. Finikov S.P. Proektivno-differentsial'naya geometriya [Projective-differential geometry]. Moscow. Izdatel'stvo «KomKniga» = Publishing House "ComBook". 2006. 264 p. (in Russian)
26. Cherkashin A.K. Logicheskie aspekty v reshenii teoreticheskikh problem v geografii // Metodologicheskie problemy konkretnykh nauk [Logical aspects in the decision of theoretical problems in geography // Methodological problems of concrete sciences.]. Novosibirsk. Nauka = Science. 1984. Pp.149–160. (in Russian)
27. Cherkashin A.K. Polisistemnyj analiz i sintez [Polysystem analysis and synthesis]. Novosibirsk. Nauka = Science. 1997. 502 p. (in Russian)
28. Cherkashin A.K. Polisistemnoe modelirovanie [Polysystem modelling]. Novosibirsk. Nauka = Science. 2005. 280 p. (in Russian)
29. Cherkashin A.K. Polisistemnye issledovaniya razvitiya teoreticheskoy geografii [Polysystem research of theoretical geography development] // Geografiya i prirodnye resursy = Geography and natural resources. № 3. 2007. Pp. 27–37. (in Russian)
30. Cherkashin A. K. Gomologiya i gomotopiya v matematike i matematicheskom modelirovanii [Homology and homotopy in mathematics and mathematical modeling] // Gomologiya i gomotopiya geograficheskikh system = Homology and homotopy of the geographical systems. Novosibirsk. Akademicheskoe izdatel'stvo «Geo» = Academic publishing house "Geo". 2009. Pp. 47–102. (in Russian)
31. Cherkashin A.K. Modeli i metody analiza territorial'noj organizatsii obshchestva [Models and methods of analysis of society territorial organization] // Regional'nye issledovaniya = Regional researches. 2016. № 1 (51). Pp. 23–36. (in Russian)
32. Cherkashin A.K. Matematicheskie osnovaniya sinteza znaniy mezhdistsiplinarnykh issledovaniy sotsial'no-ekonomicheskikh yavlenij [Mathematical bases of knowledge synthesis of interdisciplinary researches of the socio-economic phenomena] // ZHurnal ekonomicheskoy teorii = Journal of economic theory. № 3. 2017. Pp. 108–124. (in Russian)
33. Cherkashin A.K., Krasnoshtanova N.E. Modelirovanie otsenki riska khozyajstvennoj deyatel'nosti v rajonakh novogo neftegazovogo osvoeniya [Modelling of risk estimation on economic activity in the districts of the new oil and gas development] // Problemy analiza riska = Problems of risk analysis. 2015. № 6. Pp. 21–29. (in Russian)
34. Cherkashin A.K., Myadzelets A.V. KHarakterizatsiya razvitiya regional'noj ekonomiki s uchetom makroekonomicheskikh faktorov i uslovij [Characterizing regional economy development taking into account macroeconomic factors and conditions] // Ekonomika i

- matematicheskie metody = Economy and mathematical methods. 2017. V.53. № 4. Pp. 13–25. (in Russian)
35. Cherkashin A.K. Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and Society // Mathematical modelling of natural phenomena. 2009. V.4. № 5. Pp. 4–20.
36. Borgatti S.P., Everett M.G. Models of core/periphery structures // Social Networks. 1999. V.21. Pp. 375–395.
37. Dahl M. An brief introduction to Finsler geometry. 2006. Available at: <https://math.aalto.fi/~fdahl/fmsler/fmsler.pdf> (accessed 25.03.2019)
38. Lawson H.B. Foliations // Bull. Amer. Math. Soc., 1974. V.80. N 3. Pp. 369–418.
39. Lumer H. The dimentions and interrelationship of the Relative Growth Constants // The American Naturalist. V. 73. № 747. 1939. Pp. 339–346.
40. Richardson B.C., Joscelyn K.B., Saalberg J.H. Limitations on the use of mathematical models in transportation policy analysis // Transportation research, policy analysis studies. Report Number UM-HSRI-79-46. UMI Research Press. 1979. 15 p. Available at: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/509/43459.0001.001.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (accessed 25.03.2019)
41. Strehler B.L., Mildvan A.S. General Theory of mortality and aging // Science. V.132. № 418. 1960. Pp. 14–21.

**ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЭТАПНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В МОДЕЛИ
ПОТОКОРАСИРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ БАЛАНСОВОЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЭС**

Якубовский Дмитрий Викторович

Аспирант, инженер, e-mail: dmitrii_iakubovskii@isem.irk.ru

Крунейёв Дмитрий Сергеевич

К.т.н., с.н.с., e-mail: krupenev@isem.irk.ru

Бояркин Денис Александрович

Аспирант, инженер, e-mail: denisboyarkin@isem.irk.ru

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

664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, Иркутский национальный исследовательский
технический университет 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83

Аннотация. Постоянные изменения и развитие электроэнергетических систем ведет к их усложнению и укрупнению. В связи с этим, существующие модели и программные комплексы, позволяющие рассчитывать надежность таких систем, могут работать неэффективно с точки зрения времени расчета, точности и адекватности результатов. Для получения объективной информации был проведен анализ ряда существующих моделей минимизации дефицита мощности при решении задач оценки балансовой надежности. В материалах данной статьи отражены результаты исследований моделей на наличие физически неверного распределения перетоков мощности между узлами, наличия двусторонних перетоков, доказано существование множества оптимальных решений, протестирован существующий подход, в котором учитывается адекватное распределение перетоков мощности. В качестве решения вышеописанных проблем были предложены дополнительные ограничения по перетокам, а также двухэтапный способ оптимизации потокораспределения, что в конечном итоге разрешило все найденные проблемы.

Ключевые слова: надежность, минимизация дефицита мощности, двухэтапная модель потокораспределения, методы оптимизации.

Цитирование: Якубовский Д.В., Крупенев Д.С., Бояркин Д.А. Применение двухэтапной оптимизации в модели потокораспределения при оценке балансовой надёжности ЭЭС // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 85–95. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-07

Введение. Электроэнергетика является одной из базовых отраслей для благополучного развития и функционирования экономики и должна отвечать требованиям потребителей электроэнергии по обеспечению надежности электроснабжения. Надежность – важное комплексное свойство электроэнергетической системы (ЭЭС), заключающееся в способности поставлять электроэнергию потребителям в нужном объеме, в нужное время и требуемого качества. Для обеспечения необходимого уровня надежности ЭЭС на этапе планирования развития и ее непосредственной работы, требуется своевременно оценивать

надежность ЭЭС и применять корректировки по управляющим воздействиям и планам ввода новых и вывода устаревших элементов системы.

Текущая ситуация такова, что по мере развития ЭЭС происходит укрупнение систем, растет количество генерирующих и связующих элементов ЭЭС. Это, в свою очередь, диктует требования к развитию вычислительных инструментов оценки надёжности ЭЭС, так как тенденции, изложенные выше, приводят к снижению вычислительной эффективности (в рамках затрачиваемого времени и достоверности расчетов) в процессе оценки надежности ЭЭС из-за использования «устаревших» методов и алгоритмов.

Существует ряд программно-вычислительных комплексов (ПВК) оценки балансовой надёжности ЭЭС. Модель «MEXICO» (EDF, Франция) [9, 7], модель «SECRET» (ENEL, Италия) [9, 5], Модель «COMREL» (University of Saskatchewan, Канада) [12, 6], Модель «ПОТОК-3» (СЭИ СО РАН) [3], однако данные модели были выведены из дальнейшей эксплуатации и на данный момент не поддерживаются. Стоит отметить, что тематика оценки балансовой надёжности остается актуальной и развивающейся, поэтому продолжают поддерживаться, развиваться, приобретать популярность и использоваться для оценки в современных энергосистемах такие модели и разработки, как: GE «MARS» [10], GridView [13], MARELI [11], PLEXOS [13], модель ОРИОН / ОРИОН-М (Коми научный центр) [4], модель ЯНТАРЬ (ИСЭМ СО РАН) [2].

Необходимо заметить, что в большинстве описанных ПВК используется методика, основанная на методе Монте-Карло [2]. В рамках данной методики, основанной на методе Монте-Карло, используются различные математические модели оптимального потокораспределения ЭЭС с отличающимися постановками и методами решения [14]. Методика оценки балансовой надёжности ЭЭС на основании метода Монте-Карло включает в себя три основных блока:

1) Вероятностный блок, в котором проводится формирование состояний ЭЭС со случайным образом выключенными или включенными в работу элементами.

2) Блок расчета дефицита мощности, в котором осуществляется минимизация дефицита мощности для каждого сформированного состояния ЭЭС.

3) Блок вычисления показателей надёжности ЭЭС, в котором обрабатывается и анализируется вся накопленная информация (результат работы первых блоков) и вычисляются такие показатели балансовой надёжности, как: вероятность безотказной (бездефицитной) работы, математическое ожидание (м.о.) дефицита мощности в ЭЭС, м.о. недоотпуска электроэнергии и др.

Основой рассматриваемой методики является второй блок, отвечающий за расчет дефицита мощности состояний ЭЭС. Качество результатов, в том числе скорость и точность расчета, возможность решения задач с растущим количеством переменных, зависит от применяемого метода оптимизации и правильности математической модели. В конечном итоге, даже минимальные затруднения или задержки в вычислениях приводят к увеличению времени, затрачиваемого на решение всей задачи. Таким образом, необходимо стремиться к минимальному времени решения задачи минимизации дефицита мощности ЭЭС.

На сегодняшний день также рассматривается недавно разработанный программно-вычислительный комплекс «Надежность» в котором применяется вышеописанная методика и проводятся численные эксперименты разрабатываемых авторами подходов. В рамках

данного ПВК исследуются различные методы оптимизации с целью оценки эффективности, а также выявления методов, способных решать задачи с большим количеством переменных.

В данной статье основное внимание уделяется рассмотрению модели минимизации дефицита мощности, в которой учитываются квадратичные потери мощности в связях, соответствие данной модели реальным физическим процессам, применение различных подходов и методов оптимизации, а именно: совокупности метода штрафных функций и метода градиентного спуска.

Постановка задачи. Задача минимизации дефицита мощности формулируется следующим образом: для известных значений работоспособных генераторных мощностей, требуемых уровней нагрузок потребителей, пропускных способностей связей ЭЭС и коэффициентов потерь мощности в связях ЭЭС необходимо определить оптимальное потокораспределение в ЭЭС [2]. Существует несколько видов моделей минимизации дефицита мощности, в данной статье будут рассмотрены применяемые модели. Далее представлена линейная постановка задачи:

Математически, проблема формулируется следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i) \rightarrow \min, \quad (1)$$

при соблюдении балансовых ограничений:

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

А также ограничений на оптимизируемые переменные:

$$0 \leq y_i \leq \bar{y}_i, i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$0 \leq x_i \leq \bar{x}_i, i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

$$0 \leq z_{ij} \leq \bar{z}_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, \quad (5)$$

$$0 \leq z_{ji} \leq \bar{z}_{ji}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, \quad (6)$$

где: x_i - используемая мощность (МВт) в узле i , \bar{x}_i - располагаемая генерирующая мощность (МВт) в узле i , y_i - покрываемая в узле i нагрузка (МВт), \bar{y}_i - величина нагрузки в узле i (МВт), z_{ij} - поток мощности из узла i в узел j (МВт), \bar{z}_{ij} - пропускная способность ЛЭП между узлами i и j (МВт), z_{ji} - поток мощности из узла j в узел i (МВт), \bar{z}_{ji} - пропускная способность ЛЭП между узлами j и i (МВт) a_{ji} - заданные положительные коэффициенты удельных потерь мощности при ее передаче из узла j в узел i , $j \neq i$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$.

Рассмотренная модель (1-6) является распространённой моделью потокораспределения в области оценки балансовой надежности, решение которой проводится путем минимизации дефицита мощности (1). Модель (1-6) представляет собой транспортную задачу. Для решения представленной задачи оптимизации, ввиду ее относительной простоты, в основном используется симплекс метод и двойственный симплекс метод в их разных вариациях. Однако, в [2] существует обоснованный вывод, что модель, где потери мощности зависят от квадрата передаваемой мощности, является более адекватной моделью. Для этого в модели (1-6) используются модифицированные балансовые ограничения, где заменены ограничения вида (2) на ограничения, представленные ниже:

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji}z_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Таким образом, поставленную задачу можно представить в двух формах – задачи линейного и нелинейного программирования. Вид задачи строго зависит от используемых балансовых ограничений формул (2), (7). Для решения задачи нелинейного программирования можно использовать различные методы условной и безусловной оптимизации. Однако, данную задачу невозможно решить стандартными методами безусловной оптимизации ввиду наличия различных ограничений типа равенств и неравенств, для этого требуется преобразовать целевую функцию и все ограничения в виде единой целевой функции. Например, для решения задачи в нелинейной постановке в комплексе ЯНТАРЬ использовались метод Лагранжа и различные вариации метода внутренних точек [1, 2].

В процессе исследований, представленные модели (1-6) и (1), (3-7) были протестированы с использованием тестовой схемы (ТС1). ТС1 представляет собой систему (рис. 1), состоящую из трёх узлов и трёх связей с топологией «кольцо». В качестве метода оптимизации применялась совокупность метода штрафных функций и метода градиентного спуска (ШФГС). В результате тестирования было получено решение, в котором оптимизированные переменные по перетокам z_{12} и z_{21} имели положительные значения, что говорит о несоответствии моделей (1-6) и (1), (3-7) физическим процессам.

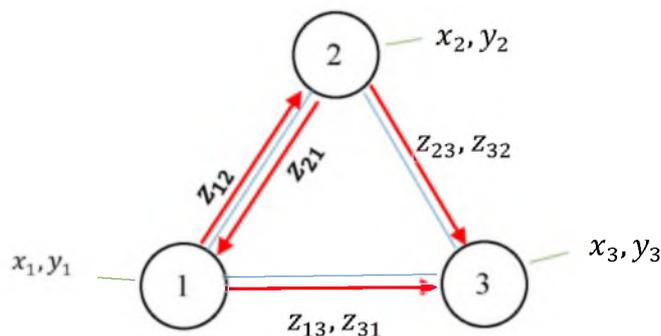


Рис. 1. Схематичное представление распределения электроэнергии

Найденное решение содержало данные о наличии задействованных потоков (табл. 1), мощность в которых распределялась в обе стороны одновременно, что не соответствует физической действительности, т.к. каждая линия электропередачи в каждом конкретном режиме может работать только в одном направлении. Это говорит о том, что только одна переменная из перетоков z_{12} или z_{21} , отвечающих за одну связь, может принимать значение, не равное 0.

Таблица 1. Результаты теста, модель (1) – (8).

	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{z}_{12}	\bar{z}_{21}	\bar{z}_{13}	\bar{z}_{31}	\bar{z}_{23}	\bar{z}_{32}	
	158	109	83	91	98	201	10	10	10	10	10	10	
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	z_{12}	z_{21}	z_{13}	z_{31}	z_{23}	z_{32}	a
ШФГС	103,94	105,21	83	91	98	102	3,94	1	10	0	10	0	0,05

Для устранения данной проблемы было сформулировано дополнительное ограничение на перетоки:

$$z_{ji} * z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, \quad (8)$$

Таким образом, ограничение (8) преобразовывает рассматриваемую задачу в корректную с точки зрения моделирования работы перетоков между узлами и изменяет модели (1-6) и (1), (3-9) к верным с точки зрения физики.

Модели минимизации дефицита мощности в ЭЭС. Задачи (1-6), (8) и (1), (3-8) представляют собой две математические модели минимизации дефицита мощности в ЭЭС, используемые при оценке балансовой надёжности. Модель (1-6), (8) учитывает линейные потери мощности при распределении потоков, а в модели (1), (3-8) квадратичные потери мощности при распределении потоков мощности. Однако, представленные модели имеют ряд проблем, которые в течение длительного времени решались путем модификации данных моделей и подходов к решению вышеописанных задач.

Одной из таких проблем является неправильное распределение мощности. Так, при тестировании моделей (1-6), (8) и (1), (3-8) возникает физически неверное распределение мощности по перетокам, при этом значение целевой функции определяется верно и является абсолютным минимумом. Например, вместо движения мощности по единственной связи в одном направлении (рис. 1), представленного переменной z_{13} , из профицитного узла 1 в дефицитный узел 3, задействуется дополнительный узел 2 и связи z_{12} и z_{23} , в чем нет прямой необходимости. Такое распределение «сквозь» дополнительный узел 2 расходует больше мощности т.к. при транспортировке учитываются потери во всех связях.

В качестве тестируемого примера использовалась ТС1, оптимизация проводилась ШФГС, модель (1-6), (8), дополнительно проводилось тестирование с помощью коммерческого решателя задач линейного программирования LP Solve [15].

Так же, исходя из полученных экспериментальных данных, можно предположить, что модель с квадратичными потерями, имеет множество оптимальных решений, что в свою очередь сказывается именно на распределении перетоков, при этом минимум целевой функции находится верно. Далее для подтверждения наличия множества решений были проведены дополнительные расчеты ТС1 с различными стартовыми точками, заданными для метода градиентного спуска. Результаты представлены ниже в (табл. 2), где номер в заголовке является порядковым номером эксперимента, первый столбец каждого эксперимента описывает значения параметров стартовой точки, во втором столбце представлены полученные решения.

Таблица 2. Результаты тестов мульти старта ШФГС

$a = 0,00009$			1	2	3	4	5					
\bar{x}_1	158	x_1	0	103,31	10	103.31	50	103.31	100	102.88	101	104.06
\bar{x}_2	109	x_2	0	105,68	10	105.686	50	105.68	100	106.11	108	104.939
\bar{x}_3	83	x_3	0	83	10	83	50	83	100	83	83	83
\bar{y}_1	91	y_1	0	91	10	91	50	91	100	91	91	91
\bar{y}_2	98	y_2	0	98	10	98	50	98	100	98	98	98
\bar{y}_3	201	y_3	0	103	10	103	50	103	100	103	102.99	103
\bar{z}_{12}	10	z_{12}	0	2,3156	10	2.315	50	2.3157	100	1.8873	10	3.06
\bar{z}_{21}	10	z_{21}	0	0	10	0	50	0	100	0	0	0
\bar{z}_{13}	10	z_{13}	0	10	10	10	50	10	100	10	10	10
\bar{z}_{31}	10	z_{31}	0	0	10	0	50	0	100	0	0	0
\bar{z}_{23}	10	z_{23}	0	10	10	10	50	10	100	10	0	10
\bar{z}_{32}	10	z_{32}	0	0	10	0	50	0	100	0	0	0

В табл. 2 можно увидеть существенные колебания значений генераторной мощности x_1 и x_2 , а также меняющееся результирующее значение перетока z_{12} . При этом значения покрываемой нагрузки y_1, y_2, y_3 - не меняются, что говорит о том, что был найден минимум функции. Таким образом, результаты показывают существование множества оптимальных решений. Для решения этих проблем, был предложен ряд модификаций, описанных в [1], в первую очередь путем изменения балансовых ограничений (2), (7) с ограничений-равенств на ограничения-неравенства. Данное ограничение предусматривало полное покрытие нагрузки в узле, а также предполагало максимально возможную отдачу мощности через перетоки, и их верного распределения.

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji}z_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, n. \quad (9)$$

Практическое применение данных ограничений на ТС1 показало, что физически неверное распределение перетоков осталось, однако значение перетока z_{12} снизилось, в тоже время значения генераторной мощности x_1, x_2, x_3 изменились и стали соответственно равными значениям $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$. Однако, это физически не естественно, так как излишки генераторной мощности заперты. Так в таблице 4 отражены результаты тестирования ТС1, с применением ШФГС для модели (1), (3-9).

Таблица 3. Результаты теста, модель (1), (3-9).

