ISSN 2413-0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№4(28)/2022
6+

Information and mathematical **ISSN 2413 – 0133**

technologies in science and management **Scientific journal**

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 4 (28)

© Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук

2022

ISSN 2413 – 0133 Индекс E79114*

EDITORIAL BOARD	РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
Ablameyko S.V.	Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
Arshinskiy L.V.	Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Berestneva O.G.	Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
Boukhanovsky A.V.	Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
Bychkov I.V.	Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Woern H.	Вѐрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Voevodin V.V.	Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Wolfengagen V.E.	Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Gornov A.Y.	Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Gribova V.V.	Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Groumpos P.	Грумпос П., Греция, University of Patras
Zorina T.G.	Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
Kazakov A.L.	Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Kalimoldaev M.N.	Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
Karpenko A.P.	Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Komendantova N.P.	Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, IIASA
Kureichik V.V.	Курейчик В.В., д.т.н., профессор ЮФУ, Таганрог
Lis R.	Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
Massel L.V.	Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Moskvichev V.V.	Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАН
Ovtcharova J.	Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Popov G.T.	Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Sidorov D.N.	Сидоров Д.Н., д.ф-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Smirnov S.V.	Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Stennikov V.A.	Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Stylios C.	Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
Taratukhin V.V.	Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
Khamisov O.V.	Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Hodashinsky I.A.	Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
Chubarov L.B.	Чубаров Л.Б., д.т.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН
Yusupova N.I.	Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ

EXECUTIVE EDITORIAL	ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА		
Chief Editor Massel L.V.	Главный редактор	Массель Л.В.	д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Executive Editor Bakhvalova Z.A.	Выпускающий редактор	Бахвалова З.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Gaskova D.A.	Редактор	Гаськова Д.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Massel A.G.	Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Designer Pesterev D.V.	Дизайнер	Пестерев Д.В.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Адрес учредителя, издателя и редакции
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Сайт журнала - https://www.imt-journal.ru/

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (по состоянию на 29.03.2022) по научным специальностям 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.5; 2.4.5.
Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021г.
Дата выхода 14.12.2022 г. Тираж 100 экз.

CC BY
© Издательство ИСЭМ СО РАН
Цена свободная. (6+)

Содержание

Математические и информационные технологии в энергетике

Гальперова Е.В. Методология исследования и долгосрочного прогнозирования конъюнктуры на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей: задачи, подходы, алгоритмы, модели **5**

Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С. Методический подход к построению программной платформы для управления развитием интегрированных энергетических систем **19**

Клер А.М., Алексеюк В.Э., Левин А.А., Хан П.В. Методика обработки результатов теплофизических экспериментов, основанная на решении двух видов задач нелинейного математического программирования **32**

Соколов Н.Ю., Кулагин В.А. Численное и физическое моделирование работы системы тепловых труб для отвода тепла от радиоэлектронного оборудования различного назначения **50**

Обжерин Ю.Е., Сидоров С.М., Федоренко С.Н. Полумарковская и скрытая марковская модели функционирования автономного ветродизельного комплекса **70**

Математическое моделирование

Данеев А.В., Сизых В.Н. Антропоцентрический подход к ситуационному управлению симбиотических систем **83**

Новиков М.М., Ипполитов Е.В., Камаев С.В., Марков М.А., Князь В.А., Степаньянц Д.Г. Проблемы бесконтактной регистрации потоков в гидродинамической трубе **95**

Козлова М.А., Шаманский В.А. Построение графа химических реакций для анализа реагирующих систем **108**

Сухоруков А.Л., Титов М.А. Анализ параметров пространственного движения подводного глайдера дискообразной формы **119**

Интеллектуальные, информационные и программные системы

Лаптев Н.В., Гергет О.М., Кравченко А.А., Лаптев В.В., Колпащиков Д.Ю. Решение проблемы объединения прогнозов выделенных на изображении объектов дыма **136**

Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Технология качественного исследования двоичных динамических систем в микросервисной инфраструктуре **144**

Ротанова И.Н., Юнаков В.С. Подходы к созданию Региональной ГИС Алтайского края **156**

Бендик Н.В., Полковская М.Н. Онтологическая модель данных для оценки повторяемости отказов элементов электрической сети **170**

Коробко А.В., Шефтель К.С. Модельно-ориентированный подход к формированию оперативных печатных отчётов **181**

Методы искусственного интеллекта и их приложения

Аршинский Л.В., Лебедев В.С. Объективизация баз знаний интеллектуальных систем на основе индуктивного вывода с использованием нестрогих вероятностей **190**

Гай В.Е., Смирнов А.В., Баринов Р.О., Поляков И.В., Голубенко В.А., Кузнецов Г.Д. Система распознавания объектов с использованием теории активного восприятия **201**

Зайцев А.Ф. Метод поиска и логического вывода экспертной информации в ориентированном циклическом мультиграфе знаний **213**

Карпов В.Э., Королева М.Н. К вопросу о формализации этики поведения коллаборативного робота **223**

Рыков Ю.Г. К вопросу развития гибридного аналитического подхода к моделированию сложных систем, содержащих как слабо структурированные, так и хорошо структурированные подсистемы **234**

Массель Л.В., Массель А.Г., Мамедов Т.Г. Гаськова Д.А., Цыбиков А.Р., Щукин Н.И. Оценка устойчивости энергетических систем с применением методов машинного обучения **248**

Content

Mathematical and information technologies in energy

Galperova E.V. Consumer behavior-informed methodology for studying and making long-term projections of the state of regional energy markets: its tasks, approaches, algorithms, and models **5**

Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V., Mayorov G.S. Methodical approach to building a software platform for the development of integrated energy systems **19**

Kler A.M., Alekseiuk V.E., Levin A.A., Khan P.V. A method for processing the results of thermophysical experiments based on solving two types of problems of nonlinear mathematical programming **32**

Sokolov N.Yu., Kulagin V.A. Numerical and physical modeling of the operation of a heat pipe system for heat removal from radio-electronic equipment for various purposes **50**

Obzherin Yu.E., Sidorov S.M., Fedorenko S.N. Semi-Markov and hidden Markov models of autonomous wind diesel complex functioning **70**

Math modeling

Daneev A.V., Sizykh V.N. Anthropocentric approach to situational control of symbiotic systems **83**

Novikov M.M., Ippolitov E.V., Kamaev S.V., Markov M.A., Knyaz V.A., Stepaniants D.G. Problems of non-contact registration of flows in a hydrodynamic tube **95**

Kozlova M.A., Shamansky V.A. Application of graphs for the analysis of the mechanism of chemical kinetics **108**

Sukhorukov A.L., Titov M.A. Analysis of the spatial motion parameters of an underwater disk-shaped glider **119**

Intelligent, information and software systems

Laptev N.V., Gerget O.M., Kravchenko A.A., Laptev V.V., Kolpashchikov D.Yu. Solving the issue of combining predictions of smoke objects highlighted in images **136**

Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Technology of qualitative study of binary dynamic systems in microservice infrastructure **144**

Rotanova I.N., Yunakov V.S. Approaches to the creation of a Regional GIS of the Altai Krai **156**

Bendik N.V., Polkovskaya M.N. Ontological data model for assessing the repeatability of failures of electrical network elements **170**

Korobko A.V., Sheftel K.S. Model-driven approach to generating operational printed reports **181**

Artificial intelligence methods and their applications

Arshinskiy L.V., Lebedev V.S. Objectification of knowledge bases of intelligent systems based on inductive inference using non-strict probabilities **190**

Gai V.E., Smirnov A.V., Barinov R.O., Polyakov I.V., Golubenko V.A., Kuznetsov G.D. Object recognition system using theory of active perception **201**

Zaytsev A.F. Method of search and logical inference of expert information in a directed cyclic knowledge multigraph **213**

Karpov V.E., Koroleva M.N. On the issue of formalization collaborative robot ethical behavior **223**

Rykov Yu.G. On the development of a hybrid analytical approach to modeling complex systems containing both weakly structured and well-structured subsystems **234**

Massel L.V., Massel A.G., Mamedov T.G., Gaskova D.A., Tsybikov A.R., Shchukin N.I. Assessment of the resilience of energy systems using machine learning methods **248**

Математические и информационные технологии в энергетике

УДК 338.27:51-74
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.001

Методология исследования и долгосрочного прогнозирования конъюнктуры на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей: задачи, подходы, алгоритмы, модели

Гальперова Елена Васильевна
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *galper@isem.irk.ru*

Аннотация. Актуальность статьи определяется важностью исследования взаимосвязи спроса и цен на региональных энергетических рынках для формирования долгосрочной динамики спроса на энергоносители, при выработке стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов. Необходимость в разработке новых подходов для исследования долгосрочной конъюнктуры региональных энергетических рынков вызвана, в том числе, происходящим в мире очередным энергетическим переходом. Одной из главных особенностей перехода является появление у потребителей возможностей регулировать свое энергопотребление, иметь мощности по производству и хранению энергии, а также осуществлять взаимосвязь с энергосистемой. Эти новые свойства потребителей меняют саму систему энергоснабжения и ценообразование в энергетике.

В статье описан разработанный поэтапный методический подход, каждый его этап состоит в последовательном решении отдельной или нескольких задач разной степени важности и сложности, для каждой из которых разработаны свои методы и модели. Особенность подхода состоит в возможности (при необходимости) возвращаться на предыдущий этап для корректировки условий или показателей. Специфической чертой подхода является совместное взаимосвязанное рассмотрение системы потребления и энергоснабжения региона и итерационное согласование решений регионального уровня с системой энергоснабжения вышестоящего территориального уровня. Предлагаемая многоэтапная методология позволяет определить взаимное влияние спроса и цен на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей и оценить региональную ценовую эластичность спроса на отдельные энергоресурсы, что позволит корректировать долгосрочную динамику спроса на энергоносители и будет способствовать повышению обоснованности перспективных вариантов развития электроэнергетики и ТЭК.