	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{z}_{12}	\bar{z}_{21}	\bar{z}_{13}	\bar{z}_{31}	\bar{z}_{23}	\bar{z}_{32}	
	158	109	83	91	98	201	10	10	10	10	10	10	
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	z_{12}	z_{21}	z_{13}	z_{31}	z_{23}	z_{32}	a
ШФГС	158	109	83	91	98	93	0,22	0	10	0	10	0	0,05
GAMS	101	108	83	91	98	93	0	0	10	0	10	0	0,05

В [1] был предложен теоретический подход, позволяющий получать оптимальные значения решаемой задачи с правильным распределением потоков. Суть подхода состояла в том, что для решения задачи должна применяться двухэтапная оптимизация. На первом этапе предполагается использовать модель (1), (3-9) и получить промежуточное решение, затем ввести новую переменную $\tilde{\Delta}_i, i = 1, \dots, n$.

$$\tilde{\Delta}_i = \tilde{x}_i - \tilde{y}_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji}\tilde{z}_{ji})\tilde{z}_{ji} - \sum_{j=1}^n \tilde{z}_{ij}, i = 1, \dots, n, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$x_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji}z_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} - \Delta_i = \tilde{y}_i, i = 1, \dots, n, \quad (12)$$

где $\tilde{\Delta}_i, \tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_{ji}$ – полученное оптимальное решение задачи первого этапа (10). На втором этапе решения задачи, значения \tilde{y}_i – фиксируются, а также вводится новая целевая функция вида (11) и балансовые ограничения вида (12), после чего задача решается относительно переменных $\Delta_i, x_i, z_{ji}, z_{ij}$ а модель принимает вид (3-9), (11-12), $j \neq i, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$.

Предложенные модификации были протестированы на ТС1, с применением ШФГС. Полученные на первом этапе решения, значения переменных, были представлены в таблице 4, однако, после реализации второго этапа оптимизации, результаты не изменились, что говорит о том, что данная модель отработала неверно.

Для решения вышеописанных проблем предлагаются следующие способы. Требуется применить двухэтапную оптимизацию иным образом: на первом этапе необходимо решить задачу минимизации дефицита мощности для модели (1), (3-9), такой подход обеспечит выпуклое множество допустимых решений. Далее полученные оптимальные решения относительно переменной y_1 необходимо зафиксировать и обозначить новую переменную как \tilde{y}_i . После чего перейти ко второму этапу решения, сформировав новую целевую функцию, которая предполагает собой минимизацию второй евклидовой нормы по перетокам:

$$\sum_{i=1}^n z_{ji}^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

а также модифицировать текущие балансовые ограничения (9) на балансовые ограничения, представленные ниже:

$$x_i - \tilde{y}_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji}z_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n. \quad (14)$$

Работоспособность данного подхода поочередной двухэтапной оптимизации и взаимодействия моделей (1), (3) – (9) и (4) – (9), (13), (14) была проверена на ТС1 с применением ШФГС. Результаты работы первого этапа отображены в (табл. 3), параметры, полученные в ходе теста второго этапа, указаны в таблице 4.

Таблица 4. Результаты теста, модель (4) – (9), (13), (14).

	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{z}_{12}	\bar{z}_{21}	\bar{z}_{13}	\bar{z}_{31}	\bar{z}_{23}	\bar{z}_{32}	
	158	109	83	91	98	93	10	10	10	10	10	10	
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	z_{12}	z_{21}	z_{13}	z_{31}	z_{23}	z_{32}	a
ШФГС	99,5	106,5	83,11	91	98	93	0	0	8,49	0	8,49	0	0,05
GAMS	101	108	83	91	98	93	0	0	10	0	10	0	0,05
	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{z}_{12}	\bar{z}_{21}	\bar{z}_{13}	\bar{z}_{31}	\bar{z}_{23}	\bar{z}_{32}	
	158	109	83	91	98	103	10	10	10	10	10	10	
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	z_{12}	z_{21}	z_{13}	z_{31}	z_{23}	z_{32}	a
ШФГС	100,98	107,98	83	91	98	102,98	0	0	9,98	0	9,98	0	0,00009
GAMS	101	108	83	91	98	103	0	0	10	0	10	0	0,00009

Из полученных результатов (табл. 4) видно, что параметры, полученные при использовании данной совокупности моделей, являются адекватными и близки к расчетным значениям коммерческого решателя GAMS. Для получения более достоверных и близких результатов была модифицирована целевая функция модели второго этапа (4) – (9), (13), (14), в данном случае представленная ниже:

$$\sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \min. \quad (15)$$

Целевая функция (15) предназначена для минимизации генерирующей мощности, что может дать положительный экономический эффект при генерации мощности и ее распределении. Модель (4) – (9), (13), (15) с данной целевой функцией предназначена для второго этапа оптимизации была протестирована на ТС1, где показала более близкие и достоверные результаты работы, чем при использовании модели (4) – (9), (13), (14). Результаты расчетов представлены в (табл. 7), где номер эксперимента для определенного столбца определяет положение значений ограничений и результатов.

Таблица 7. Результаты теста, модель (4) – (8), (10), (17), (19), ШФГС.

	1	2	3	4	5
\bar{x}_1	158,00	150,00	100,00	250,00	158,00
\bar{x}_2	109,00	150,00	150,00	140,00	109,00
\bar{x}_3	83,00	100,00	200,00	100,00	83,00
\bar{y}_1	91,00	150,00	100,00	150,00	91,00
\bar{y}_2	98,00	250,00	150,00	150,00	98,00
\bar{y}_3	201,00	150,00	100,00	200,00	201,00
\bar{z}_{12}	10,00	50,00	50,00	50,00	10,00
\bar{z}_{21}	10,00	50,00	50,00	50,00	11,00
\bar{z}_{13}	10,00	50,00	50,00	50,00	12,00
\bar{z}_{31}	10,00	50,00	50,00	50,00	13,00
\bar{z}_{23}	10,00	50,00	50,00	50,00	14,00
\bar{z}_{32}	10,00	50,00	50,00	50,00	15,00
a	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	1	2	3	4	5
x_1	100,43	150,00	100,00	168,58	100,43
x_2	107,43	150,00	150,00	140,01	107,43
x_3	83,02	100,00	100,00	100,01	83,02
y_1	91,00	150,00	100,00	150,00	91,00
y_2	98,00	150,00	150,00	145,00	98,00
y_3	93,00	100,00	100,01	105,00	93,00
z_{12}	0,00	0,00	0,00	9,29	0,00
z_{21}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
z_{13}	9,43	0,00	0,00	9,29	9,43
z_{31}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
z_{23}	9,43	0,00	0,00	0,00	9,43
z_{32}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Заключение. Задача оценки балансовой надежности ЭЭС является актуальной и её решение необходимо при планировании развития ЭЭС. При оценке балансовой надёжности ЭЭС методом Монте-Карло решается подзадача минимизации дефицита мощности. В статье был проведен анализ существующих моделей минимизации дефицита мощности. Исследование моделей показало их некоторую некорректность. На практическом примере было показано, что модели имеют множество оптимальных решений. Был проанализирован способ преобразования балансовых ограничений с целью формирования задачи с выпуклым множеством допустимых решений. Также были рассмотрены различные модификации моделей минимизации дефицита мощности. В результате исследований были предложены две рабочие модификации моделей минимизации дефицита мощности, включающие в

качестве второго этапа минимизацию второй евклидовой нормы по перетокам, а также минимизации генерирующей мощности.

Для решения поставленных задач был реализован метод градиентного спуска. Также были использованы коммерческие решатели GAMS (CONOPT) и LP Solve для получения эталонных решений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00234.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зоркальцев В.И., Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Модели оценки дефицита мощности электроэнергетических систем. Препринт. Иркутск. ИСЭМ СО РАН. 2000. С. 17–22
2. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Надежность систем электроэнергетики. Новосибирск. Наука. 2015. 224 с.
3. Колосок Г.В., Дикин И.И., Иванов В.В. Развитие процедур вероятностного моделирования при анализе надежности сложных ЭЭС // 9-я Всесоюзная научная конференция «Моделирование электроэнергетических систем». Тезисы докладов. Рига. 1987. С. 344-345.
4. Чукреев Ю.Я. Модели обеспечения надежности электроэнергетических систем. Сыктывкар. Коми НИЦ УрО РАН. 1995. 176 с
5. Bertoldi O., Scalcino S., Salvaderi L. Adequacy avaluation: an Application of ENEL's SECRET program to new Brunswick Power System. CIGRE Simposium "Electric Power System Reliability", Montreal, 1991, WG 38.03/01.
6. Billinton R., Li W. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods // Springer Science + Business Media, LLC. 1994.
7. Composite power system reliability analysis application to the New Brunswick Power Corporation System. The draft report of the CIGRE Symposium on Electric Power Systems Reliability. Sept., 16-18.1991. Montreal. Canada.
8. Deane J.P., Gracceva Francesco, Chiodi Alessandro, Gargiulo Maurizio, Gallachóir Brian P.Ó., Assessing power system security. A framework and a multi model approach. 2015. Pp. 283–297.
9. Dodu J.C., Merlin A. Recent improvement of the Mexico model for probabilistic planning studies // IPC Bussiness Press Electrical Power & Energy Systems. Vol. 1. No 1. EDF Франция. April 1979. 147 p.
10. McCalley J. Module PE.PAS.U21.5 Multiarea reliability analysis // Electrical & Computer Engineering. Iowa State University. USA. 81 p.
11. Review of the current status of tools and techniques for risk-based and probabilistic planning in power systems, Working Group 601 of Study Committee C4 // International Conference on Large High Voltage Electric Systems. March. 2010.
12. Salvaderi L., Bilinton R. A comparison between two fundamentally different approaches to composite system reliability // IEEE Trans. Pas Vol.104. no 12. December. 1985.
13. Simulate security-constrained unit commitment and economic dispatch in large-scale transmission networks // ABB GridView. 2016.
14. Wenyuan Li. Probabilistic Transmission System Planning // Wiley-IEEE Press. May 2011. 376 p.

**APPLICATION OF TWO-STAGE OPTIMIZATION
IN THE POWER FLOW DISTRIBUTING MODEL WHILE ASSESSING
THE ADEQUACY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS**

Dmitrii V. Iakubovskii

Graduate student, engineer, e-mail: dmitrii_iakubovskii@isem.irk.ru

Dmitriy S. Krupenev

Candidate of engineering sciences, senior researcher, e-mail: krupenev@isem.irk.ru

Denis A. Boyarkin

Graduate student, engineer, e-mail: denisboyarkin@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia,

Irkutsk National Research Technical University 83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia

Abstract. The continuous changes and development of electric power systems lead to their complication and enlargement. In this connection, existing models and software systems that allow to assessing the adequacy of such systems may work not effectively in terms of time, accuracy and adequacy of results. To obtain objective information, there was made analysis of a number of existing power shortage minimization models, while solving the problems of assessing the adequacy. The materials of this article reflect the results of model studies on the presence of physically incorrect distribution of power flows between nodes. The existing of bilateral flows and a number of optimal solutions has been proved. The current approach that taking into account the adequate distribution of power flows, also has been tested. As a solution to the problems described above, the additional constrains on overflows were proposed, as well as a two-stage method for optimizing the flow distribution, which ultimately solved all the problems found.

Keywords: assessing the adequacy, minimization of power shortage, two-stage flow distribution model, optimization methods.

References

1. Zorkaltsev V.I., Kovalev G.F., Lebedeva L.M. Modeli ocenki deficita moshnosti elektroenergeticheskikh sistem [Models for estimating the power capacity deficit of electric power systems] Preprint. Irkutsk. ESI SB RAS. 2000. Pp. 17–22. (in Russian)
2. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. Nadejnost sistem elektroenergetiki [Reliability of Electric Power Systems]. Novosibirsk. Nauka = Science. 2015. 224 p. (in Russian).
3. Kolosok G.V., Dikin I.I., Ivanov V.V. Razvitie procedur veroyatnostnogo modelirovaniz pri analize nadejnosti slojnih EES [Development of probabilistic simulation procedures in the analysis of reliability of complex EPS] // 9-ya Vsesoyuznaya nauchnaya konferentsiya «Modelirovaniye elektroenergeticheskikh sistem». Tezisy dokladov. = The 9th All-Union Scientific Conference "Electric Power Systems Modeling". Theses of reports. Riga. 1987. Pp. 344–345. (in Russian)

4. Chukreev Yu.Ya. Modeli obespecheniya nadejnosti electroenergeticheskikh sistem [Models for ensuring the reliability of electric power systems]. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the UrB RAS. 1995. 176 p. (in Russian)
5. Bertoldi O., Scalcino S., Salvaderi L. Adequacy avaluation: an Application of ENEL's SICRET program to new Brunswick Power System. CIGRE Simposium "Electric Power System Reliability", Montreal, 1991, WG 38.03/01.
6. Billinton R., Li W. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods // Springer Science + Business Media, LLC. 1994.
7. Composite power system reliability analysis application to the New Brunswick Power Corporation System. The draft report of the CIGRE Symposium on Electric Power Systems Reliability. Sept., 16-18.1991. Montreal. Canada.
8. Deane J.P., Gracceva Francesco, Chiodi Alessandro, Gargiulo Maurizio, Gallachóir Brian P.Ó., Assessing power system security. A framework and a multi model approach. 2015. Pp. 283–297.
9. Dodu J.C., Merlin A. Recent improvement of the Mexico model for probabilistic planning studies // IPC Bussiness Press Electrical Power & Energy Systems. Vol. 1. No 1. EDF Франция. April 1979. 147 p.
10. McCalley J. Module PE.PAS.U21.5 Multiarea reliability analysis // Electrical & Computer Engineering. Iowa State University. USA. 81 p.
11. Review of the current status of tools and techniques for risk-based and probabilistic planning in power systems, Working Group 601 of Study Committee C4 // International Conference on Large High Voltage Electric Systems. March. 2010.
12. Salvaderi L., Bilinton R. A comparison between two fundamentally different approaches to composite system reliability // IEEE Trans. Pas Vol.104. no 12. December. 1985.
13. Simulate security-constrained unit commitment and economic dispatch in large-scale transmission networks // ABB GridView. 2016.
14. Wenyuan Li. Probabilistic Transmission System Planning // Wiley-IEEE Press. May 2011. 376 p.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАПРОГРАММИРОВАНИЯ
В ИНТЕГРИРОВАННОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ**

Соколов Дмитрий Витальевич

К.т.н., с.н.с., e-mail: sokolov_dv@isem.irk.ru

Барахтенко Евгений Алексеевич

К.т.н., с.н.с., e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130

Аннотация. В статье представлен методический подход, позволяющий средствами метапрограммирования автоматизировать построение интегрированной графической среды для компьютерного моделирования трубопроводных систем энергетики различного типа. Автоматизированное построение интегрированной графической среды выполняется в рамках концепции Model-Driven Engineering на основе компьютерной модели трубопроводной системы и онтологий.

Ключевые слова: интегрированная графическая среда, автоматизация программирования, Model-Driven Engineering, метапрограммирование, рефлексивное программирование, онтология.

Цитирование: Соколов Д.В., Барахтенко Е.А. Применение метапрограммирования в интегрированной графической среде для моделирования трубопроводных систем энергетики // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 96–104. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-08

Введение. Эффективное решение задач проектирования и эксплуатации трубопроводных систем энергетики (ТПС) (тепло-, водо-, нефте-, газоснабжения и др.) невозможно без применения интегрированной графической среды. Эта среда представляет собой программную систему, позволяющую решать информационные (работа с компьютерной моделью ТПС и ее элементами на плане местности в интерактивном режиме), расчетные (решение инженерных задач) и аналитические (просмотр графиков, таблиц и результатов расчетов) задачи в рамках единого интерфейса пользователя.

Общность топологических свойств ТПС позволяет ставить задачу разработки единой программной системы, являющейся интегрированной графической средой для компьютерного моделирования ТПС различного типа. В проектных и эксплуатационных организациях применяется специализированное программное обеспечение, ориентированное на конкретный тип ТПС и определенные классы решаемых задач. В настоящее время отсутствует описание методических подходов к построению интегрированных графических сред, обладающих универсальностью и возможностью моделирования различных типов ТПС в рамках единой программной системы.

Высокая трудность поддержания в актуальном состоянии всего набора необходимых программных компонентов позволяет сделать вывод, что для реализации интегрированной графической среды необходимо привлечение парадигм программирования, ориентированных на автоматизацию этапов построения программного обеспечения (ПО).

Современные подходы к разработке ПО изложены в работах [4, 5, 15]. Принципы создания универсальных программных компонентов представлены в работе [15]. Общие принципы построения сложных программных систем рассматриваются в работах [10, 11]. В работах [9, 21] для автоматизации этапов построения программного обеспечения предлагается концепция Model-Driven Engineering (MDE). Концепция MDE представляет собой совокупность методических подходов к автоматизированному построению сложных программных систем на основе предварительно разработанных моделей [22]. В качестве универсального средства описания предметных областей предлагается язык UML [6, 7, 14]. В настоящее время разработаны подходы, где в качестве средства описания предметной области предлагаются онтологии [1, 2, 12, 16, 17]. Подходы к автоматизации этапов построения программного обеспечения, основанные на применении метапрограммирования, изложены в работах [9, 13, 21]. Рефлексивное программирование является одним из видов метапрограммирования и представляет собой расширение парадигмы объектно-ориентированного программирования [9, 13, 18]. Рефлексивное программирование позволяет выполнять операции, которые в рамках традиционного объектно-ориентированного программирования выполнить невозможно [9].

В статье предложен методический подход к автоматизированному построению интегрированной графической среды средствами метапрограммирования. На базе этого подхода реализована программная система, которая представляет собой программный прототип интегрированной графической среды для компьютерного моделирования ТПС различного типа.

1. Методический подход и его особенности. В результате проведенных авторами исследований предложен методический подход, в рамках которого объединены:

- концепция MDE;
- современные технологии метапрограммирования.

В рамках предлагаемого подхода MDE адаптирована к особенностям предметной области компьютерного моделирования ТПС, а автоматизированное построение программной системы выполняется на основе компьютерной модели ТПС и онтологий [3, 19, 20]. В процессе построения интегрированной графической среды используется система онтологий, состоящая из метаонтологии и трех прикладных онтологий (онтология ТПС, онтология задач и онтология ПО). Для долговременного хранения онтологий авторы отдали предпочтение формату XML, который является универсальным средством обмена данными между программными системами и предоставляет возможность организации хранения сложных (иерархических, сетевых) структур данных, а в современных платформах программирования существуют библиотеки, предназначенные для работы с этим форматом.

В настоящее время технологии метапрограммирования активно развиваются, и в рамках парадигмы объектно-ориентированного программирования развивается рефлексивное программирование, которое является основой предлагаемого методического подхода и применяется для автоматизированного построения интегрированной графической

среды. Рефлексивное программирование позволяет отслеживать структуру программной системы и динамически изменять состав программных компонентов во время ее работы.

Разработанный авторами методический подход включает:

- принципы автоматизированного построения интегрированной графической среды для компьютерного моделирования ТПС;
- архитектуру интегрированной графической среды, описывающую устройство программной системы, которая создается в автоматизированном режиме;
- методику автоматизированного построения программной системы на основе концепции MDE, рефлексивного программирования, онтологий и компьютерной модели ТПС.

Основные принципы автоматизированного построения интегрированной графической среды:

- Программная система, ориентированная на моделирование конкретной ТПС, строится в автоматизированном режиме в контексте решения задачи построения компьютерной модели этой ТПС (рис. 1).



Рис. 1. Иллюстрация принципа построения интегрированной графической среды

- Автоматизированное построение программной системы и ее адаптация к конкретным особенностям моделируемой ТПС выполняются средствами рефлексивного программирования.
- Для автоматизации этапов построения программной системы и информационного наполнения пользовательского интерфейса используются знания, хранение которых организовано в виде онтологий.
- Знания, описывающие общие для всех типов ТПС свойства, задачи и используемое для их решения ПО, сохраняются в виде онтологий, а конкретные особенности моделируемой ТПС описываются ее компьютерной моделью.

Авторами предложена архитектура интегрированной графической среды (рис. 2), которая включает следующие составляющие:

- Графическая подсистема, которая обеспечивает работу пользователя с активной графической моделью ТПС на плане местности, и позволяет ему просматривать данные в удобном для восприятия виде и вносить необходимые изменения.

- Инструментальная подсистема, которая обеспечивает решение следующих задач: создает необходимый графический вид меню, позволяя пользователю решать задачи, соответствующие типу моделируемой ТПС; создает и предоставляет пользователю панели инструментов для рисования, редактирования, изменения состояний элементов активной модели ТПС; формирует диалоговые окна для настройки отображения модели ТПС, занесения необходимой информации и параметров, влияющих на решение прикладных задач; создает панели инструментов для рисования элементов плана местности и городской застройки.
- Подсистема доступа к базам данных, которая обеспечивает организацию работы с различными базами данных (БД), применяемыми для хранения и многократного использования компьютерных моделей ТПС, исходных данных и результатов расчетов, данных об объектах городской застройки.

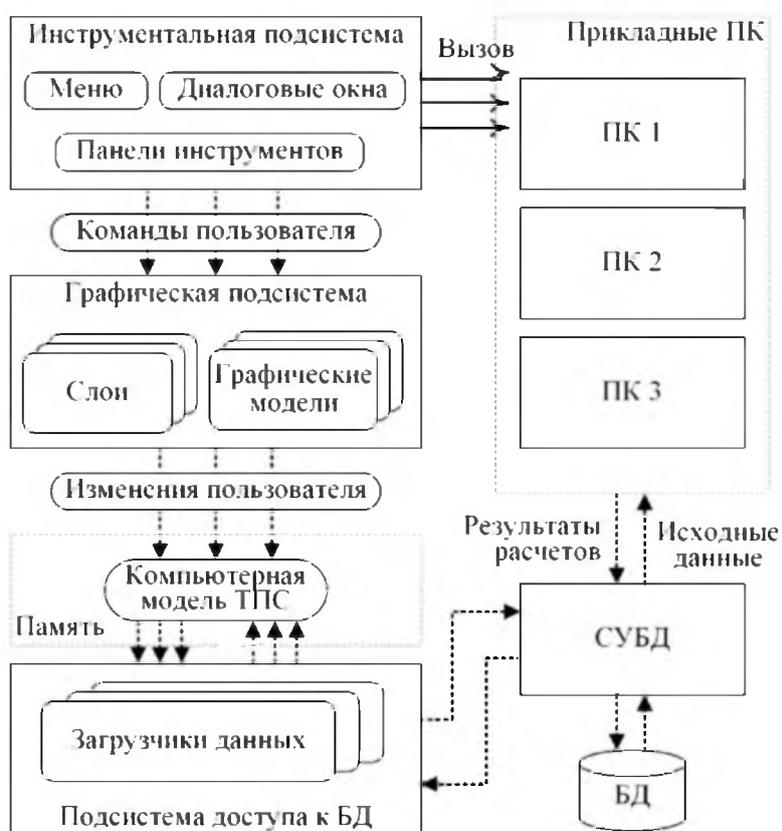


Рис. 2. Архитектура интегрированной графической среды

Представленная архитектура является описанием устройства программной системы, которая создается в автоматизированном режиме и реализует интегрированную графическую среду для компьютерного моделирования ТПС.

При реализации интегрированной графической среды в соответствии с предлагаемым методическим подходом авторы ориентируются только на свободное ПО. В качестве базового языка программирования используется Java, выбор которого обусловлен поддержкой современных технологий объектно-ориентированного, компонентного и функционального программирования, а также встроенной поддержкой рефлексивного программирования и других видов метапрограммирования [9]. Для работы с БД

используется СУБД Firebird, которая обладает возможностью многопользовательского доступа и переносимостью между различными операционными системами.

2. Методика автоматизированного построения. Согласно предложенной методике построение интегрированной графической среды в автоматизированном режиме выполняется в соответствии со следующим алгоритмом.

Шаг 1. Построение инструментальной подсистемы. На основе описания типа ТПС, соответствующего выбору пользователя, создаются элементы графического интерфейса и необходимые структуры данных.

Шаг 1.1. Формирование структур данных, описывающих состав элементов ТПС конкретного типа и их свойства.

Шаг 1.2. Создание главного меню графической среды, позволяющего пользователю решать задачи, соответствующие типу моделируемой ТПС.

Шаг 1.3. Загрузка в память графических изображений для создания элементов панелей инструментов на основе описания элементов ТПС в онтологии ТПС.

Шаг 1.4. Создание панелей инструментов, содержащих элементы графического интерфейса для работы с компьютерной моделью ТПС.

Шаг 1.5. Формирование структур данных, описывающих список возможного к установке в ТПС оборудования и набор моделей (графических и математических).

Шаг 1.6. Формирование структур данных, описывающих состав решаемых прикладных задач и используемого для их решения ПО.

Шаг 1.7. Формирование структур данных, описывающих список входных и выходных параметров для решаемых прикладных задач.

Шаг 2. Построение подсистемы доступа к базам данных. Компьютерные модели ТПС различных типов хранятся в БД, состав объектов которых соответствует составу элементов ТПС, их свойствам, набору используемого оборудования и его характеристикам. Доступ к этим моделям осуществляется через ориентированные на конкретный тип ТПС специализированные программные компоненты. Подключение этих компонентов выполняется в автоматизированном режиме, во время которого из онтологии ПО считывается описание программных компонентов, соответствующих типу моделируемой ТПС. Далее по описанию этих компонентов выполняется их интеграция в программную систему средствами рефлексивного программирования.

Шаг 3. Построение графической подсистемы. Основная идея, предлагаемая авторами, заключается в том, что графическая подсистема, отвечающая за отображение активной модели ТПС, строится динамически (в автоматизированном режиме), в ответ на действия пользователя, направленные на внесение изменений в компьютерную модель ТПС. В случае, когда пользователь создает новую модель ТПС определенного типа, интегрированная графическая среда создает базовый набор моделей элементов, соответствующих типу моделируемой ТПС. В случае, когда пользователь загружает ранее созданную модель ТПС, среда дополнительно к базовому набору моделей элементов ТПС подключает набор моделей элементов, соответствующий составу элементов моделируемой ТПС. Модель элемента (компонент-модель) представляет собой программный компонент, реализующий графическое изображение и набор алгоритмов, необходимых для обеспечения активности компьютерной модели ТПС (например, обработка действий пользователя мышью, проверка принадлежности точки области элемента, перемещение, масштабирование и др.). Однажды

подключенный к программной системе компонент-модель может быть многократно использован для представления элементов ТПС, тип и состояние которых соответствует этой модели.

3. Практическая реализация. Разработанный методический подход применен при реализации программной системы, которая представляет собой программный прототип интегрированной графической среды для компьютерного моделирования ТПС. Реализованный программный прототип ориентирован на работу с компьютерными моделями теплоснабжающих систем и позволяет создавать, вносить изменения и сохранять их в БД для многократного использования при решении прикладных задач.

Подсистемы интегрированной графической среды, отвечающие за создание инструментов графического интерфейса (инструментальной подсистемы), взаимодействие с БД (подсистемы доступа к базам данных) и работу с активной моделью ТПС (графической подсистемы), формируются в автоматизированном режиме с учетом особенностей конкретного типа моделируемой ТПС. Построение выполняется в соответствии с приведенной выше методикой.

На рис. 3 представлен вид главного окна интегрированной графической среды, которое содержит элементы интерфейса, формируемые инструментальной и графической подсистемами. Инструментальная подсистема обеспечивает работу следующих элементов

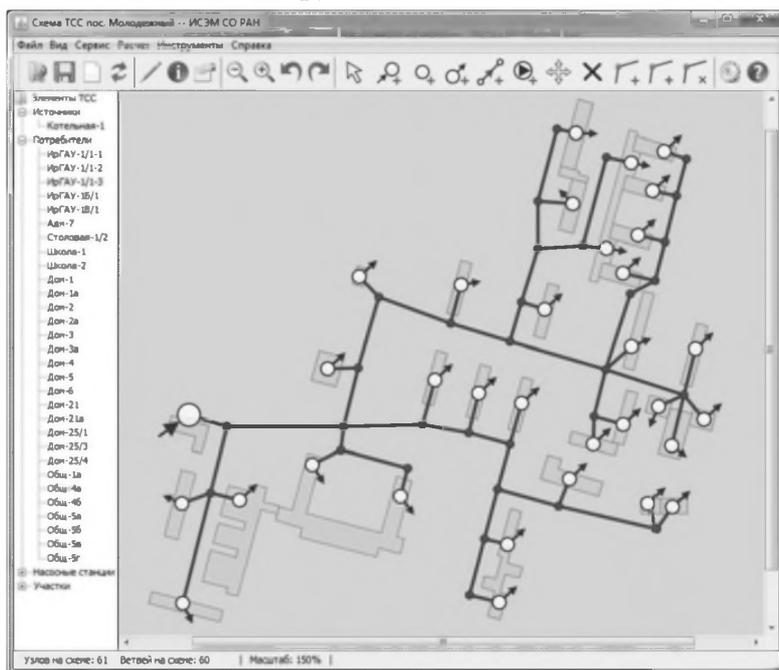


Рис. 3. Вид графического интерфейса интегрированной среды

главного окна интегрированной графической среды:

- главное меню, которое позволяет пользователю выполнить следующие действия: работать с файлом БД; управлять отображением модели ТПС; управлять видом рабочей области окна; решать прикладные задачи моделирования ТПС;
- панели инструментов, которые обеспечивают пользователю реализацию следующих функций: работы с файлом БД; управления отображением модели ТПС; управления видом рабочей области окна; работы с элементами активной графической модели

ТПС; работы с объектами городской застройки на плане местности;

- дерево схемы моделируемой ТПС для работы с ее элементами;
- строка состояния, которая отображает основные сведения о процессе моделирования ТПС.

Центральную часть главного окна занимает рабочая область, отвечающая за работу пользователя с активной графической моделью ТПС и объектами городской застройки на плане местности. За реализацию этой части пользовательского интерфейса отвечает

графическая подсистема, которая динамически адаптируется (формируется) к следующим действиям пользователя:

- загрузке в память данных, описывающих ранее созданную модель ТПС;
- созданию новой модели ТПС при выборе пользователем ее типа;
- изменениям, вносимым пользователем в компьютерную модель ТПС.

Заключение. Предложен авторский подход к автоматизированному построению интегрированной графической среды для компьютерного моделирования ТПС различного типа. Оригинальность этого подхода заключается в реализации следующих идей:

- Компьютерная модель ТПС определенного типа может быть представлена как совокупность графа, описывающего конфигурацию этой системы, и набора программных компонентов-моделей, описывающих свойства ее элементов.
- Автоматизированное построение программной системы, реализующей интегрированную графическую среду, выполняется на основе компьютерной модели ТПС и онтологий на базе концепции Model-Driven Engineering и рефлексивного программирования.

Авторами реализована программная система, которая представляет собой программный прототип интегрированной графической среды для компьютерного моделирования ТПС энергетики различного типа и назначения.

Предложенный авторами методический подход обладает универсальным характером и может быть использован в организациях, занимающихся разработкой ПО для компьютерного моделирования ТПС энергетики различного типа и назначения.

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-07-00948).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворожцова Т.Н., Скрипкин С.К. Использование онтологий при моделировании программного комплекса // Вычислительные технологии. 2008. т.13. ч.1. С. 376–381.
2. Ворожцова Т.Н., Скрипкин С.К. Онтологический подход к моделированию программного комплекса // Вестник ИрГТУ. 2006. №2(26). С. 72–78.
3. Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В. Разработка принципов построения интегрированной графической среды для компьютерного моделирования трубопроводных систем энергетики // Информационные технологии. 2018. №24. С. 313–320.
4. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. Addison-Wesley. 1999.
5. Booch G. Object-Oriented Analysis and Design with Applications. Addison-Wesley. 2007.
6. Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J. The Unified Software Development Process. Prentice Hall. 1999.
7. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. The Unified Modeling Language User Guide, 2nd edn. Addison-Wesley. 2005.
8. Brambilla M., Cabot J., Wimmer M. Model Driven Software Engineering in Practice. Synthesis Lectures on Software Engineering. Morgan & Claypool. 2012.
9. Forman I., Forman N. Java Reflection in Action. Manning Publications. 2005.
10. Fowler M., Parsons R. Domain-Specific Languages. Addison-Wesley. 2010.
11. Fowler M., Rice D., Foemmel M., Hieatt E., Mee R., Stafford R. Patterns of Enterprise Application Architecture. Addison-Wesley. 2002.

12. Goldman N.M. Ontology-oriented programming: Static typing for the inconsistent programmer, in 2nd Int. Conf. Semantic Web. Sanibel Island. 2003.
 13. Hazzard K., Bock J. Metaprogramming in .NET. Manning Publications. 2012.
 14. Larman C. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development, 3rd edn. Prentice Hall. 2004.
 15. Martin R.C. Agile Software Development: Principles, Patterns and Practices. Pearson Education. 2002.
 16. Pan J.Z., Staab S., Aßmann U., Ebert J., Zhao Y. Ontology-Driven Software Development. Springer-Verlag. 2013.
 17. Paulheim H. Ontology-based Application Integration. Springer-Verlag. 2011.
 18. Smith B.C. Procedural Reflection in Programming Languages, PhD Thesis. MIT. 1982.
 19. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V., Oshchepkova T.B. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: new methods and software for optimization of heat supply system parameters, in Sustaining Power Resources through Energy Optimization and Engineering Premier Reference Source. IGI Global. 2016. Pp. 76–101.
 20. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V. Use of Multilevel Modeling for Determining Optimal Parameters of Heat Supply Systems // Thermal Engineering. 2017. №64. Pp. 518–525.
 21. Štuikys V., Damaševičius R. Meta-Programming and Model-Driven Meta-Program Development. Springer-Verlag. 2013.
 22. Volter M., Stahl T., Bettin J., Haase A., Helsen S. Model-Driven Software Development: Technology, Engineering, Management. Wiley. 2006.
-

UDK 004.415.2

**AUTOMATION OF THE INTEGRATED GRAPHICAL ENVIRONMENT
CONSTRUCTION FOR COMPUTER MODELING OF ENERGY PIPELINE SYSTEMS**

Dmitry V. Sokolov

PhD., Senior Researcher, e-mail: sokolov_dv@isem.irk.ru

Evgeny A. Barakhtenko

PhD., Senior Researcher, e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper presents a methodological approach to automated construction of integrated graphical environment for computer modeling of pipeline systems of various types. Automated construction of the integrated environment is performed using a computer model of the pipeline system and ontologies based on the Model Driven Engineering concept and reflection programming.

Keywords: integrated graphical environment, automation of programming, Model-Driven Engineering, metaprogramming, reflective programming, ontology.

References

1. Vorozhtsova T.N., Skripkin S.K. Ispol'zovaniye ontologiy pri modelirovani programmnogo kompleksa [The use of ontologies in modeling software] // Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies. 2008. vol.13. part I. Pp. 376–381. (in Russian)
2. Vorozhtsova T.N., Skripkin S.K. [The ontological approach to software modeling] // Vestnik IrGTU = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2006. No. 2(26). Pp. 72–78. (in Russian)
3. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V. Razrabotka printsipov postroyeniya integrirovannoy graficheskoy sredy dlya komp'yuternogo modelirovaniya truboprovodnykh sistem energetiki [Development of principles for the creation of an integrated graphical environment for computer modeling of energy pipeline systems] // Informatsionnyye tekhnologii = Information technologies. 2018. vol. 24. Pp. 313–320. (in Russian)
4. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. Addison-Wesley. 1999.
5. Booch G. Object-Oriented Analysis and Design with Applications. Addison-Wesley. 2007.
6. Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J. The Unified Software Development Process. Prentice Hall. 1999.
7. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. The Unified Modeling Language User Guide, 2nd edn. Addison-Wesley. 2005.
8. Brambilla M., Cabot J., Wimmer M. Model Driven Software Engineering in Practice. Synthesis Lectures on Software Engineering. Morgan & Claypool. 2012.
9. Forman I., Forman N. Java Reflection in Action. Manning Publications. 2005.
10. Fowler M., Parsons R. Domain-Specific Languages. Addison-Wesley. 2010.
11. Fowler M., Rice D., Foemmel M., Hieatt E., Mee R., Stafford R. Patterns of Enterprise Application Architecture. Addison-Wesley. 2002.
12. Goldman N.M. Ontology-oriented programming: Static typing for the inconsistent programmer, in 2nd Int. Conf. Semantic Web. Sanibel Island. 2003.
13. Hazzard K., Bock J. Metaprogramming in .NET. Manning Publications. 2012.
14. Larman C. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development, 3rd edn. Prentice Hall. 2004.
15. Martin R.C. Agile Software Development: Principles, Patterns and Practices. Pearson Education. 2002.
16. Pan J.Z., Staab S., Aßmann U., Ebert J., Zhao Y. Ontology-Driven Software Development. Springer-Verlag. 2013.
17. Paulheim H. Ontology-based Application Integration. Springer-Verlag. 2011.
18. Smith B.C. Procedural Reflection in Programming Languages, PhD Thesis. MIT. 1982.
19. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V., Oshchepkova T.B. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: new methods and software for optimization of heat supply system parameters, in Sustaining Power Resources through Energy Optimization and Engineering Premier Reference Source. IGI Global. 2016. Pp. 76–101.
20. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V. Use of Multilevel Modeling for Determining Optimal Parameters of Heat Supply Systems // Thermal Engineering. 2017. №64. Pp. 518–525.
21. Štuikys V., Damaševičius R. Meta-Programming and Model-Driven Meta-Program Development. Springer-Verlag. 2013.
22. Volter M., Stahl T., Bettin J., Haase A., Helsen S. Model-Driven Software Development: Technology, Engineering, Management. Wiley. 2006.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В ВИДЕ ВЕБ-СЕРВИСОВ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ¹

Федоров Роман Константинович

К.т.н., в.н.с., e-mail: dstu@icc.ru

Шумилов Александр Сергеевич

Аспирант, e-mail: dstu@icc.ru

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского
отделения Российской Академии наук, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134

Аннотация. В современном мире информационных технологий активно развивается аппаратное обеспечение и компонентная база интернета вещей, а также сервисо-ориентированный подход к выполнению вычислений. В данной работе предлагается подход представления устройств в виде веб-сервисов с последующим заданием их взаимодействия при помощи системы выполнения композиций сервисов в распределенной гетерогенной среде, разработанной в ИДСТУ СО РАН.

Данный подход апробирован при автоматизации управления офисным помещением и находится в процессе расширения своих возможностей.

Ключевые слова: интернет вещей, сервисо-ориентированный подход, композиции сервисов и устройств

Цитирование: Федоров Р.К., Шумилов А.С. Представление устройств интернета вещей в виде веб-сервисов и автоматизация их взаимодействия // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 105–113. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-09

Введение. В современном мире информационных технологий активно развивается область интернета вещей – концепции, представляющей различные электронные устройства в качестве полноценных участников сети, взаимодействующих друг с другом. Доступ к участникам интернета вещей осуществляется посредством специальных программных интерфейсов, доступных по сети. Устройства могут быть как сложными электронными приборами, задействованными, например, в промышленном производстве и управлении городским автомобильным трафиком, так и элементарными электронными компонентами, например, термометрами и реле.

Наравне с увеличением количества различных устройств, подключенных к сети интернет, растет разнообразие различных интерфейсов, которые используются для получения доступа к устройствам. Используются как стандартные интерфейсы сервисов (WSDL, WPS), так и специально разработанные API, специфичные для каждого устройства в отдельности. Таким образом, существует проблема получения доступа и управления большим количеством устройств, имеющих разнообразные интерфейсы.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-00411_а, 16-07-00554_а, 17-57-44006-монг, 17-47-380007-р-а, 18-07-00758-а, Программы Президиума РАН №27 и Интеграционных программ СО РАН №77, ИИЦ СО РАН №4.1, а также ЦКП ИИВС ИРПОК)

Увеличивается количество устройств, подключенных к глобальной сети, но имеющих стандартные настройки безопасности, подверженные атакам извне, что определяет проблему контроля доступа к устройствам. В данный момент существует большое количество поисковых систем, специализирующихся на получении информации об умных устройствах с настройками безопасности по умолчанию.

Как результат появления множества устройств, решающих разнообразные задачи, существует проблема настройки их взаимодействия. Данная работа предлагает и реализовывает подход, когда умные устройства представляются в виде веб-сервисов, что позволяет абстрагироваться от конкретных интерфейсов устройств, настраивать к ним доступ и организовывать взаимодействие устройств в виде композиции сервисов, при этом используется разработанная в ИДСТУ СО РАН программная система выполнения композиций сервисов в гетерогенных распределенных средах для организации взаимодействия между устройствами.

1.1. Рассматриваемые устройства. Представленная работа фокусируется на устройствах интернета вещей. Одним из наиболее популярных типов устройств по их назначению являются устройства для организации умного дома. Различного рода датчики температуры, влажности, света, реле включения и выключения электропитания, герконы, элементы систем сигнализации вторжения становятся все более доступными и популярными среди пользователей. В целях упрощения построения взаимодействия между элементами производители устройств обычно выпускают программно-аппаратные средства, предоставляющие интуитивный интерфейс для объединения устройств и настройки их работы. Различные производители как создают свои собственные закрытые интерфейсы взаимодействия с устройствами [7], что заметно ограничивает конечных пользователей при выборе способа организации их взаимодействия, так и предоставляют открытый доступ к своим устройствам с использованием существующих открытых стандартов [13, 10].