Ключевые слова: энергоносители, спрос, потребители, распределенная генерация, моделирование, система потребления, цена

Цитирование: Гальперова Е.В. Методология исследования и долгосрочного прогнозирования конъюнктуры на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей: задачи, подходы, алгоритмы, модели / Гальперова Е.В. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 5-18. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.001.

Введение. Исследование долгосрочной динамики потребности в топливно-энергетических ресурсах и влияния на нее их стоимости была и остается важной фундаментальной задачей при разработке и принятии стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов и политики, направленной на повышение качества жизни населения.

Сложности в прогнозировании потребности в энергоносителях обусловлены необходимостью учета большого количества взаимосвязанных экономических, технических, социальных и поведенческих факторов, а также ростом неопределенности будущих условий развития энергетики, экономики и общества, в том числе, связанных с очередным энергопереходом. Важной особенностью энергоперехода является изменение роли потребителя, что повышает значимость исследований на региональном уровне, где происходит непосредственное согласование интересов производителей и потребителей энергии (цен и спроса). В условиях энер-

гетического перехода именно потребитель формирует объем и структуру используемых энергоносителей, которые, в свою очередь, определяют необходимые мощности по их производству в системе энергоснабжения. Активные потребители (имеющие возможность управлять своим энергопотреблением), а также потребители, имеющие собственные источники генерации (просьюмеры), создают новые условия конкуренции (в том числе и для традиционных поставщиков) и формирования спроса и цен на энергетических рынках.

В ИСЭМ СО РАН разработана методология исследования и прогнозирования спроса на энергоносители, которая постоянно развивается для решения новых возникающих проблем (см. подробнее [1]). Она предполагает существование разных по значимости и сложности задач и способов их решения на разных временных стадиях прогнозного периода. Формирование прогноза осуществляется последовательным сужением зоны неопределенности по двум направлениям: (1) во времени – от дальней перспективы к ближней, (2) по территории – от страны до субъекта федерации. В отличие, например, от применяемого в ИНЭИ РАН подхода [2] предусматривается возможность (необходимость) корректировки дальней перспективы по результатам решения ближней и вышестоящего территориального уровня на основе нижестоящего.

Реализующий методологию инструментарий представляет собой стенд моделей разного вида (оптимизационных, межотраслевых, имитационных) и степени агрегирования. Каждая модель может решать как свои специфические задачи, так и, при необходимости, объединяться с другими в расчетные комплексы (см. подробнее [3]).

1. Обзор литературы. В отечественной и зарубежной практике исследования и долгосрочного прогнозирования потребности в топливе и энергии накоплены и используются достаточно большое количество подходов, методов и моделей. Среди них как эвристические (Делфи, контрольных вопросов, мозгового штурма, аналогий и т.д.), так и математические (экстраполяции, оптимизации, балансов, имитации и др.) методы. Основной зарубежный опыт создания и применения отдельных методов и их комбинации проанализирован и обобщен в [4, 5], отечественные подходы достаточно полно представлены в [6-8]. Разработанные имитационные, оптимизационные, балансовые и др. модели используются как для исследования непосредственно перспективной динамики потребности в энергоресурсах, так и могут быть составной частью модельных комплексов, предназначенных для определения направлений развития энергетики [9-12].

В последние годы, в связи с появлением у потребителей новых возможностей, ведутся исследования по их влиянию на: снижение пиковых нагрузок и резервных мощностей, оптимизацию режимов работы электростанций и электроэнергетической сети, сокращение расходов и потерь топлива [13]. В [14] довольно полно описано изменение моделей и характера взаимодействия потребителей и энергокомпаний благодаря появлению целого ряда новых факторов (удешевление технологий генерации с использованием возобновляемых источников энергии и систем накопления электроэнергии, развитие систем интеллектуального учета и др.). Наиболее важной новой особенностью потребителей является возможность управления спросом. 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 рассматриваются возможности уменьшения потребления наиболее энергоемкими приборами, а также планирование энергопотребления и собственного производства электроэнергии на сутки вперед на основе оптимизации экономических или технических параметров [15-17]. Отечественные исследователи решают задачи оптимизации суточных графиков режимов работы приборов и оборудования, загрузки собственных генерирующих мощностей для домохозяйств и промышленных потребителей, а также координации

взаимодействия потребителей и электроснабжающих организаций при регулировании суточных графиков нагрузки [18, 19].

Основные преимущества, общесистемные эффекты и проблемы технологического присоединения распределенных источников энергии в распределительные сети рассмотрены в [20-24]. В [25, 26] описаны вопросы функционирования электрических сетей с объектами распределенной генерации (РГ), а в [27, 28] – проблемы релейной защиты, почасовой загрузки, качества электроэнергии устройств распределенной генерации. В [29, 30] представлены исследования режимной надежности систем электроснабжения с РГ и учетом каскадных отказов, а также модели для определения предельных режимов в электрических сетях, кроме того, методы для оценки параметров режима энергорайонов с объектами РГ. В ряде работ уделяется внимание оценке надежности систем энергоснабжения, в том числе оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов РГ [31-33]. Кроме того, распределенная генерация энергии рассматривается как один из факторов повышения энергетической безопасности и устойчивого развития регионов [34].

Несмотря на значительное количество публикаций, освещающих разные аспекты исследования и моделирования потребности в энергоносителях, поведения потребителей, возможностей распределенной генерации, не удалось найти работ, где эти факторы рассматривались бы комплексно, взаимосвязано с оценкой спроса на электроэнергию, цены и структуры ее производства в регионе.

2. Предлагаемый методический подход представляет собой многоуровневый многоэтапный процесс, каждый его этап состоит в решении одной или нескольких задач разной степени важности и сложности, характерных для разных временных стадий прогноза, для которых разработаны соответствующие методы и модели (рис.1). На каждом этапе полученные результаты анализируются и, при необходимости, исследование возвращается на предыдущий этап для корректировки условий или показателей.

Рис. 1. Основные задачи (этапы) исследования
и долгосрочного прогнозирования конъюнктуры на региональных энергетических рынках
с учетом поведения потребителей (для одной временной стадии) [35]

2.1. Метод прогнозирования динамики цен на топливо. Прогнозирование динамики цен – отдельная сложная задача и, если имеются официальные прогнозы цен на разные виды топлива авторитетных организаций для рассматриваемого региона, этот этап исключается из схемы. Чаще всего таких прогнозов нет, и для оценки возможной динамики цен на разные виды топлива предлагается использовать разработку, представленную в [7] (рис. 2).

На основе статистической обработки рядов отчетных данных об изменении мировых и региональных цен на разные виды топлива определяется функциональная зависимость стоимости разных видов друг от друга, а также региональных цен от мировых. Этот анализ учитывается при формировании верхней и нижней границы возможного диапазона перспективной динамики цен на отдельные виды топлива по временным стадиям расчетного периода.

Рис. 2. Взаимосвязи блоков модели для прогнозирования динамики цен на топливо в регионе

Комментарии:

c_y – минимальные цены, топлива e (самофинансирования), u – себестоимость производства топлива e, руб./ед. прод., k – удельные капиталовложения, руб./ед. мощн., 0,12 – коэффициент эффективности капиталовложений, c_{ei} – цена топлива e, используемого потребителем i, руб./т у.т., R_{ei} – цена продукции i при использовании топлива e (одинаковая для всех производителей данного вида продукции), руб./ед.прод., b_{ei} – удельный расход топлива e на производство продукции i, т у.т./ед.прод., u_{ei} – себестоимость продукции i производимой технологией с использованием топлива e, но без топливной составляющей, руб./ед. прод., k_{ei} – удельные капиталовложения на прирост мощности на производство продукции i на топливе e, руб./ед. мощности, h_{ei} – число часов использования установленной мощности оборудования в году, ч, E – коэффициент дисконтирования, c_e – цена топлива e в регионе, руб./т у.т., $c_{вм}$ – цена топлива e экспортируемого в регион, руб./т у.т. [7].

Нижняя граница диапазона цен определяется теми минимальными ценами, с которыми отдельные энергетические компании могут выходить на региональный рынок (цены самофинансирования) c_y.[1] Верхняя граница определяется в зависимости от того, имеет регион возможности импорта/экспорта топлива, или нет. Если имеет, то она соответствует цене равной доходности с мировой (мировая цена минус транспортные расходы), а для изолированных регионов определяется на основе межтопливной конкуренции. Для этого по годам расчетного периода находятся такие равноэкономичные цены на разные виды топлива, использование которых обеспечивает равную цену производимой потребителем продукции c_{ei}. Далее, полученные в результате расчета по периодам прогноза равновесные и равноэкономичные цены сравниваются с ценами самофинансирования для формирования перспективных диапазонов цен на разные виды топлива.

Модель для прогноза цен построена с использованием регрессионных и расчетных методов, имеет блочную структуру и связи, показанные на рисунке 2. Результаты этого этапа используются для оценки ценовой эластичности спроса на топливо (см. п.2.3.2).

2.2. Метод определения прогнозной потребности в энергоносителях в регионе. Он является составной частью методологии исследования возможных траекторий динамики спроса на энергоносители в стране, описанной в [1]. Спрос в регионе определяется в предположении, что развитие отдельных регионов подчинено общей концепции развития страны (см.

[1] Для действующих объектов такая цена должна обеспечивать покрытие ежегодных издержек, уплату налогов и минимальную прибыль для нормального функционирования, а для новых включать и инвестиционную составляющую.