Другим типом устройств по их назначению являются устройства для промышленных предприятий и организаций. По аналогии с системами умных домов существуют системы умных городов, решающих гораздо более сложные задачи и требующие гораздо более высокой квалификации пользователей, но решающих те же самые задачи, что и умные дома – оптимизация ресурсов (в том числе человеко-часов) при совершении повседневной деятельности. Примерами использования системы умных городов является оптимизация светофоров для управления плотностью автомобильного трафика [5], управление грузопассажирской инфраструктурой для обеспечения максимально быстрой и предсказуемой скорости доставки [9]. Принципы автоматизации и оптимизации деятельности посредством интернета вещей также применимы к промышленности (управления промышленными предприятиями), экологии (отслеживание состояния окружающей среды, предупреждение и смягчение последствий природных катаклизмов), сельскому хозяйству (автоматизированные системы полива, подачи удобрений в зависимости от параметров почвы) [14, 4].

Устройства, участвующие в интернете вещей, в основном используют сетевой протокол TCP/IP. В случае проводного соединения самым распространенным способом является стандартная витая пара. В случае беспроводного соединения распространено как использование Wi-Fi и Bluetooth, так и специализированных беспроводных стандартов с пониженным потреблением энергии ZigBee [15] и Z-Wave [11]. В данной работе

рассматриваются устройства, подсоединенные к сети интернет в проводном и беспроводном режиме.

1.2. Композиции устройств. Композицией называется набор взаимодействий различных устройств, причем набор задействованных устройств в рамках композиции может различаться при запусках в зависимости от промежуточных результатов вызова устройств внутри композиции. Условно способы задания композиций устройств можно разделить на две категории – графический и текстовый. Графический способ задания предполагает использование графических примитивов для определения взаимодействий и больше распространен в потребительских решениях. Текстовый способ предполагает непосредственное программирование взаимодействия между устройствами посредством использования специального API.

Графический способ задания используют наиболее популярные потребительские программно-аппаратные системы для управления устройствами, например, программные решения от Losant [12] и Flowhub [6]. Одним из наиболее популярных программных средств для задания композиций устройств в текстовом формате является платформа Node-RED [8].

В ИДСТУ СО РАН была разработана программная система, позволяющая задавать композиции сервисов в гетерогенных распределенных средах с помощью языка программирования JavaScript. Данный подход к заданию композиций позволяет обрабатывать промежуточные результаты выполнения сервисов стандартными средствами языка программирования или с помощью сторонних библиотек. Планирование выполнения сервисов, участвующих в композициях, а также обработка изменений в вычислительной среде (включение и отключение узлов, меняющийся уровень загруженности вычислительных узлов, неполадки с сетевым оборудованием и т.д.) производится автоматически без участия пользователя.

Таким образом, данная работа предлагает и реализует подход к заданию взаимодействий между устройствами с использованием программной системы выполнения композиций сервисов в гетерогенной распределенной вычислительной среде. Предполагается, что устройства имеют веб-интерфейс, реализованный в виде веб-сервиса или REST API.

2.1. Программная система выполнения композиций распределенных сервисов.

На рис. 1 приведена схема программной системы выполнения композиций распределенных сервисов, реализованной в тесном взаимодействии с Геопорталом – многопользовательским веб-приложением, предоставляющим различные инструменты по обработке и визуализации пространственных данных [1]. Основные модули рассматриваемой программной системы для работы с композициями сервисов рассмотрены ниже. В рамках Геопортала композиции сервисов могут называться сценариями сервисов.

Система хранения данных (СХД) предоставляет каждому зарегистрированному пользователю определенный объем дискового пространства, который может быть использован для хранения входных или результирующих параметров запускаемых сервисов и композиций сервисов. Доступ к дисковому пространству предоставляется с помощью веб-интерфейса, который позволяет загружать и скачивать файлы, а также организовывать доступное дисковое пространство по аналогии с интерфейсами файловых систем персональных компьютеров.

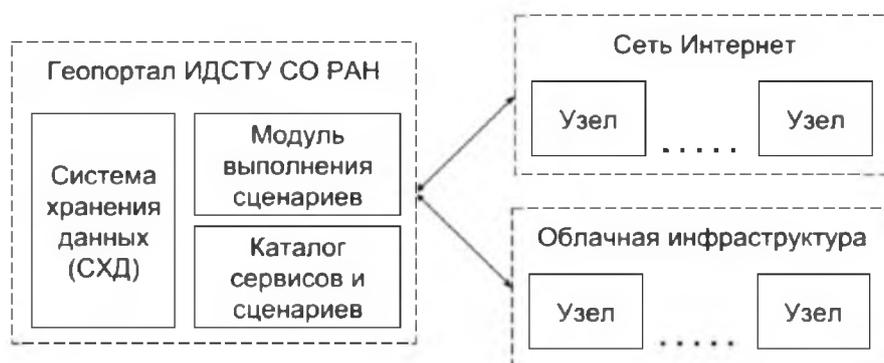


Рис. 1. Программная система выполнения композиций распределенных сервисов

Каталог сервисов и сценариев содержит информацию о зарегистрированных в системе сервисах и сценариях. Для того, чтобы вызвать сервис с помощью рассматриваемой системы, сначала необходимо произвести его регистрацию на Геопортале. Регистрация подразумевает под собой указание сетевого расположения сервиса, описание его входных и выходных параметров, а также его названия и описания. При описании параметров сервиса пользователь может определить элементы управления, которые будут использованы для ввода данных – например, если один из параметров сервиса является файлом, то элемент управления «выбор файла» перед запуском сервиса позволит загрузить или выбрать файл, находящийся на предоставленном пользователю дисковом пространстве. При регистрации сервиса пользователь должен указать как минимум один вычислительный узел, на котором развернут вычислительный сервис. Если указаны несколько вычислительных узлов, на которых развернут сервис, то решение о назначении вызова сервиса на определенный узел будет принято модулем выполнения сценариев.

Модуль выполнения сценариев осуществляет запуск и отслеживание выполнения сценариев и отдельных сервисов [2]. Данный модуль на вход принимает код сценария и, проанализировав его, автоматически составляет план выполнения сервисов, вызываемых в сценарии. Автоматическое распараллеливание выполнения сценариев вычислительных сервисов уменьшает время выполнения сценариев. Сценарии сервисов и устройств реализуются с помощью языка программирования JavaScript – сервисы и устройства представляются в виде стандартных функций, принимающих на вход параметры запуска сервисов и асинхронно возвращающие результаты выполнения. Особенности представления и вызова устройств будут рассмотрены ниже.

Вычислительные узлы, на которых развернуты вычислительные сервисы, могут быть расположены как в локальной облачной инфраструктуре, так и в любой точке сети Интернет – при регистрации сервиса на Геопортале достаточно указать публично доступный сетевой адрес вычислительного узла. Особенности локальной облачной инфраструктуры является наличие специальных программных инструментов, позволяющих пользователям Геопортала создавать виртуальные машины в рамках облачной инфраструктуры, которые уже имеют предустановленный набор программных средств разработки и публикации веб-сервисов [3].

Таким образом, Геопортал позволяет регистрировать сервисы и составлять из них композиции, используя язык программирования JavaScript. Подход к использованию языков программирования для задания композиций сервисов позволяет определять сложные

взаимодействия между сервисами (в случае переборных, рекурсивных, задач), а также обрабатывать промежуточные результаты выполнения сервисов прямо в сценариях стандартными средствами выбранного языка программирования. При выполнении композиций сервисов производится автоматическое планирование и распараллеливание выполнения вызова участвующих сервисов с учетом особенностей гетерогенной распределенной среде (изменчивый характер параметров среды, обработка возникающих критических ситуаций). Также реализуемый Геопорталом подход к заданию композиций сервисов обеспечивает возможность гибкой настройки доступа к сервисам.

2.2. Взаимодействие с устройствами. Данная работа рассматривает задачу применения программной системы выполнения композиций сервисов в распределенной гетерогенной среде для организации взаимодействия между устройствами. Для решения данной задачи необходимо дать определение устройствам в контексте решаемой задачи. Устройство – программно-аппаратная система, имеющая сетевой интерфейс и осуществляющая сбор информации об окружающей среде, либо оказывающая влияние на окружающую среду на основании команд, подаваемых извне, либо принимающая решения самостоятельно. Таким образом, задача организации взаимодействия устройств вырождается в задачу обеспечения возможности безопасного взаимодействия с устройствами внутри композиций (сценариев).

Работу с устройствами предлагается осуществлять посредством создания сценариев, внутри которых производится вызов устройств, используя стандартные средства JavaScript, нацеленные на взаимодействие с участниками сети, использующими HTTP протокол для соединения. Для этого в модуль выполнения сценариев интегрирован специальный JavaScript модуль, позволяющий совершать запросы к удаленным участникам сети по протоколу HTTP – используя GET, POST и т.д. вызовы. Данный модуль выбран по причине того, что большинство интерфейсов устройств представляют из себя веб-серверы (реализующих один из стандартов веб-сервисов или API).

В качестве примера будет рассмотрено создание сценария по управлению реле, отвечающим за включение и выключение света в помещении. Сценарий, приведенный ниже, сначала проверяет статус реле, затем, на основании переданных параметров, переводит реле в положение «включено» или «выключено» и возвращает результат выполнения. Входным параметром сценария является параметр `enable`, который может принимать истинное (включить) и ложное (выключить) значение.

```
function switch_light(input, mapping) {
  request.get("http://192.168.10.10/light", function(result) {
    if (result.status && input.enable || !result.status && !input.enable) {
      mapping.result.set(true);
    } else if (result.status && !input.enable || !result.status && input.enable) {
      request.post("http://192.168.10.10/light?key=123", function() {
        mapping.result.set(true);
      });
    } else {
      mapping.result.set(true);
    }
  });
}
```

2.3. Безопасность вызова устройств. Как уже было сказано ранее, одной из основных проблем при работе с устройствами является обеспечение безопасности их взаимодействия. Основным средством обеспечения безопасности и контроля доступа вызываемых сервисов является их абстракция в виде сценариев, используемая на Геопортале.

При создании сценария пользователь может определить круг пользователей, которые имеют право вызывать и редактировать сценарий. Если какой-либо пользователь системы имеет доступ только на вызов сценария, то он не может просмотреть его код, что делает невозможным получение информации о критических параметрах устройства (например, его сетевое расположение, способ вызова, использование секретных ключей, как, например, в примере выше).

Таким образом, устройство, регистрируемое в виде сценария, должно быть публичным (либо доступным только из сети, используемой Геопорталом, но это требует дополнительных настроек маршрутизации и настройки сетевого оборудования). Несмотря на публичность доступа к устройству, описание доступа к нему скрыто внутри кода сценария, что регулируется настройками безопасности. Данный вариант регистрации устройств на Геопортале оставляет возможность для случайного обнаружения устройства методом случайного перебора сетевых адресов и портов, но, при условии использования секретных ключей вызова вероятность получения несанкционированного доступа вследствие случайного обнаружения и перебора практически нулевая.

3. Апробация. В качестве апробации предлагаемого подхода к организации взаимодействия между устройствами с помощью программной системы выполнения композиций сервисов в распределенной среде приведен пример автоматизации управления световым оборудованием в офисном помещении предприятия.

В примере используется три устройства – реле включения и выключения света, сенсор уровня освещенности (возвращает показания освещенности по шкале от 0 до 1023) и датчик состояния сигнализации (возвращает булево значение статуса). Все устройства имеют веб-интерфейс и публичные сетевые адреса. Приведенный ниже программный код композиции запускается каждые 2 секунды и проверяет показания датчика освещенности посредством вызова `get_light_level()`. В случае если в настоящий момент сигнализация не включена (включение света в помещении, поставленном на охрану, может классифицироваться охранными датчиками как движение и вторжение) и если освещенность ниже порога `lightThreshold`, то производится включение света (переключение света происходит не чаще чем раз в 10 минут).

```
const lightThreshold = 400;
let lastChange = new Date();
let changeBuffer = 600000;
const smart_office = (input, mapping) => {
  setInterval(() => {
    get_light_level({}, {output: result1});
    get_security_status({}, {output: result2});
    if (result1.get() < lightThreshold && result2.get()) {
      let currentTime = new Date();
      let occurred = lastChange.getTime() - currentTime.getTime();
      if (occurred > changeBuffer) {
        lastChange = new Date();
        turn_on_light({}, {});
      }
    }
  });
}
```

```
}  
}  
}, 2000);  
}
```

Заключение. В статье показано, что существующая система выполнения композиций сервисов в распределенной гетерогенной среде была успешно использована для организации взаимодействия устройств интернета вещей. Сценарии взаимодействия устройств задаются с помощью языка программирования JavaScript, производится автоматическое распараллеливание вызова сервисов и адаптация к изменениям в вычислительной среде без участия пользователя.

Взаимодействие устройств осуществляется с учетом требований безопасности к использованию устройств (скрытие сетевого расположения устройств, параметров и способа вызова устройств, данных секретных ключей и т.д.) и максимально гибко в силу использования стандартных и любых сторонних средств и библиотек используемого языка программирования. Данный подход апробирован при автоматизации управления офисным помещением и находится в процессе расширения своих возможностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров Р.К., Бычков И.В., Шумилов А.С., Ружников Г.М. Компоненты среды WPS-сервисов обработки геоданных // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: информационные технологии. 2014. Т. 12. № 3. С. 16–24.
2. Федоров Р.К., Бычков И.В., Шумилов А.С., Ружников Г.М. Система планирования и выполнения композиций веб-сервисов в гетерогенной динамической среде // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 6. С. 18–35.
3. Федоров Р.К., Шумилов А.С. Создание и публикация WPS-сервисов на основе облачной инфраструктуры // Вестник БГУ. 2015. № 4. С. 29–35.
4. Arooj M., Asif M., Shah S. Modeling Smart Agriculture using SensorML // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2017. Vol. 8. No. 5.
5. Celesti A., Galletta A., Carnevale L., Fazio M., Lay-Ekuakille A., Villari M. An IoT Cloud System for Traffic Monitoring and Vehicular Accidents Prevention Based on Mobile Sensor Data Processing // IEEE Sensors Journal. 2018. Vol. 18. No. 12. Pp. 4795–4802.
6. Flow-based programming for the full stack. Available at: <https://flowhub.io/> (accessed 07.07.2018).
7. Homekit – Apple Developer. Available at: <https://developer.apple.com/homekit/> (accessed 05.07.2018).
8. Node-RED | Flow-based programming for the Internet of Things. Available at: <https://nodered.org/> (accessed 06.07.2018).
9. Paprocki W. How Transport and Logistics Operators Can Implement the Solutions of "Industry 4.0" // TranSopot 2016: Sustainable Transport Development, Innovation and Technology. 2017. Pp. 185–196.
10. Sensor Model Language (SensorML) | OGC. Available at: <http://www.opengeospatial.org/standards/sensorml> (дата обращения: 6.07.2018).
11. The Internet of Things is powered by Z-Wave. Available at: <https://z-wavealliance.org/> (accessed 10.07.2018).

12. Visual workflow engine. Available at: <https://www.losant.com/iot-platform/visual-workflow-engine> (accessed 06.07.2018).
 13. Welcome | RAML. Available at: <https://raml.org/> (accessed 05.07.2018).
 14. Yang J., Liu M., Lu J., Miao Y. Botanical Internet of Things: Toward Smart Indoor Farming by Connecting People, Plant, Data and Clouds // *Mobile Networks and Applications*. 2017. Vol. 23. No. 2. Pp. 188–202.
 15. Zigbee Alliance. Available at: <http://www.zigbee.org/> (accessed 06.07.2018).
-

UDK 004.75

**IMPLEMENTATION OF SMART DEVICES AS WEB-SERVICES
AND AUTOMATION OF THEIRS INTERACTIONS**

Roman K. Fedorov

PhD., leading researcher, e-mail: dstu@icc.ru

Aleksandr S. Shumilov

Postgraduate, e-mail: dstu@icc.ru

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, Russia, Lermontov str., 134

Abstract. The active development of hardware and software of the internet of things devices, as well as the development of the service-oriented approach can be observed in today's world of informational technologies. This article proposes to implement various devices of the internet of things as web-services with definition of theirs interactions using the distributed service compositions execution in heterogeneous environment software system, developed in ISDCT SB RAS.

Presented approach was probated during automation of the office building management processes and is currently under constant development.

Keywords: internet of things, service-oriented approach, service and devices compositions

References

1. Fedorov R.K., Bychkov I.V., Shumilov A.S., Rugnikov G.M. Komponenty sredy WPS-servisov obrabotki geodannyh [Components of the WPS-service environment for spatial data processing] // *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: informacionnye tehnologii = Herald of Novosibirsk state university. Ser. Informational technologies*. 2014. Vol. 12. No. 3. Pp. 16–24. (in Russian)
2. Fedorov R.K., Bychkov I.V., Shumilov A.S., Rugnikov G.M. Sistema planirovaniya i vypolneniya kompozicij veb-servisov v geterogennoj dinamicheskoy srede [Software system of planning and executing web-services compositions in heterogeneous dynamic environment] // *Vychislitel'nye tehnologii = Computational technologies*. 2016. Vol. 21. No. 6. Pp. 18–35. (in Russian)

3. Fedorov R.K., Shumilov A.S. Sozdanie i publikacija WPS-servisov na osnove oblachnoj infrastruktury [Development and publication of WPS-services using the cloud infrastructure] // Vestnik BGU = Herald of BSU. 2015. No. 4. Pp. 29–35. (in Russian)
4. Arooj M., Asif M., Shah S. Modeling Smart Agriculture using SensorML // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2017. Vol. 8. No. 5.
5. Celesti A., Galletta A., Carnevale L., Fazio M., Lay-Ekuakille A., Villari M. An IoT Cloud System for Traffic Monitoring and Vehicular Accidents Prevention Based on Mobile Sensor Data Processing // IEEE Sensors Journal. 2018. Vol. 18. No. 12. Pp. 4795–4802.
6. Flow-based programming for the full stack. Available at: <https://flowhub.io/> (accessed 07.07.2018).
7. Homekit – Apple Developer. Available at: <https://developer.apple.com/homekit/> (accessed 05.07.2018).
8. Node-RED | Flow-based programming for the Internet of Things. Available at: <https://nodered.org/> (accessed 06.07.2018).
9. Paprocki W. How Transport and Logistics Operators Can Implement the Solutions of "Industry 4.0" // TranSopot 2016: Sustainable Transport Development, Innovation and Technology. 2017. Pp. 185–196.
10. Sensor Model Language (SensorML) | OGC. Available at: <http://www.opengeospatial.org/standards/sensorml> (дата обращения: 6.07.2018).
11. The Internet of Things is powered by Z-Wave. Available at: <https://z-wavealliance.org/> (accessed 10.07.2018).
12. Visual workflow engine. Available at: <https://www.losant.com/iot-platform/visual-workflow-engine> (accessed 06.07.2018).
13. Welcome | RAML. Available at: <https://raml.org/> (accessed 05.07.2018).
14. Yang J., Liu M., Lu J., Miao Y. Botanical Internet of Things: Toward Smart Indoor Farming by Connecting People, Plant, Data and Clouds // Mobile Networks and Applications. 2017. Vol. 23. No. 2. Pp. 188–202.
15. Zigbee Alliance. Available at: <http://www.zigbee.org/> (accessed 06.07.2018).

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ
МИОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЧИСЛОВЫХ ДАННЫХ
ПРИ ПОМОЩИ GNUPLLOT, GAWK И КОНВЕЙЕРОВ ДАННЫХ**

Хан Нолина Вениаминовна

К.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: polinakhan@gmail.com

Таиров Эмир Асгадович

Д.т.н., главный научный сотрудник, e-mail: tairov@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. Статья посвящена проблеме автоматизации обработки многопараметрических табличных числовых данных на примере результатов исследования критического истечения пароводяной смеси через засыпку из шаровых частиц. Представлен обзор интерактивных и потоковых методов работы с табличными данными. Задача автоматизации построения точечных диаграмм с несколькими рядами решается средствами программ `gnuplot`, `gawk`, `sort` и их комбинирования при помощи конвейеров данных. Особое внимание уделяется минимизации усилий исследователя, затрачиваемых на обновление диаграмм при вводе новых данных и изменении требований к оформлению.

Ключевые слова: табличные данные, методы визуализации, конвейеры данных, фильтрация данных, обработка данных, критическое истечение, двухфазный поток, пористые среды.

Цитирование: Хан П.В., Таиров Э.А. Автоматизация обработки и визуализации многопараметрических числовых данных при помощи GNUPLLOT, GAWK и конвейеров данных // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 114–124. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-10

Введение. Результаты многопараметрического исследования с применением физического или численного эксперимента, как правило, могут быть представлены в форме таблицы, в которой строки соответствуют отдельным экспериментам, а столбцы – входным и выходным параметрам. При этом число столбцов может составлять несколько десятков и более, а число строк, как правило, измеряется сотнями или тысячами. Построение диаграмм является эффективным способом наглядного получения качественных выводов о результатах эксперимента. Для построения двумерной диаграммы с несколькими рядами, демонстрирующей зависимость некоторой характеристики u_k , $k=1, \dots, M$ из набора выходных значений от входного параметра x_i для заданного набора ограничений на значения остальных параметров, необходимо из всего массива данных отфильтровать столбцы, соответствующие x_i и u_k , и строки, определяемые этими ограничениями.

Электронные таблицы, такие, как Microsoft Excel или Libre Office Calc [5, 10], имеют все возможности для построения такого рода диаграмм на основе "точечной" диаграммы. При этом для горизонтальной и вертикальной осей выбирают, соответственно, столбцы,

содержащих значения x_i и u_k . Для выбора строк по заданным значениям других параметров эффективно применение инструмента "Фильтр" в разделе меню "Данные".

Построение диаграмм при помощи электронных таблиц разделяет достоинства и недостатки всех интерактивных методов: при всех простоте и наглядности он становится излишне трудоёмким в случае, когда однотипную работу надо выполнять многократно. Такое случается, когда нужно получить много диаграмм с различным выбором параметров по осям и набором условий, определяющих ряды данных, либо когда после построения диаграмм меняются сами данные, их качественный и количественный состав, или требования к оформлению диаграмм.

Процесс построения нескольких диаграмм с различным выбором параметров по осям и рядам мог бы быть автоматизирован при помощи встроенного в электронные таблицы инструмента построения сводных диаграмм [3]. В этом случае надо лишь выделить всю таблицу целиком и указать заголовки столбцов, которые будут использованы по горизонтальной оси, вертикальной оси и для выбора рядов данных. Однако, по крайней мере, на сегодняшний день, невозможно для сводной диаграммы выбрать тип "точечная". Внешне сходный тип диаграмм "график" не воспринимает данные горизонтальной оси как числа и располагает их с равными интервалами независимо от их значений, что приводит к искажению восприятия результатов.

В идеале, обновление диаграмм при дополнении или изменении данных с сохранением их структуры должно осуществляться "в один клик" независимо от количества данных и диаграмм, а внесение изменений в выбор параметров или оформление диаграмм не превышать по трудоёмкости составления текстового описания таких изменений. Как для экономии дискового пространства, так и для минимизации ошибок, совершаемых из-за невнимательности при внесении изменений, важно, чтобы все диаграммы генерировались из одной копии данных, и каждый пункт требований фиксировался только в одном месте.

В статье представлен подход к построению системы визуализации данных физического или математического эксперимента, обеспечивающий максимальную автоматизацию процесса построения многопараметрических диаграмм, на основе скриптов на языках `gnuplot`, `sort` и `awk`. Предлагаемый подход применен для обработки результатов исследования критического истечения пароводяной смеси через зернистый слой. Это исследование опирается на результаты ранее выполненных экспериментов по истечению парожидкостной смеси в атмосферу через неподвижный слой шаровых частиц [4] и теоретическую модель [14], основанную на уравнениях газовой динамики зернистого слоя [2].

1. Состав данных при исследовании критического истечения пароводяной смеси через засыпку. Неподвижные зернистые слои широко используются в каталитических химических реакторах. В последнее время в атомной энергетике рассматриваются перспективы использования ядерного топлива, заключенного в термостойких шаровых частицах диаметром 2 – 4 мм, применительно к реакторам с одно и двухфазным теплоносителем. Последнее обстоятельство вызывает интерес как к экспериментальному, так и теоретическому исследованиям особенностей двухфазных парожидкостных течений через неподвижные зернистые слои в широком диапазоне режимных условий [1, 6].

Для однородного газового потока в таких устройствах, как сопла, трубы различной длины, шайбы, заклинивание происходит при достижении потоком скорости звука в

критическом сечении, после чего дальнейшее понижение давления ниже критического сечения не влияет на расход [7, 8]. При двухфазном течении возникает неоднозначность в том, какая из фаз или сама смесь должна достигнуть звуковой скорости. В засыпках происходит многократное расширение и сжатие потока, и запираание может происходить при иных условиях. В последнее время появилось много работ по гидродинамике двухфазного потока при истечении через пористые среды. Однако, все эти работы посвящены докритическим режимам истечения, и рассматривают связь расхода и перепада давления [1, 6, 13, 9]. Ранее опубликованные авторами работы [14, 15], при написании которых использовалась представленная в данной статье технология построения диаграмм, посвящена мало изученной теме критических двухфазных потоков в шаровых засыпках и анализу скоростей и чисел Маха для смеси и ее компонент.

Данные эксперимента получены на рабочем участке, который представляет собой трубу диаметром 39 мм со вставкой из шаровых частиц, зажатых с обеих сторон решётками. Насыщенная пароводяная смесь с заданным давлением и паросодержанием подготавливается при помощи насоса, подогревателя и дроссельной шайбы. Параметры смеси контролируются датчиками температуры и давления. В установившемся заданном режиме течения измеряют расход и вычисляют на его основе массовую скорость смеси. При определении замыкающих зависимостей для теоретической модели использовали экспериментальные данные, полученные при высоте засыпки $H=50, 100, 250$ и 355 мм, диаметре частиц $d=2$ и 4 мм, входном давлении $P_1=0.6, 0.9$ и 1.2 МПа, и массовом расходе паросодержании $x_1=0.016, 0.022, 0.033, 0.055, 0.096$ и 0.178 .

Таким образом, в результате физического эксперимента имеются четыре входных параметра – H, d, P_1 и x_1 , и два выходных параметра: $(\rho w)_{cr}$ – критическое значения массовой расходной скорости, и $P_{2,cr}$ – выходное давление, при котором критическая скорость была достигнута. При обработке экспериментальных данных при помощи теоретической модели для каждого эксперимента были вычислены следующие характеристики течения: выходное паросодержание – x_2 ; показатель политропы процесса расширения смеси при истечении через засыпку – n ; а также ряд параметров, вычисляемых на входе и выходе засыпки, таких, как коэффициент скольжения фаз – s ; истинное объемное паросодержание – ϕ ; плотность смеси – ρ ; скорость, скорость звука и число Маха для смеси и ее компонент – v, v', v'', c, c', c'' , M, M', M'' . При этом скорости и числа Маха были вычислены как в среднем, m , так и в минимальном, ψ , проходном сечении. Всего получилось 57 столбцов и, поскольку использовались не все возможные сочетания входных параметров, 63 строки.

2. Построение диаграмм. Одним из ключевых вопросов проводимого в работе [15] изучения критического истечения пароводяной смеси через засыпку было установление возможности достижения скорости звука смесью или ее компонентами. Операцией "максимум" по столбцам с числами Маха было установлено, что скорость звука в минимальном проходном сечении на выходе из засыпки не достигается, после чего встал вопрос, как зависит выходное число Маха смеси и ее компонентов от входных параметров.

В данной статье изложен метод, представлены листинги и результаты построения диаграмм на основе программы `gnuplot` [11], с добавлением функциональности программ `sort` и `gawk`. Все они бесплатны, доступны в версиях как для ОС семейства Linux, так и для ОС Windows. Однако, один из показанных ниже альтернативных приемов их

комбинирования при помощи конвейеров данных внутри скрипта на языке gnuplot на данный момент работает только под управлением ОС семейства Linux.

Данные находятся в текущей директории в файле "res.csv". Построим выходное число Маха смеси в минимальном проходном сечении, ($M_{2,\psi}$, столбец 44), от входного массового паросодержания, (x_1 , столбец 4). Выберем при этом одну засыпку, $d=2$ мм, $H=250$ мм, данные которой лежат в строках, имеющих значение 2 в столбце номером 1 и значение 250 в столбце с номером 3. Ряды данных создадим на основе значений входного давления, содержащегося в столбце P_1 с номером 2. Диаграмму выведем в файл "x1-M2psi-2-250.eps" в подпапке "fig" в формате enhanced postscript. Преобразовать рисунок в любой другой графический формат можно после, например, при помощи консольной программы a2png.

Рисунок создаёт команда plot. До ее вызова необходимо командами set в произвольном порядке выбрать терминал (тип выходного файла), имя выходного файла. Также можно задать шрифт и размер символов, толщину линий, размер маркеров и многое другое. Поскольку многие настройки должны быть едиными для всех рисунков в одной статье, и при этом могут отличаться в разных изданиях, лучше вынести их в отдельный файл настроек. Назовём его "fig-Options.txt" (Листинг 1). Для того, чтобы ряды данных, соответствующие определенным значениям входных параметров отображались на всех рисунках одинаково, эти значения и соответствующие им типы точек и цвета линий также помещаются в общем файле настроек. В листингах жирным шрифтом выделены ключевые слова, а курсивом – определяемые переменные и функции.

Листинг 1. Текст скрипта общих настроек "fig-Options.txt" на языке gnuplot

```
set term postscript eps enhanced color #терминал (тип файла)
set termoption font "Times,30" #шрифт и его размер
set lmargin 4 #левое поле
set tmargin 2.5 #верхнее поле
set bmargin 2 #нижнее поле
set key rmargin #положение легенды
set ylabel offset graph 0.4,0.62 #положение подписи
# по оси y
set ylabel rotate by 0 #ориентация подписи
# по оси y
set xlabel offset graph 0.65,0.2 #положение подписи
# по оси x
set pointsize 2 #размер маркера
lw0=2 #толщина линий
Plset="0.6 0.9 1.2" #значения входного
# давления
PointType(P1)=P1==0.6?2:P1==0.9?4:7 #типы маркеров
LineColor(P1)=-1 #цвет линий
```

Выбор столбцов для горизонтальной и вертикальной осей задается опцией using команды plot. Она принимает как номера столбцов, так и их имена, считываемые из первой строки файла данных. Использование имен столбцов предпочтительнее, поскольку позволит

избежать ошибок и редактирования скриптов, если когда-то изменится состав не используемых в рисунках данных и нумерация столбцов.

Выбор строк с заданными значениями параметров (фильтрацию данных) можно осуществить двумя способами. Первый использует механизм конвейеров данных. Вторым – средства самого `gnuplot`.

Сам по себе механизм соединения программ потоковой обработки текста при помощи конвейеров данных работает в командной строке или командном файле как ОС семейства Linux, так и ОС Windows. Например, если текстовые данные из файла "data" надо обработать сначала программой "prog1", а потом программой "prog2" и в конце вывести в файл "res", то выглядеть это будет примерно так:

```
$prog1 data | prog2 > res
```

Здесь символом "\$" показан запрос командного интерпретатора.

В `gnuplot`, при выполнении в среде ОС семейства Linux, существует возможность вызвать любую программу или целую последовательность программ для обработки данных перед подачей в `plot`. Например, для предварительной обработки файла "data" программой "prog1" в скрипте `gnuplot` следует писать

```
plot "< prog1 data"
```

В данном случае, поскольку стоит задача фильтрации, идеальным выбором программы предварительной обработки является `gawk` [12], работающей как в среде ОС семейства Linux, так и под управлением ОС Windows. Текст скрипта "plot-x1-M2psi.txt" для `gnuplot`, который использует `gawk` для фильтрации строк, показан в Листинге 2. Результат выполнения показан на Рис. 1.

Листинг 2. Текст скрипта "plot-x1-M2psi.txt" на языке `gnuplot` с вызовом `gawk`

```
load "fig-Options.gps" #загрузка настроек
d="2" #выбор засыпки
H="250" #
set output "fig/x1-M2psi-".d."-".H.".eps" #имя выходного файла
set xlabel "x_1" #подпись по оси x
set ylabel "M_{2, {/Symbol y}}" #подпись по оси y
set key title "P_1 (MPa)" #подпись к легенде
set xtics 0.05 #шаг меток по оси x
plot [0:0.2][0:*] for [P1 in P1set] "<gawk
'/d/||$1~/".d."/&&$2~/".P1."/&&$3~/".H."/ ' res.csv" using
'x1': 'M2psi' title P1 with linespoints linewidth lw0 pointtype
PointType(P1) linecolor LineColor(P1) #Построение диаграммы
```

Для получения такого же результата средствами самого `gnuplot` в скрипте до вызова команды `plot` или в файле настроек надо определить функцию выбора:

```
sel(a,b,x)=a==b?x:NaN
```

Эта функция возвращает свой третий аргумент, если первые два равны. Когда они не равны, возвращает 'NaN'. Точки с нечисловыми значениями `plot` пропускает без сообщений об ошибках. Для использования функции фильтрации вместо вызова `gawk` последняя строка файла "plot-x1-M2psi.txt" должна быть заменена на

```
plot [0:0.2][0:*] for [P1 in Plset] "res.csv" using
4:(sel($1,d,sel($2,P1,(sel($3,H,$44)))) title P1 with
linespoints linewidth lw0 pointtype PointType(P1) linecolor
LineColor(P1)
```

Несмотря на то, что построить рис. 1 средствами чистого gnuplot без других программ возможно, конвейерный подход более универсален, так как позволяет задействовать любые другие программы, поддерживающие потоковую обработку текстовых данных. Рассмотрим случай, когда без использования конвейера не обойтись, при условии, что мы хотим избежать создания промежуточных копий данных.

Визуальный анализ диаграммы на рис. 1 показывает, что выходное число Маха смеси слабо зависит от входного паросодержания. В то же время, из теоретической модели известно, что зависимость от геометрических параметров засыпки с высокой точностью описывается зависимостью от одного безразмерного параметра $\sqrt{d/H}$. Благодаря информации, полученной из теоретической модели и визуального анализа, можно построить диаграмму, обобщающую информацию о выходных числах Маха смеси для всех засыпок и всех значений давления и паросодержания на входе в засыпку. На такой диаграмме по горизонтальной оси отложены значения безразмерного параметра $\sqrt{d/H}$, по вертикальной – усредненные по входному паросодержанию числа Маха смеси, $M_{2,\psi,av}$, а ряды по-прежнему соответствуют входному давлению (Рис. 2).

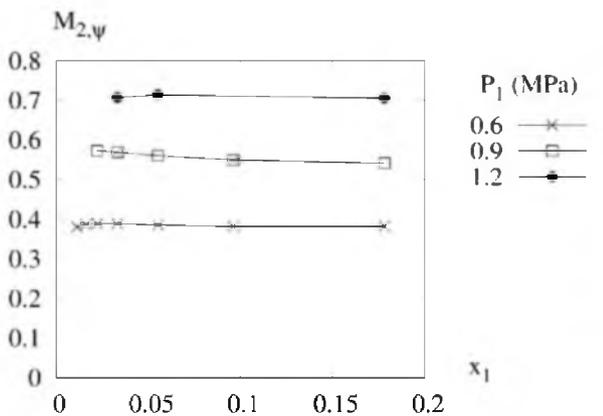


Рис. 1. Влияние входного массового расходного паросодержания на выходное число Маха смеси для различных значений входного давления для засыпки $d=2$ мм, $H=250$ мм." Сгенерированно gnuplot по скрипту "plot-x1-M2psi.txt"

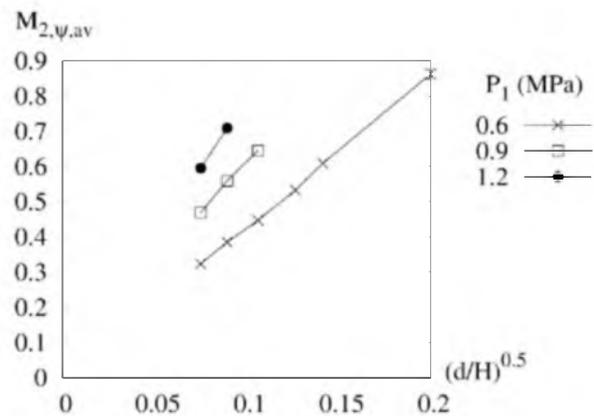


Рис. 2. Влияние геометрических параметров засыпки на усредненное по паросодержанию выходное число Маха смеси для различных значений входного давления. Сгенерированно gnuplot по скрипту "plot-dh-M2av.txt".

Команда `plot` обрабатывает данные построчно, и выполнить операцию усреднения над несколькими строками не может. Зато усреднение и любые другие операции аккумуляции данных достаточно просто и эффективно реализуются в `gawk`. Скрипт на языке `gawk`, который усредняет данные, находящиеся в столбце 4 для всех одинаковых значений в первых трёх столбцах, в предположении, что исходные данные отсортированы, и вычисляет корень квадратный из отношения значений в столбцах 1 и 3, вынесен в отдельный файл

"average-4-sqrt-13.txt". Его текст представлен в Листинге 3. На выходе получается таблица, где в первом столбце идут значения $\sqrt{d/H}$, во втором – P_1 , а в третьем – усредненные числа Маха, $M_{2,\psi,av}$. Для построения диаграммы с рядами, соединенными линиями, результат работы скрипта должен быть повторно отсортирован по первому столбцу.

Листинг 3. Текст скрипта "average-4-sqrt-13.txt" на языке gawk

```

#Для каждой строки
{ if (d==0 || d!= $1 || P1!= $2 || H!= $3) #В 1,2 или 3 столбцах
  { # новые значения
    if (d!=0 && n!=0) { #Не 1 строка
      print (d/H)^0.5, P1, sumM/n #Вывод результата
    }
    d=$1; P1=$2; H=$3; #Запомнить новые значения в
# 1,2 и 3 столбцах
    n=0; sumM=0 #Инициализация суммирования
  }
  n=n+1; sumM=sumM+$4 #Суммирование столбца 4
}
#При закрытии файла
END { if (d!=0 && n!=0) { #Можно делить
  print (d/H)^0.5, P1, sumM/n # Вывод результата
}
}

```

До и после применения этого скрипта данные нужно отсортировать. Для сортировки произвольных текстовых и текстовых табличных данных существует программа `sort`. Ее можно поставить в конвейер с вызовами `awk`. Построение рис. 2 осуществляется скриптом "plot-dh-M2av.txt", содержащим вызов команды `plot` с обработкой данных конвейером `awk '...' | sort | awk -f "prog | sort"` (Листинг 4).

Листинг 4. Текст скрипта "plot-dh-M2av.txt" на языке gnuplot с вызовом gawk и `sort`

```

load "fig-Options.gps" # загрузка настроек
set output "fig/dh-M2psi.eps" #имя выходного файла
set xlabel "(d/H)^{0.5}" #подпись по оси x
set ylabel "M_{2,{/Symbol y},av}" #подпись по оси y
set key title "P_1 (MPa)" #подпись к легенде
# Построение диаграммы
plot [0:0.2][0:*] for [P1 in P1set] "<gawk '$2~/\".P1.\"/{print
$1,$2,$3,$4}' res.csv| sort |gawk -f average-by-x-dh.txt |
sort" using 1:3 title P1 with linespoints linewidth lw0
pointtype PointType(P1) linecolor LineColor(P1)

```

Продолжая визуальный анализ результатов исследования с помощью рис. 2, можно прийти к заключению, что выходные числа Маха смеси прямо пропорциональны величине $\sqrt{d/H}$, и коэффициент пропорциональности растёт с ростом входного давления.

Заключение. На основании выполненного обзора средств построения точечных диаграмм с несколькими рядами и опыта выполнения этой работы в ходе обработки результатов исследования критических потоков пароводяной смеси через засыпку из шаровых частиц, установлено, что описанный в данной работе подход на основе конвейерной передачи данных внутри команды `plot` языка `gnuplot` позволяет наилучшим образом автоматизировать процесс построения таких диаграмм. Благодаря использованию скриптов вместо интерактивной обработки, минимизируются усилия, прилагаемые исследователем при обновлении диаграмм после изменения результатов расчётов и экспериментов. Параметризация скриптов, использование циклов для рядов данных и выделение настроек оформления в отдельный файл исключают повторы кода, что положительно сказывается на эффективности внесения поправок в оформление и обеспечивает единство стиля всех диаграмм. Применение конвейеров данных внутри команды `plot` позволяет задействовать всю мощь имеющихся в распоряжении исследователя программ потоковой обработки текстов, в том числе, встроенную программу сортировки `sort`, а также фильтрацию и аккумуляцию данных при помощи скриптов на языке `gawk`. Кроме того, использование конвейеров исключает создание лишних копий данных. Это важно не столько для экономии дискового пространства, сколько для обеспечения единства и синхронности обновления исходных данных. Таким образом, при применении описанной в данной работе технологии, сокращаются сроки подготовки графического материала для статей и презентаций и повышается его качество.