подробнее [36]). Поэтому считается, что тенденции изменения энергоемкости ВРП[2] и душевого энергопотребления одинаковы как для страны в целом, так и для региона (рис. 3). Особенности в энергопотреблении регионов учитываются существующими отчетными тенденциями, а также наличием принятых к реализации инвестиционных проектов, либо иными известными приоритетами (изменение демографической политики, задачами национальной безопасности и т.д.), которые могут значительно повлиять на изменение общероссийской тенденции.

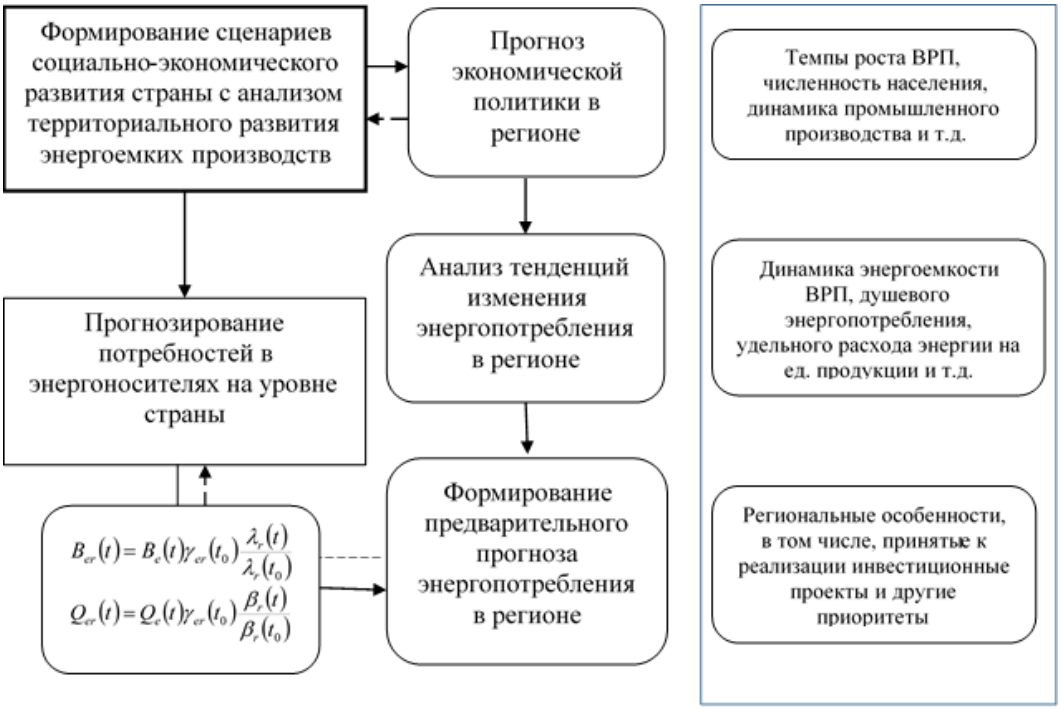


Рис. 3. Схема исследования и прогнозирования динамики потребности в энергоносителях в регионе

Комментарии:

$B_{er}(t)$, $Q_{er}(t)$ – потребность в энергоносителе e в регионе r в году t, соответственно производственной и непроизводственной сферы, $\gamma_{er}(t_0)$ – доля региона r в потреблении энергоносителя e в базовом году t_0 в производственной или непроизводственной сфере страны, λ_r – доля региона в общероссийском ВВП, β_r – доля региона в численности населения страны.

Исходной информацией для имитационной модели энергопотребления региона служат прогноз энергопотребления по стране в целом, полученный для выбранного сценария развития экономики и ТЭК, отчетные ряды экономических и энергетических показателей рассматриваемого региона, а также основные показатели программ и стратегий социально-экономической политики региона.

2.3. Выбор вариантов энерго- и топливоснабжения потребителей. Именно этот этап связан с оценкой влияния поведения потребителей. Основные положения решения этой задачи предложены в [37]. Особенность состоит в совместном взаимосвязанном рассмотрении системы потребления и энергоснабжения региона. Важной чертой является итерационное согласование результатов решения системы моделей разного уровня иерархии: системы энергоснабжения макрорегиона и региональных систем – энергоснабжения и энергопотребления (рис. 4). Возможные (N_r) уровни развития распределенной генерации (РГ) в разных секторах экономики системы энергопотребления (жилой и коммерческий сектор, промышленность,

[2] ВРП – валовой региональный продукт

транспорт) рассчитываются во взаимосвязи с ценой производства электроэнергии в энергосистеме (p), которая, в свою очередь, может меняться в зависимости от масштабов РГ (обратное, (корректирующее) влияние). Результаты, полученные для рассматриваемого региона, могут быть использованы для уточнения и возможного изменения структуры и стоимости производства электроэнергии в макрорегионе.

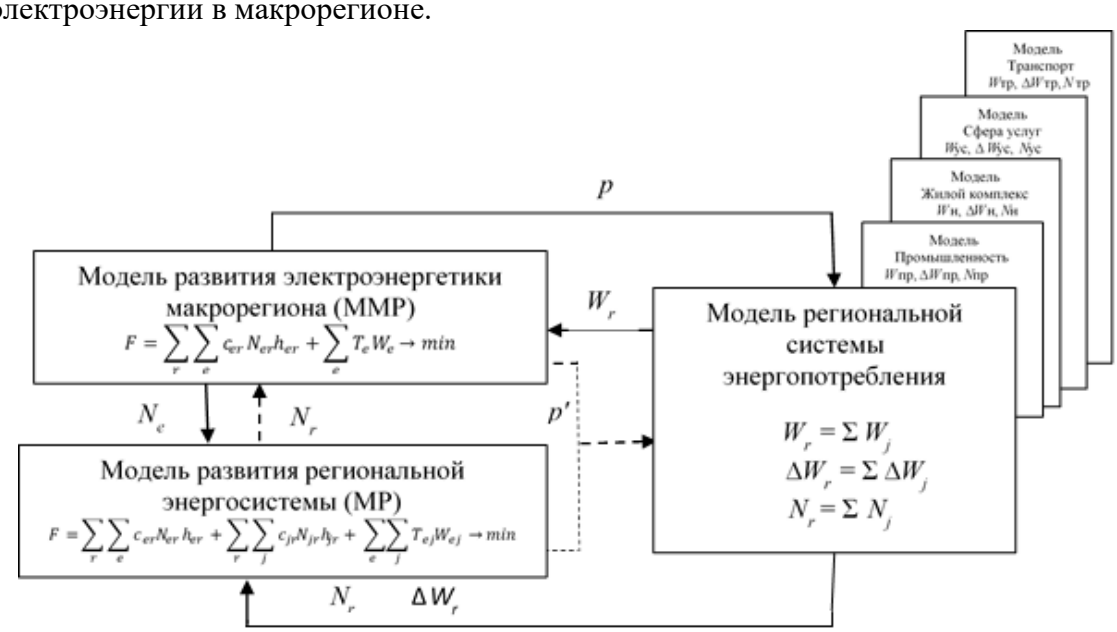


Рис. 4. Взаимосвязи моделей разного уровня иерархии для оценки влияния поведения потребителей на развитие распределенной генерации и на конъюнктуру региональных энергетических рынков

Комментарии:

c_{er} – приведенные затраты на выработку электроэнергии на станции типа e (руб/кВтч) на территории r, N_{er} – установленная мощность на электростанции типа e (кВт) на территории r, h_{er} – число часов использования установленной мощности на электростанции типа e (час) на территории r, c_{jr} – приведенные затраты на выработку электроэнергии установкой РГ типа j (руб/кВтч) на территории r, N_{jr} – установленная мощность установки РГ типа j (кВт) на территории r, h_{jr} – число часов использования установленной мощности установки РГ типа j (час), T_{ej} – тариф на передачу электроэнергии от электростанции типа e и установки РГ типа j (руб/кВтч), W_{ej} – объем передачи электроэнергии от электростанции типа e и установки РГ типа j (кВтч).

Реализация подхода предполагает использование оригинальных оптимизационных и имитационных моделей, учитывающих взаимозависимость развития систем энергопотребления и энергоснабжения.

2.3.1. Алгоритм для оценки влияния поведения потребителей на спрос на электроэнергию и развитие распределенной генерации в региональной системе электропотребления. Алгоритм представляет собой последовательность для определения объема потребления электроэнергии в регионе (W_r), возможной величины его снижения (ΔW_j), масштабов применения установок РГ (N_j). Для определения последних, удельные капитальные и эксплуатационные затраты определяются для каждого сектора отдельно с учетом их зависимости от масштаба развития РГ (более полное описание см. в [38]).

Предусматривается следующая последовательность: (1) находится максимально возможный уровень спроса на электроэнергию (W_r) для региональной энергосистемы как сумма потребности отдельных потребителей (W_j); (2) в соответствии с полученным значением цены

электроэнергии (p) в централизованной сети активные потребители и просьюмеры оптимизируют свое энергопотребление и формируют объем возможного его снижения (ΔW_r); (3) определяется величина задействованных мощностей РГ (N_r) (рис. 5).