Достигнутая эффективность визуальной обработки данных позволила в кратчайшие сроки провести анализ результатов исследования критического истечения пароводяной смеси через засыпку из шаровых частиц, и установить, что в рассмотренном диапазоне условий, выходное число Маха смеси не достигает единицы, не зависит от входного паросодержания, прямо пропорционально корню квадратному из отношения диаметра частиц засыпки к ее высоте, и растёт с ростом входного давления.

Работа выполнена в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН на ЦКП «Высокотемпературный контур» в рамках научного проекта Ш.17.1.3 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. No. АААА-А17-117030310443-5, при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №17-08-00709).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев А.А., Созиев Р.И. Гидродинамическое сопротивление потока пароводяной смеси в шаровой засыпке // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46 №2. С. 251–256.
2. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. 2005.
3. Джелен Б. Майкл Александер. Сводные таблицы в Microsoft Excel 2016. [перевод с английского и редакция А. П. Сергеева]. М: Диалектика. 2017. 480 с.
4. Таиров Э.А., Покусаев Б.Г., Быкова С.М. Критическое истечение парожидкостного потока через слой шаровых частиц // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. №2. С. 1–10.
5. Уокенбах Дж. Диаграммы в Excel.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс». 2003. 448 с.

6. Clavier R., Chikni N., Fichot F., Quintard M. Modeling of inertial multi-phase flows through high permeability porous media: Friction closure laws // *Int. J. of multiphase flow*. 2017. Vol. 91. Pp. 243–261.
7. Elias E., Lellouche G.S. Two-phase critical flow // *International journal of multiphase flow*. 1994. Vol. 20(SUPPL. 1). Pp. 91–168. DOI: 10.1016/0301-9322(94)90071-X
8. Kim S.M., Mudawar I. Review of two-phase critical flow models and investigation of the relationship between choking, premature CHF, and CHF in micro-channel heat sinks // *International journal of heat and mass transfer*. 2015. Vol. 87. Pp. 497–511. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.012
9. Li L., Zou X., Lou J., Li H., Lei X. Pressure drops of single/two-phase flows through porous beds with multi-sizes spheres and sands particles // *Annals of nuclear energy*. 2015. Vol. 85. Pp. 290–295. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.05.025
10. LibreOffice 3. Calc Guide. Using spreadsheets in LibreOffice 2. GNU Public License. 2011.
11. Philipp K.J. Gnuplot in action. Understanding data with graphs. Manning Publications Co. 2010.
12. Robbins A. Effective awk programming. Universal text processing and pattern matching. O'Reilly media. 2015.
13. Sapin P., Gourbil A., Duru P., Fichot F., Prat M., Quintard M. Reflooding with internal boiling of a heating model porous medium with mm-scale pores // *International journal of heat and mass transfer*. 2016. Vol. 99. Pp. 512–520. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.013
14. Tairov E., Khan P. A polytropic model of a critical two-phase flow in a bed of spherical particles // *MATEC Web of Conferences*. 2017. No. 115 (08014), STS-33. DOI: 10.1051/mateconf/201711505007
15. Tairov E.A., Khan P.V. Properties of a critical two-phase flow through a granular bed // *XIX International conference on the methods of aerophysical research*. (August 13-19, 2018. Novosibirsk, Russia.) Novosibirsk: Parallel. 2018. Pp. 267–268.

UDK 004.67+004.92 + 532.546.2

**AUTOMATIZATION OF MULTIVARIABLE NUMERICAL DATA PROCESSING AND
VISUALIZATION WITH GNUPLOT, GAWK AND DATA PIPES**

Polina V. Khan

PhD., Senior Researcher, e-mail: polinakhan@gmail.com

Emir A. Tairov

D.Sc., Chief Researcher, e-mail: tairov@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. This paper is devoted to the problem of visualization of multiparameter tabular numerical data on the example of processing the results of the study of critical two-phase flow through a spherical particles bed. An overview of interactive and streaming methods for working with tabular data is presented. The task of automating the plotting of scatter diagrams with several rows is solved by means of the programs

gnuplot, gawk, sort, and their combination using data pipes. Special attention is paid to minimizing the efforts of the researcher, spent on updating the diagrams when entering new data and changing the requirements for the design of diagrams.

Keywords: tabular data, visualization methods, data pipes, data filtration, data processing, critical flow, two-phase flow, porous media.

References

1. Avdeev A.A., Soziev R.I. *Gidrodinamicheskoye soprotivleniye potoka parovodyanoy smesi v sharovoy zasypke* [Hydrodynamic drag of a flow of steam-water mixture in a pebble bed] // *High Temperature*. 2008. Vol. 46. No. 2. Pp. 251–256. DOI: 10.1134/s10740-008-2011-0 (in Russian)
2. Gol'dshtik M.A. *Protsessy perenosa v zernistom sloe* [Transport processes in a granular layer] Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN Publ., Kutateladze Institute of Thermophysics at Russian Academy of Sciences. 2005. 358 p. (in Russian)
3. Jelen B., Alexander M. *Excel 2016 Pivot table data crunching*. Que Publishing. 2015. 432 p.
4. Tairov E.A., Pokusaev B.G., Bykova S.M. *Kriticheskoye istecheniye parozhidkostnogo potoka cherez sloy sharovykh chastits* [Vapor-liquid critical flow through a layer of spherical particles] // *High Temperature*. 2016. Vol. 54. No. 2. Pp. 277–286. DOI: 10.1134/S0018151X16020218 (in Russian)
5. Walkenbach J. *Excel charts*. Wiley Publishing, Inc. 2003. 439 p.
6. Clavier R., Chikni N., Fichot F., Quintard M. *Modeling of inertial multi-phase flows through high permeability porous media: Friction closure laws* // *Int. J. of multiphase flow*. 2017. Vol. 91. Pp. 243–261.
7. Elias E., Lellouche G. S. *Two-phase critical flow* // *International journal of multiphase flow*. 1994. Vol. 20(SUPPL. 1). Pp. 91–168. DOI: 10.1016/0301-9322(94)90071-X.
8. Kim S.M., Mudawar I. *Review of two-phase critical flow models and investigation of the relationship between choking, premature CHF, and CHF in micro-channel heat sinks* // *International journal of heat and mass transfer*. 2015. Vol. 87. Pp. 497–511. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.012.
9. Li L., Zou X., Lou J., Li H., Lei X. *Pressure drops of single/two-phase flows through porous beds with multi-sizes spheres and sands particles* // *Annals of nuclear energy*. 2015. Vol. 85. Pp. 290–295. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.05.025.
10. LibreOffice 3. *Calc guide. Using spreadsheets in LibreOffice 2*. GNU Public License. 2011.
11. Philipp K.J. *Gnuplot in action. Understanding data with graphs*. Manning Publications Co. 2010.
12. Robbins A. *Effective awk programming. Universal text processing and pattern matching*. O'Reilly media. 2015.
13. Sapin P., Gourbil A., Duru P., Fichot F., Prat M., Quintard M. *Reflooding with internal boiling of a heating model porous medium with mm-scale pores* // *International journal of heat and mass transfer*. 2016. Vol. 99. Pp. 512–520. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.013.
14. Tairov E., Khan P. *A polytropic model of a critical two-phase flow in a bed of spherical particles* // *MATEC Web of Conferences*. 2017. No. 115 (08014), STS-33. DOI: 10.1051/mateconf/201711505007

15. Tairov E.A., Khan P.V. Properties of a critical two-phase flow through a granular bed // XIX International conference on the methods of aerophysical research. (August 13-19, 2018. Novosibirsk, Russia.) Novosibirsk: Parallel. 2018. Pp. 267–268.

**ИНФОРМАЦИОННОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ГЕОМОНИТОРИНГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ТЫВЫ**

Кабанов Алексей Анатольевич

Аспирант, e-mail: weller86@inbox.ru,

Кругляков Алексей Сергеевич

Магистрант, e-mail: piggsyy@gmail.com

Бадыма Севил Кечил-ооловна

Магистрант, e-mail: sevil.badyma@mail.ru

Нилимонкин Николай Сергеевич

Магистрант, e-mail: pilimonkin@mail.ru

Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Свободный пр., 79

Симонов Константин Васильевич

Доктор техн. наук, в.н.с., Институт вычислительного моделирования СО РАН, 660036,

Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44, e-mail: simonovkv@icm.krasn.ru

Аннотация. Представлено информационное и алгоритмическое обеспечение для решения основных задач геомониторинга и оценки геодинамической опасности территории Республики Тыва. На основе данных сейсмического мониторинга в 2010-2017 гг. выполнена разработка элементов методики анализа данных комплексного геомониторинга геодинамических полей для оценки напряженно-деформированного состояния геосреды и повышения точности прогноза сильных землетрясений.

Ключевые слова: геомониторинг, землетрясения, предвестники, напряженно-деформированное состояние горных пород, оценка опасности.

Цитирование: Кабанов А.А., Кругляков А.С., Бадыма С.К., Пилимонкин Н.С., Симонов К.В. Информационное и алгоритмическое обеспечение геомониторинга землетрясений на территории Тывы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 125–132. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-11

Введение. Геодинамический мониторинг является обязательным элементом государственной системы обеспечения геодинамической безопасности в сейсмически активных регионах России [1–2, 5]. Начиная с 2000 г., получили развитие и региональные наблюдательные геодинамические сети в различных субъектах федерации (Красноярский край, Кемеровская область, республика Тыва и др.). При этом используются как сейсмологические сети, так и комплексные сети, регистрирующие различные геолого-геофизические поля и их параметры. В различных сейсмоактивных регионах России (Кавказ, Алтае-Саянская область, Камчатка, Сахалин) получили развитие геофизические полигоны для контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) геологической среды в промышленных зонах, включая крупные города, для прогноза сейсмической и геодинамической опасности. Идеология развития геодинамических полигонов базируется на комплексировании различных геолого-геофизических методов (сейсмология, электромагнитные измерения, ГГД мониторинг, мониторинг газов и т.д.).

Вместе с тем, несмотря на длительное использование комплекса геолого-геофизических методов, применяемых при геодинамическом мониторинге, нормативно-методическая основа упомянутого комплекса не разработана. В основном регламентированы такие виды геодинамического мониторинга, как ГГД мониторинг [5], также разработаны нормативные документы для организации и эксплуатации сейсмологических сетей в системе РАН [2]. В то же время электромагнитный мониторинг, в частности, на основе регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), осуществляется на основе авторских разработок [4]. Мониторинг радона и других газов осуществляется также на основе авторских разработок различных исследователей [3].

В статье анализируются некоторые данные комплекса геолого-геофизических методов (сейсмология, ЕИЭМПЗ, эмиссия радона) на геодинамических полигонах в Сибири, пригодные для оценки изменения НДС геологической среды и прогноза сильных сейсмических событий в регионе [6–7].

1. Анализ данных мониторинга естественного импульсного электромагнитного поля Земли. Природа ЕИЭМПЗ до сих пор вызывает дискуссии. Основатели метода [4], исследуя ЕИЭМПЗ в частотном диапазоне 10-20 кГц, пришли к выводу, что в спектре сигнала ЕИЭМПЗ присутствуют две основные составляющие: ионосферная (связанная с грозовой активностью и другими атмосферно-ионосферными процессами) и литосферная (имеющая механо-электромагнитную природу). В качестве основного источника ЕИЭМПЗ авторы рассматривают литосферную составляющую, связанную с волнами сжатия-растяжения литосферы (деформационные волны) под влиянием колебаний внутреннего ядра Земли.

Результаты геодинамического мониторинга (сейсмического, электромагнитного, газгидрогеохимического) на Алтае-Саянских (Красноярском и Тывинском) полигонах позволили выявить основной механизм формирования суточного хода ЕИЭМПЗ – волны сжатия-растяжения, связанные с гравитационными приливами в земной коре и литосфере. Эффекты изменения структуры ЕИЭМПЗ на стадии подготовки землетрясений проявляются как в краткосрочном (1-10 суток), так и среднесрочном (до двух месяцев) плане – нашли подтверждение в результатах геодинамического мониторинга в 2010-2017 гг. на полигонах АССО (рис. 1).

Следует учитывать, что в различных пунктах регистрации (в зависимости от особенностей геолого-тектонического строения и геодинамических режимов различных блоков земной коры) может наблюдаться различное по форме проявление краткосрочных признаков подготовки землетрясения в структуре суточных ходов ЕИЭМПЗ (вплоть до противофазных). Летом признаки подготовки землетрясений проявляются на фоне повышенного в целом уровне интенсивности ЕИЭМПЗ и поэтому их сложнее идентифицировать в качестве признаков подготовки землетрясения.

Аномальная структура ЕИЭМПЗ в АССО коррелируется с характером изменения концентрации радона в различных точках (Красноярск–Туманный–Аскиз–Кызыл). Регистрация радона в комплексе с геофизическими методами доказала свою эффективность в АССО для оценки НДС геологической среды. Подготовка слабых землетрясений (М около 3,0) также проявляется в структуре суточного хода ЕИЭМПЗ.

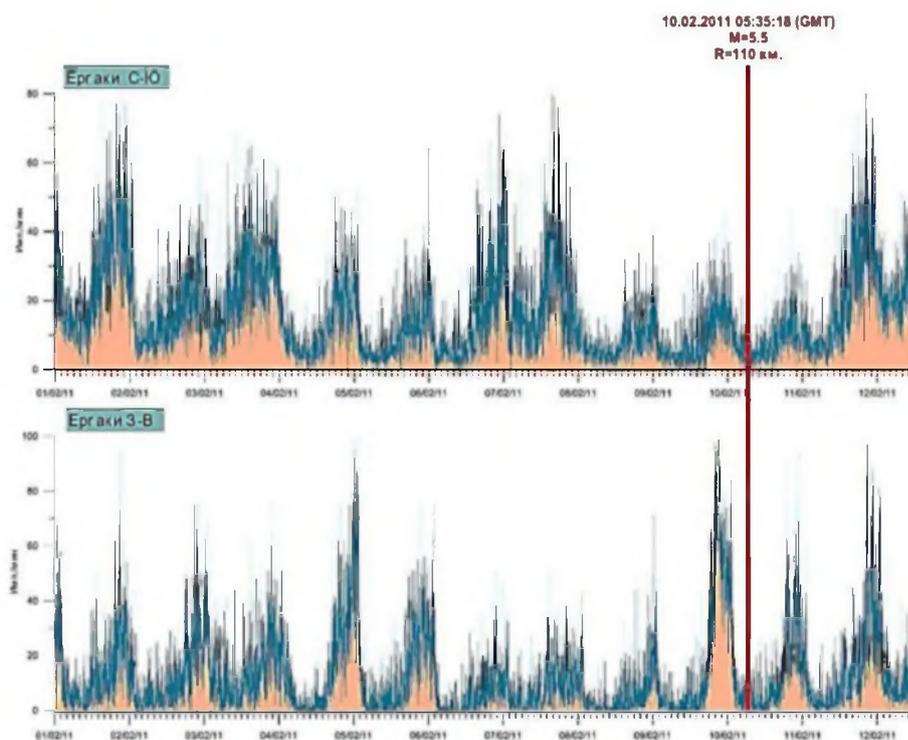


Рис. 1. Краткосрочный электромагнитный предвестник землетрясения в АССО, пункт наблюдения «Ергаки»

Таким образом, результаты геодинимического мониторинга в 2010-2017 гг. в Алтае-Саянском регионе подтвердили информативность ЕИЭМПЗ для прогноза изменений НДС геологической среды и в ряде случаев для прогноза землетрясений. Следует признать, что использование метода регистрации ЕИЭМПЗ без комплекса с другими (выше упомянутыми) методами, не позволяет однозначно давать оценку изменения НДС геологической среды и прогноз землетрясений. Отметим также, что при использовании имеющейся аппаратуры МГР-01 целесообразно на каждом пункте вести одновременную регистрацию ЕИЭМПЗ на одной «опорной» частоте (около 14 кГц), с различными коэффициентами усиления. Это позволит более надёжно идентифицировать сигналы литосферного происхождения на фоне влияния других видов источников (ионосферные, атмосферные и температурные шумы) [6].

Обработка данных МГР осуществляется с помощью Windows приложения MGR_Analiz. Данное приложение предназначено для визуализации, предварительной обработки и конвертации в текстовый формат данных, зарегистрированных многоканальным геофизическим регистратором МГР и его модификаций. Приложение работает с любой 32-х разрядной версией ОС Windows. Для установки приложения необходимо запустить дистрибутив программы, поставляемой в комплекте с МГР. В Windows XP можно устанавливать запись исполняемого файла на жесткий диск используемого компьютера.

При старте исполняемого файла приложения появляется модальное информационное окно «О программе» с номером версии программы и телефонами разработчика. Вид информационного окна приведен на рисунке 2. Интерфейс приложения MGR_Analiz выполнен в

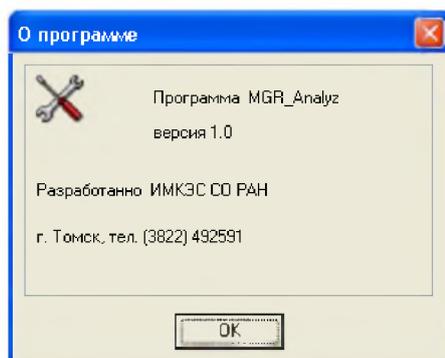


Рис. 2. Вид информационного окна «О программе»

виде одиннадцатистраничной записной книжки (рис. 3).

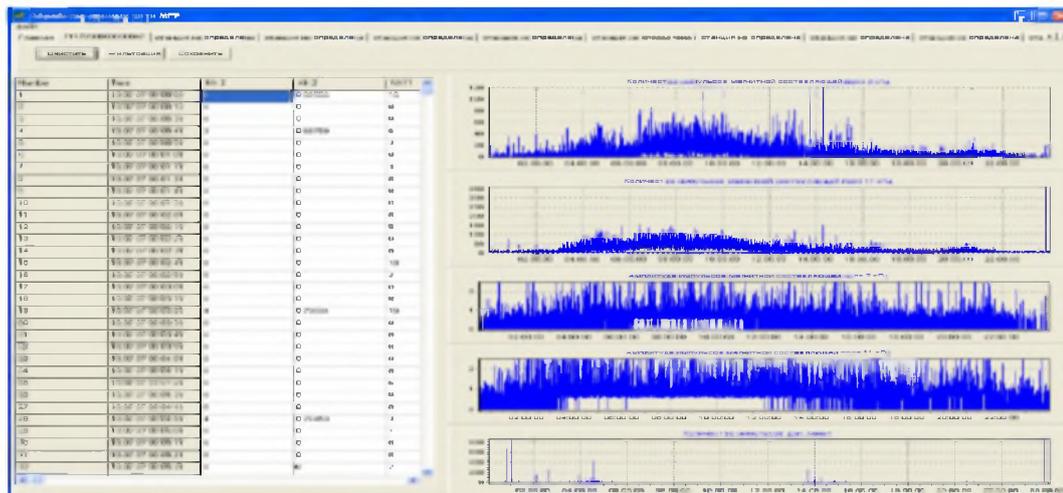


Рис. 3. Вид рабочего окна приложения MGR_Analiz

Страницы 2-11 служат для визуализации, первичной обработки и сохранения в текстовом виде в них данных МГР. На каждой из этих страниц могут быть открыты данные только одного регистратора. Первая страница с закладкой «Главная» - для визуализации и сохранения данных любого канала из открытых данных на страницах 2-11.

По результатам мониторинга электромагнитных полей на Алтае-Саянских полигонах можно сделать вывод, что данный метод позволяет осуществлять среднесрочный (до нескольких месяцев) и краткосрочный (от нескольких суток до нескольких часов) прогноз землетрясений. Предвестники проявляются в виде различных аномалий в структуре ЕИЭМПЗ: резком увеличении или снижении интенсивности импульсного потока, нарушении типичного для данного пункта суточного хода, аномального изменения сезонного тренда.

Интенсивность проявления предвестника и его заблаговременность связаны с энергией землетрясения, расстоянием и строением геологической среды между пунктом регистрации и гипоцентром. Перед относительно слабыми землетрясениями аномалии в структуре суточных ходов в виде резкого увеличения количества импульсов выделяются за несколько суток или часов до сейсмического события.

2. Анализ данных мониторинга уровня концентрации радона. Мониторинг радона в 2003-2017 гг. проводился в Алтае-Саянском регионе, где подтвердил свою эффективность в комплексе с другими геофизическими методами контроля НДС геологической среды. Характер изменения концентрации радона в пределах Алтае-Саянского геодинамического полигона связан также с длиннопериодными (3-6 месяцев) циклами гравитационных приливов. Радоновые предвестники подготовки сильного землетрясения проявляются в положительных или отрицательных аномалиях уровня радона в подземных водах [3].

Мониторинг содержания радона в подземных водах выполняется с целью выявления средне- и краткосрочных (месяц, 2-10 дней) предвестников сильных землетрясений $M > 5.0-6.0$ и оценки изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды на основе анализа связи динамики колебаний концентрации радона в связи с сейсмической активностью региона.

Оценки аномалий могут определяться тремя способами: по величине абсолютного максимального отклонения от средне-фоновой концентрации ($C_{экс} - C_{ф}$); по величине

относительного максимального отклонения ($C_{\text{ЭКС}} - C_{\text{ф}} / C_{\text{ЭКС}}$); по числу среднеквадратичных отклонений для фоновых концентраций ($C_{\text{ЭКС}} - C_{\text{ф}} / S_{\text{ф}}$).

Оценка предвестника подготовки землетрясений 2011-2012 гг. Эмиссия радона изменилась за 5-10 суток перед землетрясением во всех четырёх пунктах наблюдения Алтае-Саянского региона. Наиболее чётко предвестник проявился на п.н. Кызыл в 100 км от эпицентра землетрясения. За 4 суток до основного события в уровне концентрации радона наблюдалась аномалия, выраженная резким повышением уровня. Проведен численный анализ изменения концентрации радона в подземных водах. На этой основе выполнен анализ предвестников подготовки землетрясений в Каа-Хемском районе республики Тыва 27 декабря 2011 г. магнитудой 6.5 и 26 февраля 2012 г. магнитудой 6.7. Получены следующие результаты (рис. 4-5).

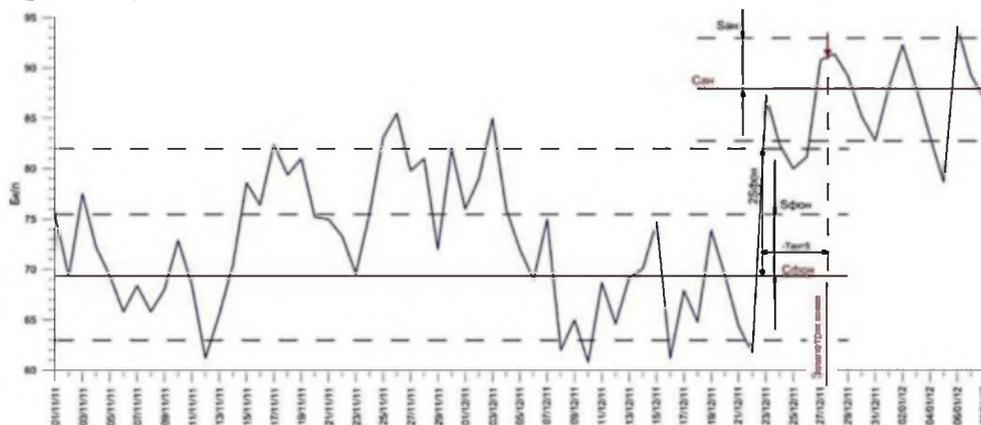


Рис. 4. Анализ измерений радоновых аномалий на примере Каа-Хемского землетрясения 27 декабря 2011 г. с магнитудой 6.5

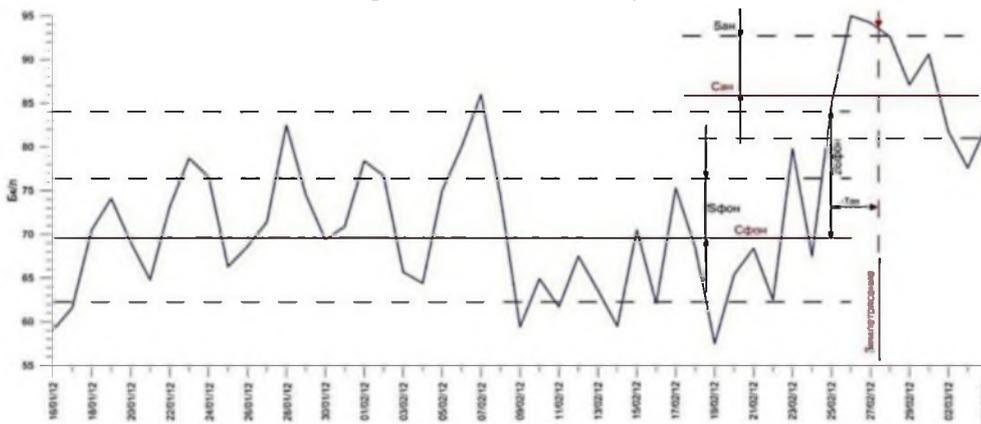


Рис. 5. Анализ измерений радоновых аномалий на примере Каа-Хемского землетрясения 26 февраля 2012 г. с магнитудой 6.7

Во время подготовки первого землетрясения средне-фоновая концентрация радона была на уровне 69.6, тогда как среднее значение концентрации радона в аномальный период составила 88.2. Время предвестниковой радоновой аномалии оценивалось от начала устойчивого повышения концентрации радона величины $2 * S_{\text{фон}}$ (среднеквадратичное отклонение фоновых концентраций) до момента землетрясения и составило 5 суток.

Во время подготовки второго землетрясения средне-фоновая концентрация радона была на уровне 69.6, тогда как среднее значение концентрации радона в аномальный период составила 86.0. Время предвестниковой радоновой аномалии оценивалось от начала

устойчивого повышения концентрации радона величины $2 \cdot S_{\text{фон}}$ (среднеквадратичное отклонение фоновых концентраций) до момента землетрясения и составило 3 суток. Расчёты проводились по данным пункта измерения «Кызыл», расстояние до очагов землетрясений составляет около 100 км.

Таким образом, изменения концентрации радона в естественных водных источниках позволяют, в комплексе с данными ЕИЭМПЗ, сейсмической эмиссии прогнозировать не только изменение НДС геологической среды, но также обеспечить среднесрочный (1-3 месяца) прогноз сильных сейсмических событий $M \geq 6.0$. Краткосрочный (1-3 суток) прогноз тоже возможен, но без комплексирования с другими методами (сейсмический и ЕИЭМПЗ) достоверность интерпретации локальных аномалий радона при редкой сети наблюдений не позволяет уверенно прогнозировать даже сильные землетрясения ($M \geq 5.0$).

Заключение. Геодинамический мониторинг комплексом геолого-геофизических методов (сейсмология, ЕИЭМПЗ, радон) обеспечивает не только оценку изменения НДС геологической среды, но также среднесрочный (1-3 месяца) и краткосрочный (1-10 суток) прогноз сильных землетрясений с $M \geq 5.0$. В то же время уровень комплексирования (низкая плотность сетей регистрации ЕИЭМПЗ и измерения уровня концентрации радона в подземных водах) не обеспечивает в регионе надёжный прогноз положения эпицентра.

Для повышения надёжности определения положения эпицентров землетрясений необходимо увеличить плотность сетей регистрации ЕИЭМПЗ и радона, а также дополнить применяемый геолого-геофизический комплекс данными спутниковых съёмок (инфракрасной и геохимической (CO_2 , метан)). В связи с распространением в геологической среде наряду с высокоскоростными волнами сейсмического диапазона (скорость 5-7 км/сек), медленных волн деформации (1-2 км/час и менее) необходимо проектировать геодинамические полигоны для мониторинга и медленных волн деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 22.1.06-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов. Общие требования. Введ. 2000-01-01. М.: Изд-во стандартов. 1999. 25 с.
2. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. М.: Наука. 1982. 272 с.
3. Зубков С.И. Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 74–105.
4. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная взаимосвязь с движением ядра Земли // Геология и Геофизика. 2009. Т. 50. С. 152–172.
5. Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (система RE-STEPS). Составители: Г.С. Вартанян, В.С. Гончаров, В.П. Кривошеев, Э.П. Потемка, С.К. Стажило-Алексеев. М.: ВСЕГИНГЕО, 2000. 83 с.
6. Сибгатулин В.Г., Хлебопрос Р.Г., Перетокин С.А., Кабанов А.А. Экологическая и инженерная геология: синергия процессов в сейсмических очагах и краткосрочный прогноз землетрясений // Инженерная экология. 2009. № 2. С. 32–42.
7. Соболев Г.А. Понамарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. Москва: Наука. 2003. 270 с.

**INFORMATION AND ALGORITHMIC PROVISION OF EARTHQUAKE
GEOMONITORING IN THE TYVA TERRITORY**

Aleksey A. Kabanov

Postgraduate student, e-mail: weller86@inbox.ru,

Alexey S. Kruglyakov

Master of Science, e-mail: piggsyy@gmail.com

Sevil K. Badima

Master of Science, e-mail: sevil.badyma@mail.ru

Nikolai S. Pilimonkin

Master of Science, e-mail: pilimonkin@mail.ru

Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79

Konstantin V. Simonov

Doctor of Techn. Sci., Leading Researcher, Institute of Computational Modeling SB RAS,

660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, p. 44

e-mail: simonovkv@icm.krasn.ru

Abstract. Information and algorithmic support for solving the main tasks of geomonitoring and assessment of the geodynamic danger of the territory of the Republic of Tyva are presented. Based on seismic monitoring data in 2010-2017 the development of elements of the method of data analysis of complex geomonitoring of geodynamic fields for the assessment of the geological environment and the accuracy of the forecast of strong earthquakes.

Key words: geomonitoring, earthquakes, precursors, stress-strain state of rocks, hazard assessment.

References

1. GOST R 22.1.06-99. Bezopasnost' v chrezvychaynykh situatsiyakh. Monitoring i prognozirovaniye opasnykh geologicheskikh yavleniy i protsessov. Obshchiye trebovaniya. – Vvedon 2000-01-01. [GOST R 22.1.06-99. Safety in emergency situations. Monitoring and forecasting of dangerous geological phenomena and processes. General requirements. – It is entered 2000-01-01]. Moscow. Izdatel'stvo standartov = Publishing house of standards. 1999. 25 p. (in Russian)
2. Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seysmicheskikh stantsiyakh Yedinoy sistemy seysmicheskikh nablyudeniy SSSR [Instruction on the procedure for the production and processing of observations at seismic stations of the Unified System of Seismic Observations of the USSR]. Moscow. Nauka = Science. 1982. 272 p. (in Russian)
3. Zubkov S.I. Radonovyye predvestniki zemletryaseniya [Radon precursors of earthquakes] // Vulkanologiya i seysmologiya = Volcanology and seismology. 1981. No. 6. Pp. 74–105. (in Russian)
4. Malyshev Yu.P., Malyshev S.Yu. Periodicheskiye variatsii geofizicheskikh poley i seysmichnosti, ikh vozmozhnaya vzaimosvyaz' s dvizheniyem yadra Zemli [Periodic variations of geophysical fields and seismicity, their possible interrelation with the motion of the Earth's

- core] // *Geologiya i Geofizika = Geology and Geophysics*. 2009. Т. 50. Pp. 152–172. (in Russian)
5. Metodicheskiye ukazaniya po vedeniyu gidrogeodeformatsionnogo monitoringa dlya tseley seysmoproгноza (sistema RE-STEPS) [Methodological instructions for conducting hydrodeformation monitoring for seismic forecasting purposes (RE-STEPS system). Compiled by G.S. Vartanyan, V.S. Goncharov, V.P. Krivosheev, E.P. Potemka, S.K. Trainee-Alekseev]. Moscow. VSEGINGEO. 2000. 83 p. (in Russian)
 6. Sibgatulin V.G., Khlebopros R.G., Peretokin S.A., Kabanov A.A. Ekologicheskaya i inzhenernaya geologiya: sinergiya protsessov v seysmicheskikh ochagakh i kratkosrochnyy prognos zemletryaseny [Ecological and engineering geology: synergy of processes in seismic sources and short-term forecast of earthquakes] // *Inzhenernaya ekologiya = Engineering ecology*. 2009. No. 2. Pp. 32–42. (in Russian)
 7. Sobolev G.A. Ponamarev A.V. Fizika zemletryaseny i predvestniki [The physics of earthquakes and precursors]. Moscow. Nauka = Science. 2003. 270 p. (in Russian)

**ТЕХНОЛОГИЯ БЕЗОПАСНОЙ КОММУНИКАЦИИ УСТРОЙСТВ С
ОГРАНИЧЕННЫМИ РЕСУРСАМИ**

Махмутов Амир Рашитович

Студент, Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса 12, e-mail: makhmutovamir15@gmail.com

Высоцкий Никита Игоревич

Студент, Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса 12, e-mail: chubays123@ya.ru

Миронов Константин Валерьевич

PhD., ст. преподаватель, Уфимский государственный авиационный технический
университет, 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса 12, e-mail: mironovconst@gmail.com

Meisel Marcus

Univ.Ass. Dipl.-Ing., Institute of Computer Technology, Technische Universität Wien,
1040 Wien, Gußhausstraße 25-27, e-mail: marcus.meisel@tuwien.ac.at

Sauter Thilo

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., Institute of Computer Technology, Technische Universität
Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 25-27, e-mail: Thilo.sauter@donau-uni.ac.at

Аннотация: В статье представлена технология защищенной передачи данных, которая может быть применена при построении различных маломощных беспроводных сетей, например, в системах умного дома, промышленных беспроводных сенсорных сетях, коммуникационных сетях Smart Grid. Особенность таких сетей в том, что устройства, из которых они состоят, не обладают достаточной мощностью, чтобы поддерживать быстрое выполнение асимметричных криптоалгоритмов. В связи с этим предлагается использование инфраструктуры ключей, основанной на применении исключительно симметричной криптографии.

Ключевые слова: беспроводные сети, безопасная коммуникация, криптография, микроконтроллеры.

Цитирование: Махмутов А.Р., Высоцкий Н.И., Миронов К.В., Meisel M., Sauter T. Технология безопасной коммуникации устройств с ограниченными ресурсами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 133–141. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-12

Введение. По мере развития технологий интернета вещей все большее распространение получают локальные сети, узлами которых являются маломощные специализированные вычислительные устройства. Примеры таких сетей: системы умного дома [5], сети систем Smart Grid, промышленные беспроводные сети и пр.

Как и иные коммуникационные системы, подобные сети требуют защиты информации [9]. Особенно остро стоит вопрос защищенности в сетях, обслуживающих критическую инфраструктуру – электрические сети, крупные промышленные объекты и т. п. При этом стандартные меры криптографической защиты при построении таких сетей часто

игнорируются. Мощность используемых устройств не рассчитана на выполнение асимметричных криптографических алгоритмов.

Существуют криптографические системы с открытым и закрытым ключом, но конечного решения по выбору наилучшей нет [7]. Некоторые авторы поддерживают инфраструктуры с открытым ключом (PKI – Public Key Infrastructure), однако этот подход имеет ряд недостатков в случае применения в системах маломощных устройств, наиболее очевидным из которых является невозможность удовлетворить строгие требования в отношении затраченных ресурсов и времени вычислений, поскольку аппаратные возможности строго ограничены. Также процесс восстановления скомпрометированных ключей требует задействования более сложных механизмов, чем в симметричных системах шифрования [15]. Возможны иные действия без подключения к устройству [10, 8]. В таком случае регулярное обновление ключей не вызывает дополнительные расходы [15].

На рисунке 1 представлена обобщенная схема рассматриваемой сети.

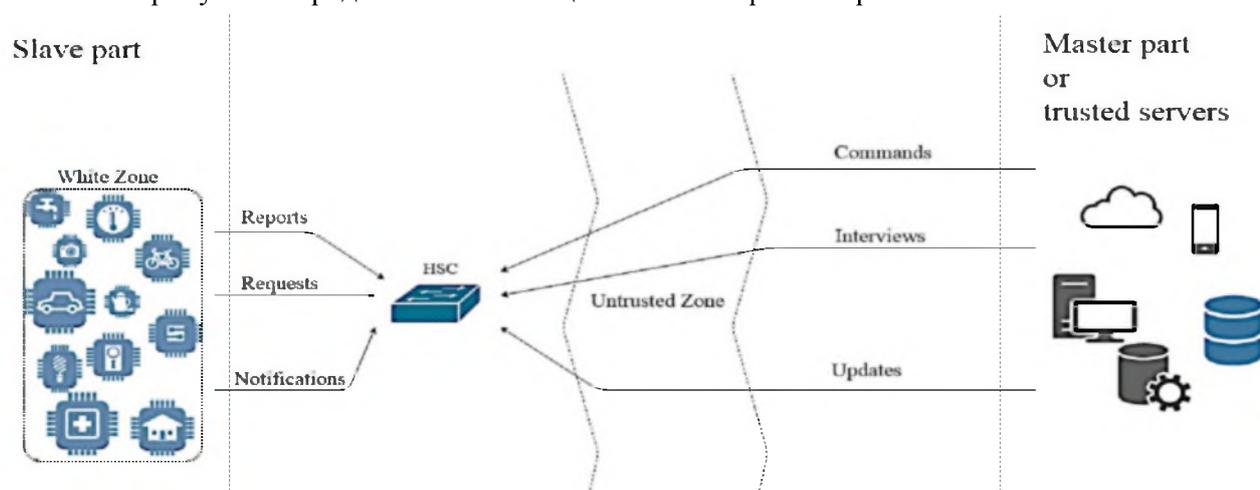


Рис. 1. Обобщенная схема рассматриваемой сети

В левой части рисунка представлена рабочая зона, в которой находится локальная сеть с подключенными устройствами интернета вещей. Примером такой сети может служить отдельная квартира «умного» дома. Правее, на границе рабочей зоны и зоны с низким уровнем доверия, размещено головное устройство локальной сети. Далее находится канал передачи информации, который обеспечивает соединение с зоной управления, в которой находятся различные устройства для управления рабочей зоной и головным устройством. К зоне управления относятся также сервера для обновления и регулярной проверки актуальности программного обеспечения головного устройства. Для связи между устройствами рабочей зоны и головным устройством используется беспроводной радиомодуль, для связи между зоной управления и головным устройством используется сеть Интернет.

Цель комплекса: обеспечить безопасное взаимодействие пользователя с устройствами интернета вещей. Задачи комплекса: 1) обеспечение криптографической защиты передаваемой информации между зоной управления и рабочей зоной; 2) фильтрация трафика, приходящего из канала передачи информации; 3) проведение автоматического обновления программного обеспечения компонентов комплекса; 4) защита домашней сети устройств интернета вещей от атак извне.

В работе Заутера и Тройтля [15] была представлена инфраструктура симметричных ключей для маломощных сетей, она является универсальной по отношению как к используемым симметричным алгоритмам, так и к аппаратному обеспечению. Была протестирована работа алгоритмов AES и DES на примитивном контроллере 8051.

В статье предлагается технология с использованием конкретного аппаратного обеспечения и криптографических алгоритмов. В первой части статьи описывается аппаратное обеспечение, которое предполагается использовать при построении защищенной сети маломощных устройств, во второй части обсуждается криптографическая составляющая.

1. Аппаратная часть. На данный момент существует множество алгоритмов шифрования, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки [11]. Для микроконтроллеров основной проблемой является необходимость большого числа математических операций, что, в свою очередь, может приводить к заметным временным задержкам при обработке данных.

Для реализации алгоритмов понадобятся микроконтроллеры с достаточной производительностью и хорошим объемом памяти. В качестве основы для прототипа был выбран микроконтроллер на платформе AVR [12], а именно ATmega328P. Ниже приводятся его структурная схема и характеристики [13].

Характеристики:

- Память: 32 kB Flash, 2 kB RAM, 1 kB EEPROM
- 8-битная архитектура ATMEGA AVR, тактовая частота до 20 МГц, в Arduino работает на 16 МГц. 1 MIPS/MHz
- Напряжение питания 5В или 3.3В

Благодаря среде разработки Arduino IDE процесс программирования микроконтроллера максимально упрощен, так как данная

среда избавляет от необходимости установки множества ручных настроек и дополнительных конфигураций проекта.