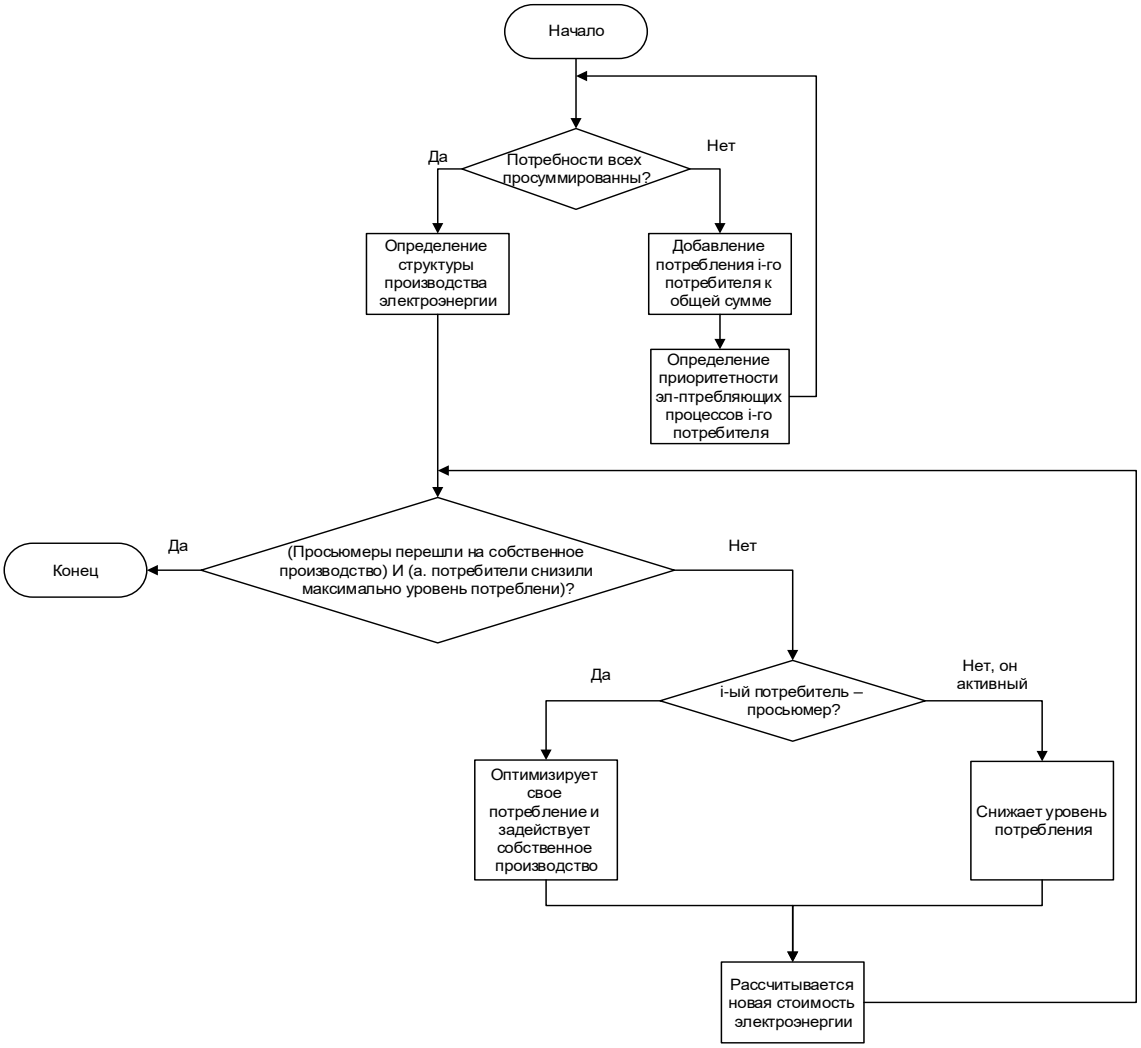


Рис. 5. Алгоритм для оценки влияния поведения потребителей на спрос на электроэнергию в регионе [38]

Эта информация передается в модель энергоснабжения региона МР, где определяется новая структура производства и стоимость электроэнергии (p'). При сравнении значений p и p' может потребоваться новая итерация расчетов.

Для каждого рассматриваемого потребителя в системе энергопотребления разрабатывается многоагентная модель, имитирующая его поведение в зависимости от разной стоимости электроэнергии в энергосистеме. Она позволяет оценить величину возможного снижения объемов потребления электроэнергии (ΔW_j) и развития собственных мощностей по производству энергии (N_j) при разной стоимости электроэнергии p. Модель состоит из набора агентов (рис. 6), каждый из которых описывает особенности функционирования отдельного энергопотребляющего или генерирующего устройства. Контроль и согласование их поведения осуществляет агент-менеджер. В нем находятся описания всех возможных сценариев взаимосогласованного поведения собственных энергопотребляющих и производящих процессов потребителя и возможных его взаимосвязей с централизованной энергосистемой. В зависимости от складывающейся ситуации в централизованной системе агент-менеджер посылает управляющие воздействия агентам потребления и генерации для реализации сценария, соответствующего интересам потребителя (см. подробнее [39]).

2.3.2. Оценка ценовой эластичности спроса на топливо (по группам потребителей). Для оценки на одной методической основе разработан набор моделей разных групп потребителей (электростанции, котельные, промышленность, транспорт) для отдельных регионов. Этой основой является совместное использование методов оптимизации и Монте-Карло. Первый метод используется для выбора рациональной структуры топливоснабжения потребителей, второй – для учета неопределенности будущих условий. Исходные технико-экономические, ценовые и другие показатели и ограничения задаются в виде интервалов их перспективных значений с возможностью задания вида распределения вероятности в этих интервалах. Последнее позволяет оценить влияние на решение качества имеющейся информации [40].

Рис.6. Принципиальная схема многоагентной модели просьюмера [39]

Для определения перспективной потребности в разных видах энергоресурсов отдельных потребителей (например, новых электростанций или крупных котельных) в предполагаемых в регионе условиях топливоснабжения, проводится серия из сотен модельных экспериментов (метод Монте-Карло), из которых формируется вариант с минимальной стоимостью производимой продукции потребителя. Полученные в результате объемы потребления того или иного вида топлива при разных значениях его стоимости позволяют определить коэффициенты ценовой эластичности спроса (показывает изменение потребности в энергоносителе при изменении его стоимости на 1%) для каждой группы потребителей. Региональная ценовая эластичность на тот или иной энергоресурс определяется на основе существующей структуры его потребления с учетом полученных коэффициентов эластичности для отдельных групп потребителей (табл.1).

Полученные коэффициенты региональной ценовой эластичности спроса на тот или иной ресурс позволяют оценить возможное снижение его потребления в регионах в перспективе при разной ценовой политике и при необходимости скорректировать прогноз на энергоносители, как на региональном уровне, так и на уровне страны.

Таблица 1. - Прогнозная ценовая эластичность спроса на природный газ в регионах России для разной временной перспективы и вероятности исходной информации

Регион	Краткосрочная перспектива		Долгосрочная перспектива	
	Интервальное распределение	Нормальное распределение	Интервальное распределение	Нормальное распределение
Европейская часть	-0,10	-0,04	-0,61	-0,50
Урал	-0,18	-0,12	-0,44	-0,31
Западная Сибирь	-0,48	-0,47	-0,60	-0,48
Восточная Сибирь	-1,29	-1,26	-1,28	-1,27
Дальний Восток (южная часть)	-0,78	-0,74	-0,88	-0,75

Примечание: суммарный перспективный спрос на газ в регионах определялся по основным группам потребителей и в предположении о неизменности структуры потребления газа в регионе.

Заключение. Особенностью очередного энергетического перехода является кардинальное изменение роли потребителя в энергосистеме, у которого появляется возможность управлять своим энергопотреблением, иметь собственные мощности по производству и хранению энергии, тем самым влиять на уровень спроса и цену в региональной энергетической системе. Особенности перехода обусловливают повышение значимости регионального уровня, где происходит непосредственное согласование интересов производителей и потребителей энергии. Предлагаемая многоэтапная методология позволяет определить взаимное влияние спроса и цен на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей и оценить региональную ценовую эластичность спроса на отдельные энергоресурсы. Для реализации в соответствии с целями каждого этапа разрабатывается набор моделей разного вида и уровня агрегирования, что позволяет проводить многовариантные расчеты с учетом качества имеющейся информации.

Дальнейшее развитие методологии предполагает разработку методов оценки и учета взаимозависимости цифровизации, децентрализации и декарбонации в долгосрочных прогнозах развития энергоснабжения регионов, что будет способствовать повышению обоснованности перспективных вариантов развития электроэнергетики и ТЭК.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0003 рег. № АААА-А21-121012090014-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. и при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-010-00204.

Список источников

1. Гальперова Е.В. Методология исследования долгосрочной динамики спроса на энергоносители для повышения обоснованности перспектив развития ТЭК: состав задач, методы и модели / Е.В. Гальперова // Изв. РАН. Энергетика, 2021. – № 1. – С. 101-108. – DOI: 10.31857/S0002331021010064.
2. Филиппов С.П. Долгосрочное прогнозирование спроса на энергию на основе системного анализа / С.П. Филиппов, В.А. Малахов, Ф.В. Веселов // Теплоэнергетика, 2021. – № 12. – С. 5-19. – DOI:10.1134/S0040363621120043.
3. Гальперова Е.В. Использование стенда моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители / Е.В. Гальперова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2016. – № 4-2. – С. 17-27.
4. Bhattacharyya, Subhes C. and Timilsina, Govinda R. Energy Demand Models for Policy Formulation: A Comparative Study of Energy Demand Models (March 1, 2009). World Bank Policy Research Working Paper No. 4866, available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=1368072 (accessed 23.08.2022).
5. Suganthi L., Anand A. Samuel. Energy models for demand forecasting – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (2012), pp. 1223-1240.
6. Беляев Л.С. Системные исследования проблем энергетики / Л.С. Беляев, Б.Г. Санеев, С.П. Филиппов и др.; Под. ред. Н.И. Воропая. – Новосибирск: Наука. Сибирская фирма РАН, 2000. – 558 с.
7. Кононов Ю.Д. Методы и модели прогнозных взаимосвязей энергетики и экономики / Ю.Д. Кононов, Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов и др. – Новосибирск: Наука, 2009. – 179 с.
8. Системные исследования в энергетике: методология и результаты /Под ред. А.А. Макарова, Н.И. Воропая. – М.: ИНЭИ РАН, 2018. – 309 с.
9. Макаров А.А. SCANER — модельно-информационный комплекс / АА. Макаров, Ф.В. Веселов, О.А. Елисеева и [др.] – М.: ИНЭИ РАН, 2011. – 72 с.
10. Long range Energy Alternatives Planning (LEAP) System. Available at: https://openei.org/wiki/ Long_range_Energy_Alternatives_Planning_(LEAP)_System. (accessed: 3.08.2022).
11. POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. Available at: https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html (accessed: 3.08.2022).

12. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. – U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585, 75 p., available at: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview /pdf/0581(2018).pdf (accessed:03.08.2022).
13. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / Под ред. Е.В. Фортова, А.А. Макарова. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012. – 235 с.
14. Кузьмин П.С. Активные потребители электроэнергии: обзор инновационных моделей взаимодействия субъектов электроэнергетики и конечных потребителей / П.С. Кузьмин // Стратегические решения и риск-менеджмент, 2022. – №12(4). – С. 306–321. – DOI: 10.17747/2618-947X-2021-4-306-321.
15. 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.
16. 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.
17. 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, no. 1, pp. 120–133.
18. Воропай Н.И. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей / Н.И. Воропай, З.А. Стычински, Е.В. Козлова [и др.] // Известия РАН. – Энергетика. – 2014. – №1. – С.84–90.
19. Айзенберг Н.И. Координация взаимодействия электроснабжающей организации и активных потребителей при оптимизации суточных графиков нагрузки / Н.И. Айзенберг, Е.В. Сташкевич, Н.И. Воропай // Известия РАН. – Энергетика, 2016. – №3. – С. 44–54.
20. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. – Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. – 280 с.
21. Илюшин П.В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети: монография / Илюшин П.В. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2020. – 116 с.: ил., – DOI: 10.34831/EP.2020.260.8.001.
22. Mateo C., Frías P., Tapia-Ahumada K. A comprehensive techno-economic assessment of the impact of natural gas-fueled distributed generation in European electricity distribution networks. Energy 192 (2020) 116523.
23. Matosa S.P.S., Vargas M.C., Fracalossi L.G.V., Encarnaç˜ao L.F., Batista O.E. Protection philosophy for distribution grids with high penetration of distributed generation. Electric Power Systems Research 196 (2021) 107203.
24. Ali Ehsan, Qiang Yang. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. Applied Energy 210 (2018) 44-59.
25. Косарев Б.А. Оптимизация функционирования электротехнической системы с распределенной генерацией / Б.А. Косарев, Г.А. Кощук, В.К. Федоров [и др.] // Актуальные вопросы энергетики, 2019. – № 1. – с. 99-103.
26. Chenjie Maa, Johannes Dasenbrocka, J.-Christian Töbermanna, Martin Braun. A novel indicator for evaluation of the impact of distributed generations on the energy losses of low voltage distribution grids. Applied Energy 242 (2019) 674-683.
27. Шарыгин М.В. Адаптивная релейная защита электрических сетей с источниками распределенной генерации / М.В. Шарыгин, А.Л. Куликов, В.Ю. Вуколов [и др.] // Изв. РАН. Энергетика, 2020. – № 3. – С. 60-68. – DOI: 10.31857/S000233102003005X.
28. Солнцев Е.Б. Анализ качества электроэнергии (колебаний напряжения) при распределенной генерации / Е.Б. Солнцев, А.М. Мамонов, А.Н. Фитасов [и др.] // Энергобезопасность и энергосбережение, 2019. – № 3. – С. 37-40.
29. Булатов Ю.Н. Математические модели для определения предельных режимов в электрических сетях с установками распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, А.В. Черепанов //Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2020. – № 4 (80). – С. 17-36.
30. Куликов А.Л. Применение дискриминаторных методов для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации / А.Л. Куликов, П.В. Илюшин, П.С. Пелевин // Электричество. – 2019. – № 7. – С. 22-35.
31. Папков Б.В. Особенности оценки структурной надежности систем с объектами распределенной генерации / Б.В. Папков, В.Л. Осокин // Известия РАН. Энергетика, 2020. – № 2. – С. 75-84. – DOI: 10.31857/S0002331020020090.
32. Варганова А.В. Технико-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации / А.В. Варганова, Ю.М. Байрамгулова, И.Н. Гончарова [и др.] // Электротехнические системы и комплексы, 2019. – № 3 (44). – С. 68-72.
33. Surender Singh Tanwara, D.K. Khatod. Techno-economic and environmental approach for optimal placement and sizing of renewable DGs in distribution system. Applied Energy 127 (2017) 52-67.

34. Филиппов С.П. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов / С.П. Филиппов, М.Д. Дильман, П.В. Илюшин // Теплоэнергетика, 2019. – № 12. – С. 4-17.
35. Кононов Ю.Д. Пути повышения обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК / Ю.Д. Кононов – Новосибирск: Наука, 2015. – 147 с.
36. Гальперова Е.В. Особенности прогнозирования энергопотребления на региональном уровне / Е.В. Гальперова // Изв. РАН. Энергетика, 2004. – № 4. – С. 61-66.
37. Гальперова Е.В. Метод и модели для оценки влияния развития распределенной генерации на спрос и цену электроэнергии в регионе / Е.В. Гальперова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 3 (23). – С. 101- 116. – DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.009.
38. Гальперова Е.В. Применение интеллектуальных методов для моделирования влияния новых факторов в развитии энергетики на спрос на электроэнергию / Е.В. Гальперова, В.И. Гальперов, В.И. Локтионов [и др.] // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – № 1 (13). – С. 16-29. – DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02.
39. Гальперова Е.В. Моделирование поведения активного потребителя на основе агентного подхода / Е.В. Гальперова, В.И. Гальперов //Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2017. – № 4(8). – С. 28-38.
40. Гальперова Е.В. Комплекс моделей для долгосрочного прогнозирования конъюнктуры региональных энергетических рынков / Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов, В.Н. Тыртышный // Труды XIX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть I. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – С.14-21.

Гальперова Елена Васильевна. *Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. ЛА. Мелентьева. Основные научные интересы: исследование и долгосрочное прогнозирование динамики и структуры энергопотребления, конъюнктуры региональных энергетических рынков с учетом научно-технологического прогресса, качества жизни населения, ценовых и экологических показателей и ограничений. AuthorID: 73970, SPIN: 5744-2377, ORCID: 0000-0001-6749-8630, galper@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова 130.*

UDC 338.27:51-74
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.001

Consumer behavior-informed methodology for studying and making long-term projections of the state of regional energy markets: its tasks, approaches, algorithms, and models

Elena V. Galperova
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS
Russia, Irkutsk, *galper@isem.irk.ru*

Abstract. The relevance of the article is due to the importance of the study of the relationship between demand and prices in regional energy markets for the purposes of forming the long-term dynamics of energy demand and working out strategic decisions in the field of energy and economic security of the country and its regions. The need to develop new approaches to study the long-term state of regional energy markets is caused, among other things, by the latest in a series of energy transitions that is ongoing in the world. One of the main features of the transition is that consumers have the ability to control their energy consumption, to have energy production and storage capacity, and to interact with the power system. These new properties of consumers are changing the very system of energy supply and pricing in the energy sector.

This study describes the multi-stage methodological approach developed by the author. Each stage of the approach consists of the successive solving of an individual problem or several problems of varying importance and complexity, for each of which we have developed dedicated methods and models. The key defining feature of the approach is the possibility to return (if necessary) to the previous stage to adjust conditions or parameters. A unique feature of the approach is the joint interrelated treatment of the system of consumption and energy supply of the region and the iterative alignment of decisions made at the regional level with the energy supply system of the higher territorial level. The proposed multi-stage methodology makes it possible to determine the mutual influence of demand and prices in regional energy markets, taking into account consumer behavior and evaluates the regional price elasticity of demand for certain energy resources. This will enable one to adjust the long-term

dynamics of demand for energy and will contribute to improving the validity of future options of development of the power industry and energy sector.

Keywords: energy carriers, demand, consumers, distributed generation, modeling, consumption system, price

Acknowledgements: The study was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0003) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 (reg. no AAAA-A21-121012090014-5), some results were obtained with partial funded by RFBR project no 20-010-00204.