После успешных испытаний на прототипе планируется сменить платформу разработки на STM, эти контроллеры имеют больше вычислительных ресурсов по сравнению с AVR. Так же одним из важных моментов является то, что STM дешевле AVR в

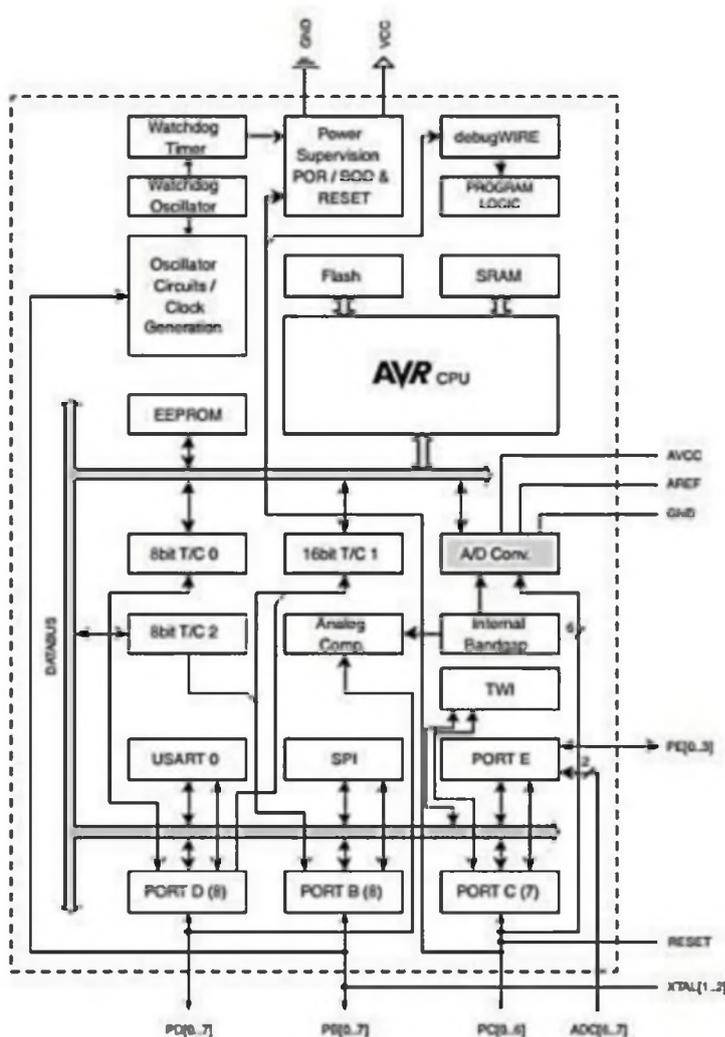


Рис. 2. Структурная схема ATmega328P

несколько раз и имеют при этом большие показатели по производительности. Недостатком является сложность разработки проектов из-за специфичности сред, могут возникать сложности [2] в создании и настройке конфигурационного файла. Ниже представлена структурная схема микроконтроллера STM32f103c8 (рис. 3) и его характеристики [17]. Позже возможна замена на другой микроконтроллер той же платформы [18].

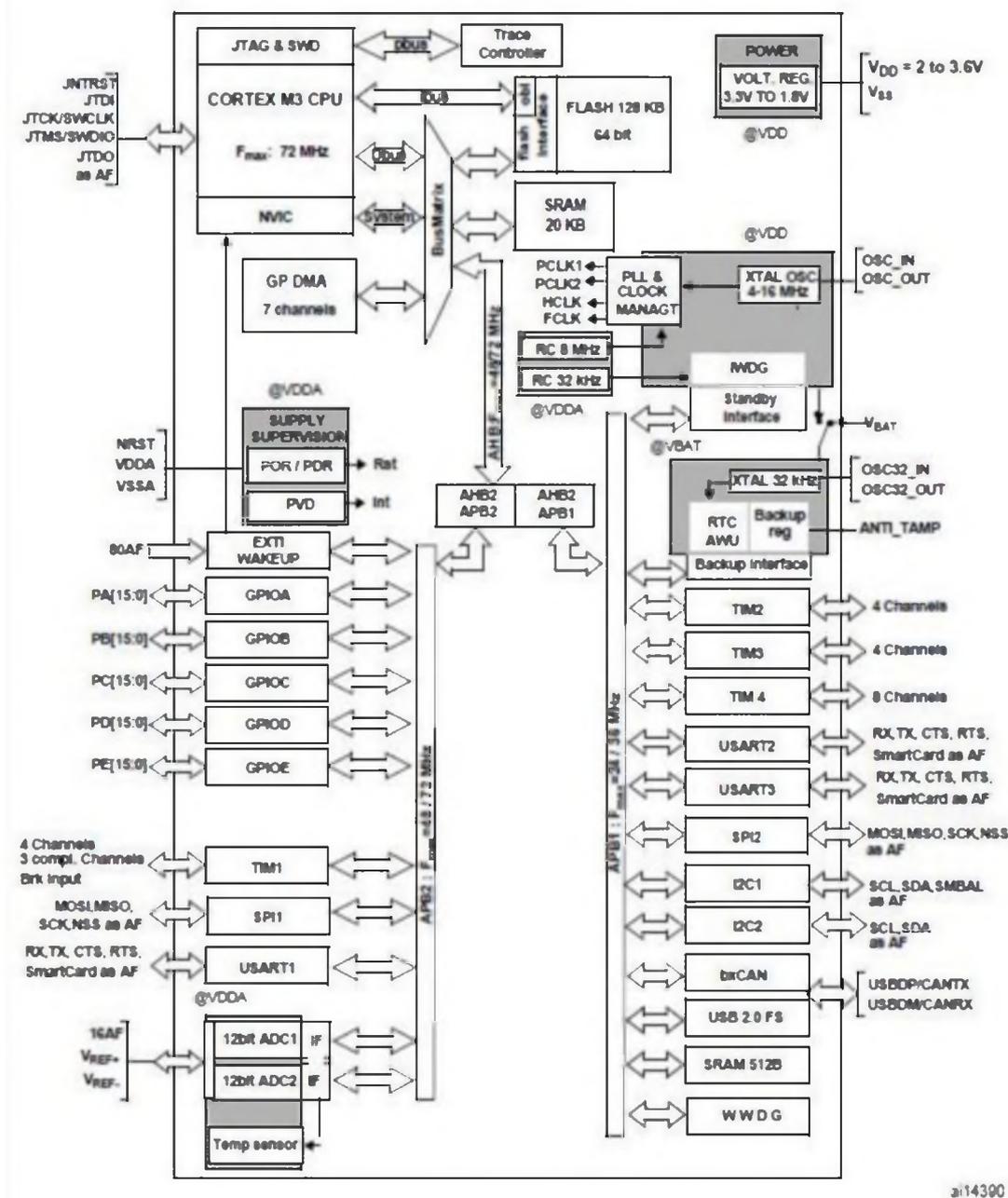


Рис. 3. Структурная схема STM32f103c8

Характеристики:

- Память: 64 kB Flash, 20 kB RAM
- 32-битная архитектура ARM CORTEX-M3, тактовая частота до 72МГц, 1.25MIPS/MHz
- Напряжение питания 3.3В (2.7-3.6)

Для передачи информации между контроллерами был выбран радиопередатчик HC-12. Это полудуплексный беспроводной последовательный модуль связи со 100 каналами в диапазоне 433.4-473.0 МГц, способный передавать данные на расстояние до 1 км [14].

Запланировано создание программных модулей, способных воссоздать самоорганизующуюся сеть наподобие ZigBee [6] или XBee [20]. Далее представлены характеристики передатчика HC-12.

Характеристики:

- Рабочая частота – 433,4 – 473,0 МГц.
- Используется только внешняя антенна.
- Дальность передачи информации – до 1000 - 1800 м на открытом пространстве в зависимости от режима работы.
- Мощность передатчика – до 100 мВт (доступны настройки для 8 уровней мощности).
- Количество каналов передачи данных – 100.
- Четыре рабочих режима.
- Встроенный микроконтроллер (присутствует на модуле) STM8S003F3.
- Интерфейс для коммуникации с внешними устройствами – UART.
- Потребляемый ток – от 3,6 мА до 16 мА в зависимости от режима работы.
- Пиковое потребление тока – до 100 мА (передача данных).
- Потребление тока в ждущем режиме – 80 мкА.
- Напряжение питания – от 3,2 В до 5,5 В.

2. Криптографическая составляющая. В настоящее время криптографическая защита информации не так широко распространена в сегменте интернета вещей, как того требует актуальное положение дел [1], в большинстве существующих на рынке решений она либо отсутствует, либо реализации, в которых она имеется, гораздо дороже. Для обеспечения безопасной коммуникации устройств в проекте используется криптографическая защита информации. На данный момент на стадии реализации и/или оптимизации программного кода находятся симметричные криптографические алгоритмы AES128, AES256, DES, RC4 и алгоритм с публичным ключом RSA. После реализации программных кодов алгоритмов запланирована оценка эффективности с учетом времени, затрачиваемого на обработку потока данных, стойкости к криптографическому анализу и энергопотребления на опытных образцах аппаратной части проекта. В случае неудовлетворительного результата будет выполняться дальнейшая оптимизация программного кода.

Система криптографической защиты информации в проекте строится следующим образом: поток обрабатываемых данных шифруется с помощью симметричного алгоритма, например, AES256 (в процессе генерации секретного ключа участвует алгоритм RC4 с учетом всех требований, повышающих его криптографическую стойкость [16]), а передача ключа шифрования происходит посредством асимметричного алгоритма, например, RSA. Объяснением выбора именно такой конфигурации системы шифрования является то, что симметричные алгоритмы требуют меньше времени на зашифровывание и расшифровывание информации по сравнению с асимметричными [15], а уровень криптографической стойкости определенных из них алгоритмов, например, все тот же AES256, достаточно высок [3]. Асимметричные криптографические алгоритмы затрачивают гораздо больше ресурсов, однако они позволяют передавать информацию (конкретный пример – ключ шифрования для симметричного алгоритма) в зашифрованном виде по незащищенным каналам передачи информации, при этом обеспечивая достаточный уровень защиты.

При использовании вышеупомянутой конфигурации системы шифрования данных происходит оптимальный расход ресурсов и обеспечивается достаточный уровень защиты передаваемых данных.

Результаты Заутера и Тройтля показывают, что расчет алгоритма Диффи-Хеллмана, применяемый в асимметричных криптосистемах, требует значительных вычислительных затрат, в результате чего операция зашифровывания выполняется на контроллере в тысячу раз медленнее, чем зашифровывание симметричным алгоритмом. С этой точки зрения предпочтительнее использовать исключительно симметричную инфраструктуру ключей.

В качестве симметричного алгоритма шифрования предлагается применить ARC4 (alleged RC4). Это один из наиболее простых с точки зрения программной реализации алгоритмов шифрования, который не требует значительных вычислительных ресурсов [19, 4]. Вместе с тем этот алгоритм должен использоваться с большой осторожностью в силу большого количества потенциальных уязвимостей. Требуется дополнительное исследование возможных уязвимостей алгоритма при реализации инфраструктуры симметричных ключей.

Заключение. В статье описывается технология обеспечения безопасной коммуникации между маломощными устройствами, в частности, статья является предложением концепции данной технологии в виде конкретной вариации реализации, с использованием определенной аппаратной части в совокупности с уже проверенными криптографическими алгоритмами. В ходе дальнейшей работы запланирована разработка программного обеспечения для обработки переданной и принятой информации, а также проверка уровня безопасности при передаче данных.

Благодарности. Исследование поддержано Российским Фондом Фундаментальных Исследований, гранты 17-07-00351 (Миронов К. В.) и 19-07-00972 (Махмутов А. Р.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасный умный дом: сложная технология, полезная каждому. Режим доступа: http://news.ifmo.ru/ru/startups_and_business/startup/news/5832/ (дата обращения 14.05.18)
2. Попытка подружиться с STM32. Режим доступа: <https://geektimes.com/post/255334/> (Дата посещения 19.04.18)
3. Почему 256 бит хватит навсегда. Режим доступа: <https://haker.ru/2012/12/28/59888/> (Дата посещения 03.05.18)
4. Свойства программно реализуемых поточных шифров: На примере RC4, GI, Веста. Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/svoistva-programmno-realizuemykh-potochnykh-shifrov-na-primere-rc4-gi-vesta> (дата посещения 25.04.18)
5. Число умных домов в Европе и Северной Америке. Режим доступа: <https://iot.ru/gorodskaya-sreda/kolichestvo-umnykh-domov-v-evrope-i-severnoy-amerike-v-2016-godu-dostiglo-30-3-mln> (дата посещения 17.05.18)
6. ZigBee: Взгляд вглубь. Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/wireless/2005_4_144.php (дата посещения 22.04.18)
7. S. Fuloria, R. Anderson, F. Alvarez, K. McGrath. Key management for substations: Symmetric keys, public keys or no keys? // IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE) 20-23 March 2011. 2011. Pp.1-6.

8. Sungwook Kim, Eun Young Kwon, Myungsun Kim, Jung Hee Cheon, Seong-ho Ju, Yong-hoon Lim, Moon-seok Choi. A Secure Smart-Metering Protocol Over Power-Line Communication // IEEE Trans. on Power Delivery. Oct. 2011. vol.26. no.4. Pp. 2370–2379.
9. Nian Liu, Jinshan Chen, Lin Zhu, Jianhua Zhang, Yanling He. A Key Management Scheme for Secure Communications of Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid // IEEE Trans. on Industrial Electronics. Oct. 2013. vol. 60. no. 10. Pp. 4746–4756.
10. A. Treytl, T. Sauter. Security Concept for a Wide-Area Low-Bandwidth Power-Line Communication System // Int. Symp. on Power Line Communications and its Applications (ISPLC). Vancouver. 2005. Pp. 66–70.
11. A Glossary of Cryptographic Algorithms. Available at: <https://www.globalsign.com/en-sg/blog/glossary-of-cryptographic-algorithms/> (accessed 01.05.18)
12. ATmega 2560 Datasheet. Available at: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/107092/ATMEL/ATMEGA2560.html> (accessed 29.04.18)
13. ATmega 328P Datasheet. Available at: http://mkprog.ru/wpcontent/uploads/2017/09/ATmega328-328P_Datasheet.pdf (accessed 05.05.18)
14. HC-12 Receiver Datasheet. Available at: http://avrproject.ru/112/rf_hc12/2016-01-14_122335_HC-12_v2.3B.pdf (accessed 29.04.18)
15. Hierarchical Key Management for Smart Grids. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7302803/> (accessed 04.05.18)
16. RC4 Vulnerabilities. Available at: <https://paginas.fe.up.pt/~ei10109/ca/rc4-vulnerabilities.html> (accessed 23.04.18)
17. STM32F405 Datasheet. Available at: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf> (accessed 29.04.18)
18. STM32F4Discovery Datasheet. Available at: <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html> (accessed 25.04.18)
19. What is RC4. Available at <https://paginas.fe.up.pt/~ei10109/ca/rc4.html> (accessed 23.04.18)
20. XBee Datasheet. Available at: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf> (accessed 20.04.18)

UDK 004

**SECURE COMMUNICATION TECHNOLOGY FOR DEVICES
WITH LIMITED RESOURCES**

Amir R. Makhmutov

Student, Ufa state aviation technical university, 12, Karl Marx Str., 450008, Ufa,
Russia, e-mail: makhmutovamir15@gmail.com

Nikita I. Vysotskiy

Student, Ufa state aviation technical university,
12, Karl Marx Str., 450008, Ufa, Russia, e-mail: chubays123@ya.ru

Konstantin V. Mironov

PhD., Senior Lecturer, Ufa state aviation technical university,
12, Karl Marx Str., 450008, Ufa, Russia,
Researcher, Ural Federal University, 19, Mira Str., 620002, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: mironovconst@gmail.com

Marcus Meisel

Univ. Ass. Dipl.-Ing., Institute of Computer Technology, Technische Universität Wien,
1040 Wien, Gußhausstraße 25-27, e-mail: marcus.meisel@tuwien.ac.at

Thilo Sauter

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., Institute of Computer Technology, Technische Universität
Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 25-27, e-mail: Thilo.sauter@donau-uni.ac.at

Abstract: The paper contains a proposal for a secure data transmission technology. This technology can be used to build various low-power wireless networks, for example, in smart home systems, industrial wireless sensor networks, communication networks of Smart Grids. The peculiarity of such networks is that the devices from which they consist do not have sufficient power to support execution of asymmetric crypto algorithms.

Keywords: wireless networks, secure communication, cryptography, microcontrollers.

Acknowledgements. The research is supported by the Russian Fund for Basic Research, grant 17-07-00351 (Konstantin Mironov) and 19-07-00972 (Amir Makhmutov).

References

1. Bezopasnyy umnyy dom: slozhnaya tekhnologiya, poleznaya kazhdomu [Safe smart home: a complex technology, useful to everyone]. Available at: http://news.ifmo.ru/ru/startups_and_business/startup/news/5832/ (accessed 14.05.18) (in Russian)
2. Popytka podruzhit'sya s STM32 [How to start working with STM32]. Available at: <https://geektimes.com/post/255334/> (accessed 19.04.18) (in Russian)
3. Pochemu 256 bit khvatit navsegda [Why 256 bits is enough forever]. Available at: <https://xakep.ru/2012/12/28/59888/> (accessed 03.05.18) (in Russian)

4. Svoystva programmno realizuyemykh potochnykh shifrov: Na primere RC4, GI, Vesta [Properties of software-implemented stream ciphers for the example RC4, GI, Vesta]. Available at: <http://www.dissercat.com/content/svoistva-programmno-realizuemykh-potochnykh-shifrov-na-primere-rc4-gi-vesta> (accessed 25.04.18) (in Russian)
5. Chislo umnykh domov v Yevrope i Severnoy Amerike [Number of smart homes in Europe and North America]. Available at: <https://iot.ru/gorodskaya-sreda/kolichestvo-umnykh-domov-v-evrope-i-severnoy-amerike-v-2016-godu-dostiglo-30-3-mln> (accessed 17.05.18) (in Russian)
6. ZigBee: Vzgl'yad vglub' [ZigBee: Looking Deeper]. Available at: http://www.kite.ru/articles/wireless/2005_4_144.php (accessed 22.04.18) (in Russian)
7. S. Fuloria, R. Anderson, F. Alvarez, K. McGrath. Key management for substations: Symmetric keys, public keys or no keys? // IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE) 20-23 March 2011. 2011. Pp.1–6.
8. Sungwook Kim, Eun Young Kwon, Myungsun Kim, Jung Hee Cheon, Seong-ho Ju, Yonghoon Lim, Moon-seok Choi. A Secure Smart-Metering Protocol Over Power-Line Communication // IEEE Trans. on Power Delivery. Oct. 2011. vol.26. no.4. Pp. 2370–2379.
9. Nian Liu, Jinshan Chen, Lin Zhu, Jianhua Zhang, Yanling He. A Key Management Scheme for Secure Communications of Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid // IEEE Trans. on Industrial Electronics. Oct. 2013. vol. 60. no. 10. Pp. 4746–4756.
10. A. Treytl, T. Sauter. Security Concept for a Wide-Area Low-Bandwidth Power-Line Communication System // Int. Symp. on Power Line Communications and its Applications (ISPLC). Vancouver. 2005. Pp. 66–70.
11. A Glossary of Cryptographic Algorithms. Available at: <https://www.globalsign.com/en-sg/blog/glossary-of-cryptographic-algorithms/> (accessed 01.05.18)
12. ATmega 2560 Datasheet. Available at: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/107092/ATMEL/ATMEGA2560.html> (accessed 29.04.18)
13. ATmega 328P Datasheet. Available at: http://mkprog.ru/wpcontent/uploads/2017/09/ATmega328-328P_Datasheet.pdf (accessed 05.05.18)
14. HC-12 Receiver Datasheet. Available at: http://avrproject.ru/112/rf_hc12/2016-01-14_122335_HC-12_v2.3B.pdf (accessed 29.04.18)
15. Hierarchical Key Management for Smart Grids. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7302803/> (accessed 04.05.18)
16. RC4 Vulnerabilities. Available at: <https://paginas.fe.up.pt/~ei10109/ca/rc4-vulnerabilities.html> (accessed 23.04.18)
17. STM32F405 Datasheet. Available at: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf> (accessed 29.04.18)
18. STM32F4Discovery Datasheet. Available at: <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html> (accessed 25.04.18)
19. What is RC4. Available at <https://paginas.fe.up.pt/~ei10109/ca/rc4.html> (accessed 23.04.18)
20. XBee Datasheet. Available at: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf> (accessed 20.04.18)