References

1. Galperova E.V. Metodologiya issledovaniya dolgosrochnoj dinamiki sprosa na energonositeli dlya povysheniya obosnovannosti perspektiv razvitiya TEK: sostav zadach, metody i modeli [A Methodology for Studying the Long-Term Dynamics of Demand for Energy Carriers with a View to Improving the Validity of Energy Sector Development Prospects: the Set of Tasks, Methods, and Models]. Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series], 2021, no. 1, pp. 101-108, DOI: 10.31857/S0002331021010064.
2. Filippov S.P., Malahov V.A., Veselov F.V. Dolgosrochnoe prognozirovanie sprosa na energiyu na osnove sistemnogo analiza [Long-term forecasting of energy demand based on system analysis]. Teploenergetika [Thermal Engineering], 2021, no. 12, pp. 5-19, DOI:10.1134/S0040363621120043.
3. Galperova E.V. Ispol'zovanie stenda modelej dlya dolgosrochnogo prognozirovaniya rynochnogo sprosa na energonositeli [Set of models for long-term forecasting of market energy demand]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2016, no. 4-2, pp. 17-27.
4. Bhattacharyya, Subhes C. and Timilsina, Govinda R. Energy Demand Models for Policy Formulation: A Comparative Study of Energy Demand Models (March 1, 2009). World Bank Policy Research Working Paper No. 4866, available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=1368072 (accessed 23.08.2022).
5. Suganthi L., Anand A. Samuel. Energy models for demand forecasting – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (2012), pp. 1223-1240.
6. Belyayev L.S. Sistemnye issledovaniya problem energetiki [Systematic studies of energy problems]. Ed. by N.I. Voropay, Novosibirsk, Nauka, Sibirskaya firma RAN [Science. Siberian firm RAS], 2000, 558 p.
7. Kononov Yu.D., Galperova E.V., Kononov D.Yu. i dr. Metody i modeli prognoznyh vzaimosvyazej energetiki i ekonomiki [Methods and models for projections of energy-economy interactions]. Novosibirsk, Nauka [Science], 2009, 178 p.
8. Sistemnye issledovaniya v energetike: metodologiya i rezul'taty [Energy systems analysis: methodology and research findings] Ed. by A.A. Makarov, N.I. Voropay, Moscow, INEI RAN, 2018, 309 p.
9. Makarov AA., Veselov F.V., Eliseeva O.A., Kulagin V.A., Malahov V.A., Mitrova T.A., Filippov S.P. SCANER — model'no-informacionnyj kompleks [SCANER - model-information complex]. Moscow, INEI RAN, 2011, 72 p.
10. Long range Energy Alternatives Planning (LEAP) System. Available at: https://openei.org/wiki/ Long_range_Energy_Alternatives_Planning_(LEAP)_System. (accessed: 03.08.2022).
11. POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. Available at: https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html (accessed:03.08.2022).
12. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. – U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585, 75 p., available at: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview /pdf/0581(2018).pdf (accessed:03.08.2022).
13. Koncepciya intellektual'noj elektroenergeticheskoj sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoj set'yu [The concept of an intelligent electric power system in Russia with an active-adaptive grid]. Ed. by E.V. Fortov, A.A. Makarov, Moscow, OAO «FSK EES», 2012, 235 p.
14. Kuz'min P.S. Aktivnye potrebiteli elektroenergii: obzor innovacionnyh modelej vzaimodejstviya sub"ektov elektroenergetiki i konechnyh potrebitelej [Active electricity consumers: a review of innovative models of interaction between subjects of the electric power industry and final consumers]. Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment [Strategic decisions and risk management], 2022, no. 12(4), pp. 306-321, DOI: 10.17747/2618-947X-2021-4-306-321.
15. 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.
16. 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.
17. 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, no. 1, pp. 120-133.

18. 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 for active consumers]. Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series], 2014, no. 1, pp.84-90.
19. Ajzenberg N.I., Stashkevich E.V., Voropaj N.I. Koordinaciya vzaimodejstviya elektrosnabzhayushchej organizacii i aktivnyh potrebitelej pri optimizacii sutochnyh grafikov nagruzki [Coordination of interaction between the power supply organization and active consumers in the optimization of daily load schedules]. Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series], 2016, no. 3, pp. 44-54.
20. Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. Osobennosti raschetov rezhimov v energorajonah s raspredelennoj generaciej [Peculiarities of mode calculations in power districts with distributed generation]. N. Novgorod, NIU RANHiGS, 2018, 280 p.
21. Ilyushin P.V. Perspektivy primeneniya i problemnye voprosy integracii raspredelennyh istochnikov energii v elektricheskie seti [Prospects for application and problematic issues of integration of distributed energy sources into electrical networks], Moscow, NTF «Energoprogress», 2020, 116 p., DOI: 10.34831/EP.2020.260.8.001.
22. Mateo C., Frías P., Tapia-Ahumada K. A comprehensive techno-economic assessment of the impact of natural gas-fueled distributed generation in European electricity distribution networks. Energy 192 (2020) 116523.
23. Matosa S.P.S., Vargas M.C., Fracalossi L.G.V., Encarnaç˜ao L.F., Batista O.E. Protection philosophy for distribution grids with high penetration of distributed generation. Electric Power Systems Research 196 (2021) 107203.
24. Ali Ehsan, Qiang Yang. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. Applied Energy 210 (2018) 44-59.
25. Kosarev B.A., Koshchuk G.A., Fedorov V.K., Lysenko O.A. Optimizaciya funkcionirovaniya elektrotekhnicheskoj sistemy s raspredelennoj generaciej [Optimization of the functioning of an electrical system with distributed generation]. Aktual'nye voprosy energetiki [Current Energy Issues], 2019, no. 1, pp. 99-103.
26. Chenjie Maa, Johannes Dasenbrocka, J.-Christian Töbermanna, Martin Braun. A novel indicator for evaluation of the impact of distributed generations on the energy losses of low voltage distribution grids. Applied Energy 242 (2019) 674-683.
27. Sharygin M.V., Kulikov A.L., Vukolov V.YU., Petrov A.A. Adaptivnaya relejnaya zashchita elektricheskih setej s istochnikami raspredelennoj generacii [Adaptive relay protection of electrical networks with sources of distributed generation]. Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series], 2020, no. 3, pp. 60-68, DOI: 10.31857/S000233102003005X.
28. Solncev E.B., Mamonov A.M., Fitasov A.N., Petrickij S.A., Sevost'yanov A.A. Analiz kachestva elektroenergii (kolebanij napryazheniya) pri raspredelennoj generacii [Analysis of power quality (voltage fluctuations) in distributed generation]. Energobezopasnost' i energosberezhenie [Energy security and energy saving], 2019, no. 3, pp. 37-40.
29. Bulatov YU.N., Kryukov A.V., CHerepanov A.V. Matematicheskie modeli dlya opredeleniya predel'nyh rezhimov v elektricheskih setyah s ustanovkami raspredelennoj generacii [Mathematical models for determining the limit modes in electrical networks with distributed generation installations]. Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University], 2020, no. 4 (80), pp. 17-36.
30. Kulikov A.L., Ilyushin P.V., Pelevin P.S. Primenenie diskriminatornyh metodov dlya ocenki parametrov rezhima energorajonov s ob"ektami raspredelennoj generacii [Application of discriminatory methods for estimating the mode parameters of energy districts with distributed generation objects]. Elektrichestvo [Electricity], 2019, no. 7, pp. 22-35.
31. Papkov B.V., Osokin V.L. Osobennosti ocenki strukturnoj nadezhnosti sistem s ob"ektami raspredelennoj generacii [Features of assessing the structural reliability of systems with distributed generation facilities]. Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series], 2020, no. 2, pp. 75-84, DOI: 10.31857/S0002331020020090.
32. Varganova A.V., Bajramgulova YU.M., Goncharova I.N., Krotkova O.A. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie mesta ustanovki istochnikov raspredelennoj generacii [Feasibility study of the installation site of distributed generation sources]. Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy [Electrical systems and complexes], 2019, no. 3 (44), pp. 68-72.
33. Surender Singh Tanwara, D.K. Khatod. Techno-economic and environmental approach for optimal placement and sizing of renewable DGs in distribution system. Applied Energy 127 (2017) 52-67.
34. Filippov S.P., Dil'man M.D., Ilyushin P.V. Raspredelennaya generaciya i ustojchivoe razvitie regionov [Distributed generation and sustainable development of regions]. Teploenergetika [Thermal Engineering], 2019, no. 12, pp. 4-17.
35. Kononov Yu.D. Puti povysheniya obosnovannosti dolgosrochnyh prognozov razvitiya TEK [Approaches to improve the validity of long-term projections of the energy sector]. Novosibirsk, Nauka [Science], 2015, 147 p.

36. Galperova E.V. Osobennosti prognozirovaniya energopotrebleniya na regional'nom urovne [Features of forecasting energy consumption at the regional level]. Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series], 2004, no. 4, pp. 61-66.
37. Galperova E.V. Metod i modeli dlya ocenki vliyaniya razvitiya raspredelennoj generacii na spros i cenu elektroenergii v regione [Method and models for assessing the impact of the development of distributed generation on the demand and price of electricity in the region]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 3 (23), pp. 101-116, DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.009.
38. Galperova E.V., Galperov V.I., Loktionov V.I., Makagonova N.N. Primenenie intellektual'nyh metodov dlya modelirovaniya vliyaniya novyh faktorov v razvitii energetiki na spros na elektroenergiyu [Application of intellectual methods for modeling of the influence of new factors of energy sector development on electricity demand]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 1 (13), pp. 16-29, DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02.
39. Galperova E.V., Galperov 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 [Information and mathematical technologies in science and management], 2017, no. 4 (8), pp. 28-38.
40. Galperova E.V., Kononov D.Yu., Tyrtyshnyj V.N. Kompleks modelej dlya dolgosrochnogo prognozirovaniya kon"yunktury regional'nyh energeticheskih rynkov [A set of models for long-term forecasting of the conjuncture of regional energy markets]. Trudy XIX Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii «Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii». CHast' I [Proceedings of the XIX Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management". Part I], Irkutsk, ISEM SO RAN, 2014, 175 p., pp.14-21.

Elena V. Galperova. *Ph. D., Associate Professor, Senior researcher of Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Russia, Irkutsk. Her main research interests: long-term forecasting of regional energy markets, and research of energy consumption patterns, projections of energy demand taking into account technological patterns, standards of living, price and ecological indicators. AuthorID: 73970, SPIN: 5744-2377, ORCID: 0000-0001-6749-8630, galper@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, st. Lermontov 130.*

Статья поступила в редакцию 09.09.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022; принята к публикации 25.11.2022.
The article was submitted 09/09/2022; approved after reviewing 09/14/2022; accepted for publication 11/25/2022

УДК 621.311.001.57
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.002

Методический подход к построению программной платформы для управления развитием интегрированных энергетических систем

Стенников Валерий Алексеевич, Барахтенко Евгений Алексеевич,
Соколов Дмитрий Витальевич, Майоров Глеб Сергеевич
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *mayorovgs@isem.irk.ru*

Аннотация. В настоящее время активно развивается направление, связанное с исследованием интегрированных энергетических систем. Это направление рассматривает различные типы систем (электро-, тепло-, хладо-, газоснабжения и др.), как подсистемы единой системы, и позволяет получить преимущества в сравнении с традиционными подходами к исследованию энергетических систем, в которых эти системы рассматриваются независимо друг от друга. В статье предложен методический подход к организации единого информационного пространства для решения задач развития интегрированных энергетических систем в виде единой программной платформы. Этот подход включает в себя следующие составляющие: принципы построения платформы; архитектуру платформы; технологии и инструментальные средства разработки для реализации платформы; базовую структуру библиотеки программных компонентов, их интерфейсы и механизмы интеграции в платформу. В процессе построения программной системы предложено использовать онтологии, которые используются для решения следующих задач: автоматическая интеграция программных компонентов в программную среду AnyLogic; автоматизированное построение программной системы для решения задачи управления развитием интегрированных энергетических систем; применение программной платформы при решении практических задач. В соответствии с предложенным методическим подходом реализован прототип программной платформы. Продемонстрировано решение задачи развития на примере схемы интегрированной энергетической системы. Представлены результаты вычислительного эксперимента на тестовой схеме интегрированной энергетической системы, который проведен с использованием разработанного программного прототипа. В результате выполненного эксперимента на разработанной мультиагентной модели удалось сформировать оптимальную схему интегрированной энергетической системы для энергоснабжения потребителей с учетом системных условий и ограничений.

Ключевые слова: интегрированные энергетические системы, мультиагентный подход, программная платформа, онтологии, моделирование

Цитирование: Стенников В.А. Методический подход к построению программной платформы для управления развитием интегрированных энергетических систем / В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Д.В. Соколов, Г.С. Майоров // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 19-31. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.002.

Введение. В настоящее время во всем мире широко развивается направление, связанное с исследованием интегрированных энергетических систем (ИЭС), поскольку данное направление рассматривает различные типы систем (электро-, тепло-, хладо-, газоснабжения и др.), как подсистемы единой системы и позволяет получить значительные преимущества, в сравнении с традиционными подходами к исследованию энергетических систем, в которых эти системы рассматриваются независимо друг от друга. Основными целями технологической интеграции и интеллектуализации энергетических систем являются достижение более высокого уровня управления с целью обеспечения высокого уровня комфорта в жилых, общественных и производственных зданиях, обеспечения экономичности энергоснабжения, снижения негативного воздействия на окружающую среду [1]. ИЭС сочетают многокомпонентность, эффективность, надежность, управляемость, гибкое использование технологий преобразования, транспорта, хранения энергии и предполагают участие активного потребителя в процессе энергоснабжения [2].

С ростом количества возобновляемых источников энергии и числа активных потребителей необходимы новые принципы построения энергетических систем и управления ими, учитывающие сложный характер поведения и взаимодействия объектов этих систем.

Решение комплекса задач управления развитием ИЭС необходимо выполнять в рамках единого информационного пространства на базе единой программной платформы. Для разработки такой платформы сформулированы следующие требования к методическому и информационно-вычислительному инструментарию для управления развитием ИЭС:

- моделирование интегрированных систем с различным составом входящих в них типов систем энергоснабжения, оборудования и набором графических и математических моделей;
- проведение научных исследований в области разработки методического обеспечения для решения задач управления развитием ИЭС;
- унифицированное представление данных, которое сделает возможным их использование при решении задач графического и математического моделирования ИЭС;
- организация единого информационного пространства на базе единой программной платформы;
- выполнение сложных инженерных расчетов по поиску оптимальных путей преобразования ИЭС с целью повышения эффективности и надежности их функционирования;
- учет при решении задач развития ИЭС наличия множества центров принятия решений по снабжению энергией различного вида с возможностью преобразования из одного вида в другой;
- необходимость рассмотрения большого количества элементов со сложным поведением.

На основе сформулированных требований сделан вывод о необходимости разработки единой программной платформы, для реализации которой требуется создание новых методических подходов к построению программного обеспечения (ПО). Методические подходы, традиционно применяемые при разработке ПО для моделирования систем энергетики, не могут быть использованы при реализации этой платформы, что вызвано следующими причинами.

1. Отсутствует возможность применения гибких схем организации вычислительного процесса и замены элементов программной системы, учета особенностей конкретной системы и используемого для ее построения широкого спектра энергетического оборудования.

2. Отсутствует четкое разделение на методы (алгоритмы, методики) решения прикладных задач и математические модели элементов систем энергетики. В результате программные модули, реализующие алгоритмы, становятся ориентированными на конкретные системы энергетики, классы задач и набор оборудования, что значительно затрудняет их настройку на конкретную решаемую задачу и многократное использование при построении различных программных систем.

3. Отсутствует возможность для исследователя создавать свои модели элементов и интегрировать их в ПО при проведении научных или инженерных расчетов. Происходит многократное дублирование одной и той же модели элемента системы в различных вычислительных модулях, поэтому в случае корректировки модели необходимо вносить изменения во все программные модули.

4. Схема взаимодействия между вычислительными модулями скрыта в программном коде управляющего модуля программной системы, что значительно затрудняет понимание и развитие алгоритма решения задачи. При возникновении необходимости любого преобразования управляющего алгоритма программной системы требуется внесение изменений в существующий или создание нового управляющего модуля.

1. Методический подход к построению программной платформы. В связи с развитием вычислительной техники и ее широким использованием при решении различных задач возникает потребность в теоретических работах по принципам разработки

программного обеспечения. При разработке программного обеспечения широко используются работы таких специалистов, как А.П. Ершов [3], Смит [4], Буч [5-6], Бек [7], Мартин [8], Фаулер [9] и др. В настоящее время активно разрабатываются подходы, ориентированные на автоматизацию этапов разработки программного обеспечения [10-11 и др.].

Разработан оригинальный методологический подход к построению программной платформы для решения задач проектирования ИЭС. Подход включает в себя следующие компоненты: 1) принципы построения платформы; 2) архитектуру платформы; 3) технологии и инструментальные средства разработки для реализации платформы; 4) базовую структуру библиотеки программных компонентов, их интерфейсы и механизмы интеграции в платформу.

Для преодоления перечисленных ранее трудностей предложены следующие принципы разработки ПО для развития ИЭС:

- Решение комплекса задач необходимо выполнять в рамках единого программного инструмента, который обеспечит единое информационное пространство для всего комплекса решаемых задач по развитию ИЭС.
- Реализация ПО должна основываться на современных информационных технологиях и подходах к программированию.
- ПО должно быть построено на базе парадигмы компонентного программирования, что обеспечит возможность представления методов, алгоритмов и моделей в виде элементов программного фонда, пригодных для многократного использования.
- Программные компоненты должны обладать стандартизированными в рамках единого программного инструмента программными интерфейсами с описанием подпрограмм, форматов входных и выходных данных.
- При разработке ПО использовать в его составе в качестве программных компонентов только свободно распространяемое ПО.
- Моделирование ИЭС на основе мультиагентного подхода [12-14] и цифровых технологий, что позволит представить такую технологически сложную систему в виде совокупности агентов, обладающих своим индивидуальным поведением и взаимодействующих друг с другом для поиска решений.

Предложенная архитектура программной платформы для развития ИЭС включает следующие составляющие (см. рис. 1):

1. *Графическая среда AnyLogic*. Предназначена для работы с графическими изображениями схем ИЭС и данными по элементам их схем на плане местности. Эта система отвечает за работу пользователя системы с активной моделью ИЭС, и позволяет ему просматривать данные в удобном для восприятия виде и вносить необходимые изменения. Графическая подсистема состоит из программных компонентов, реализующих взаимодействие пользователя с системой и компонентов-моделей, реализующих графические модели элементов ИЭС [3-4].

2. *Вычислительная подсистема*. Эта подсистема предназначена для решения расчетно-аналитических задач и состоит из библиотеки программных компонентов. Библиотека программных компонентов включает следующие составляющие: универсальные программные компоненты, реализующие методы и алгоритмы решения прикладных задач; программные компоненты, реализующие модели элементов ИЭС.

Системы энергоснабжения определенного типа обладают характерными для этого типа свойствами, составом прикладных задач и используемым для их решения специализированным ПО. Знания о них необходимо сохранить в форме, пригодной для обработки программными системами, и использовать при решении различных задач развития. Для этого необходимо организовать хранение этих знаний в виде онтологий [15-17].

В процессе автоматического построения программной системы используются онтологии, которые позволяют формализовано описать объекты предметной области, их свойства и взаимосвязи между этими объектами. Онтологии используются для решения следующих задач: автоматическая интеграция программных компонентов в программную среду AnyLogic; автоматизированное построение программной системы для решения задачи управления развитием ИЭС; применение программной платформы при решении задач управления развитием ИЭС.

Рис. 1. Архитектура программной платформы для управления развитием интегрированных энергетических систем: ВСС – водоснабжающая система; ТСС – теплоснабжающая система; ЭСС – электроснабжающая система

Онтологии ИЭС. Построение программной системы для работы с конкретной ИЭС осуществляется в автоматизированном режиме на основе знаний о системах энергоснабжения, входящих в состав моделируемой ИЭС, из соответствующей онтологии ИЭС. Онтологии ИЭС включают описания элементов систем энергоснабжения и свойств этих элементов.

Онтология задач. Знания о задачах используются для настройки компьютерной модели ИЭС на конкретную прикладную задачу и автоматизации процесса подготовки данных для вызова необходимых программных компонентов. Хранение этих знаний организовано в онтологии задач, которая содержит описание прикладных задач и методов их решения, описание алгоритмов, перечисление параметров, являющихся исходными данными и параметров, получаемых в результате решения задачи.

Онтология ПО. Онтология ПО предназначена для хранения знаний, необходимых для автоматизации построения и использования ПО. Эта онтология содержит описание:

- программных компонентов, используемых для построения программной системы;
- метаданных (входные и выходные параметры, описание форматов данных);
- технологий и интерфейсов доступа к программным компонентам.

Определены основные технологии для построения платформы, которые включают: объектно-ориентированное программирование, компонентное программирование, метапрограммирование, технологии реляционных баз данных, классические алгоритмы

компьютерной графики, инженерию знаний, ГИС-технологии, теорию графов, программную инженерию, технологии интеграции разноязыковых программ. Программная среда AnyLogic используется в качестве инструмента, организующего графический интерфейс для работы с моделью ИЭС и проведение моделирования на основе мультиагентного подхода [5-7].

Предложен оригинальный подход к построению интерфейсов программных компонентов, заключающийся в стандартизации их интерфейсов за счет применения паттернов проектирования. Компоненты платформы, в зависимости от выполняемых функций, разделены на группы. Для каждой группы компонентов разработаны интерфейсы взаимодействия между компонентами, включая правила их вызова, передачи параметров и результатов расчётов. Выделены следующие группы компонентов:

- вычислительные компоненты, содержащие программные реализации алгоритмов для математического моделирования и оптимизации ИЭС;
- системные компоненты, которые обеспечивают подготовку и экспертизу данных;
- управляющие компоненты, предназначенные для организации последовательности вызовов вычислительных и системных компонентов.

2. Моделирование ИЭС на базе программной платформы. В соответствии с предложенным методическим подходом разработан прототип программной платформы для решения задач развития ИЭС. На базе этой платформы выполнено моделирование ИЭС. В программной среде AnyLogic сформирована мультиагентная модель ИЭС. Мультиагентный подход является актуальным инструментом для моделирования и исследования ИЭС, данный подход успешно используется учеными во всем мире для решения задач различной сложности и размерности [18-20]. Мультиагентный подход находит широкое применение в таких областях, как распределенное решение сложных задач, совмещенное проектирование изделий, реинжиниринг бизнеса, построение виртуальных предприятий, имитационное моделирование интегрированных производственных систем и электронная торговля. Мультиагентные технологии направлены на получение решения в результате взаимодействия множества самостоятельных целенаправленно действующих агентов. Укрупненная структура мультиагентной системы, разработанная для исследования взаимодействия объектов при решении задачи развития ИЭС представлена на рис. 2. Решение задачи развития моделируемой ИЭС выполняется с использованием программных компонентов вычислительной подсистемы. Интеграция этих программных компонентов в рамках единого вычислительного процесса выполняется динамически на основе знаний из онтологий.

Все объекты в рассматриваемой ИЭС можно разделить на три группы: потребители, сети и источники энергии. Каждый объект представлен своим агентом, отражающим его поведение в системе, связи с другими агентами, характеристики, параметры и индивидуальные ограничения. Иерархия взаимодействия агентов описывается тремя уровнями. На первом уровне – уровне развития – находится агент развития и его вспомогательные локальные агенты: агент развития источников энергии; агент развития сетей; агент формирования схемы.

Агенты уровня развития осуществляют подготовку данных для расчета схемы, производят формирование избыточной схемы ИЭС и отправляют необходимые данные на уровень расчета, затем производят анализ полученных данных по найденному решению и формируют решение по развитию ИЭС, также они выводят статистику пользователям в виде графиков и диаграмм.

Второй и третий уровни функционирования объектов объединены в уровне расчета. На втором уровне находятся координирующие агенты: сетевой агент централизованной системы и сетевые агенты распределенных подсистем. Сетевой агент централизованной системы осуществляет координацию и надзор за формированием решения для объектов централизованной генерации. Он обменивается информацией с агентом развития и сетевыми

агентами распределенных подсистем. Координацию и контроль источников распределенной генерации, которые находятся у активных потребителей, осуществляют сетевые агенты распределенных подсистем. Они, в свою очередь, обмениваются данными по сформированному решению с агентом развития и сетевым агентом централизованной системы. При необходимости сетевой агент централизованной системы и сетевые агенты распределенных подсистем осуществляют корректировку полученных решений.

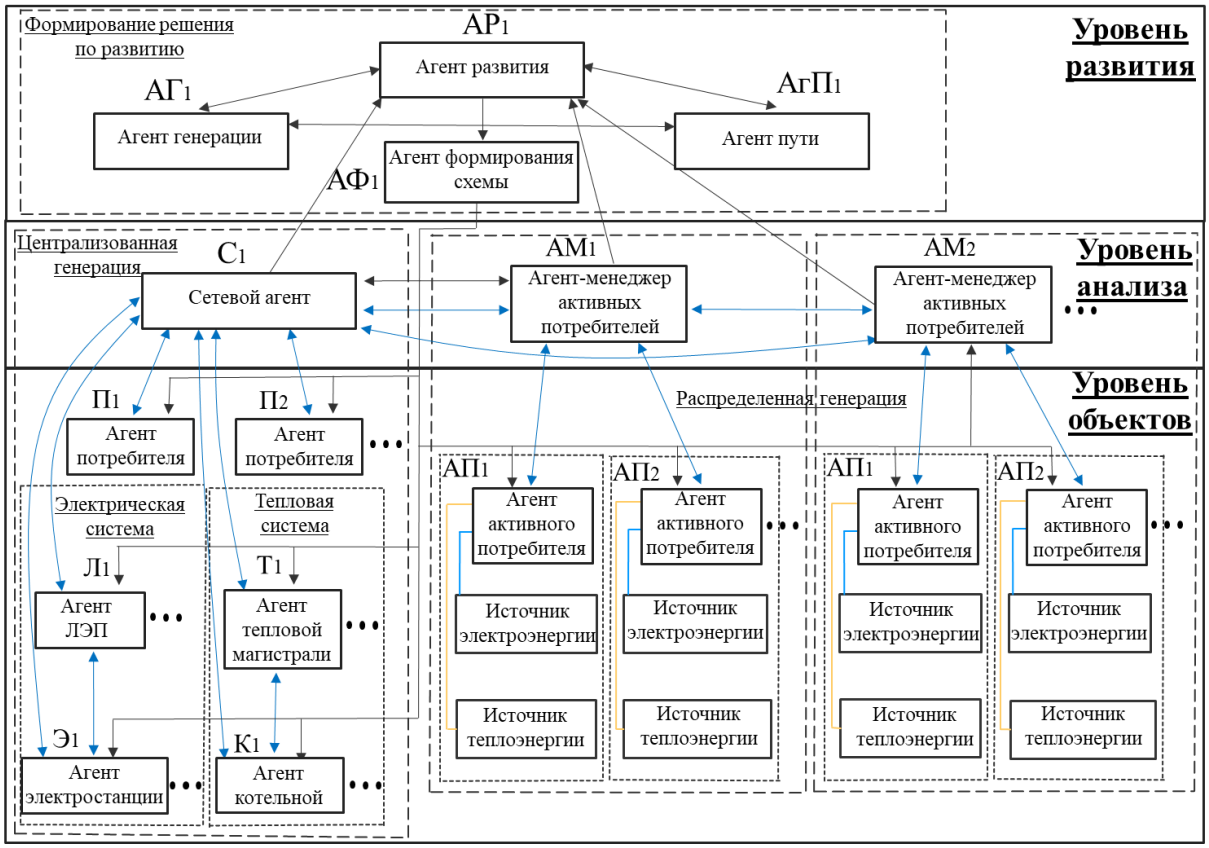


Рис. 2. Структура мультиагентной системы при решении задачи развития

На третьем уровне находятся агенты потребителей, агенты участков сети, агенты централизованной генерации и агенты активных потребителей, они осуществляют функционирование объектов ИЭС и участвуют в формировании решения по своим подсистемам, обмениваясь данными со связанными с ними агентами.

3. Апробация программной платформы при решении задачи развития интегрированной энергетической системы. Для апробации программной платформы при решении задачи развития ИЭС разработана тестовая схема, представленная на рис. 3. Эта схема позволяет наглядно представить поведение агентов и взаимодействие между ними при решении задачи развития ИЭС. Рассматриваемая тестовая схема ИЭС, включает в себя следующие объекты: 5 обычных потребителей; 7 активных потребителей; 7 электрических бойлеров для выработки тепловой энергии; 7 установок с солнечными панелями для выработки электрической энергии; 12 чиллерных установок для выработки хладоэнергии; 29 линий электропередач; 24 тепловые магистрали; 25 газовых магистралей; источник комбинированной выработки тепловой и электрической энергии – ТЭЦ; источники электрической энергии – ГЭС и КЭС; источники тепловой энергии в виде двух централизованных котельных; газораспределительная станция для подготовки газа нужных параметров и отправки его потребителям. Централизованные источники энергии имеют зоны эффективной работы генерирующего оборудования. Электрические бойлеры и установки с

солнечными панелями расположены у активных потребителей, чиллерные установки располагаются как у активных потребителей, так и у обычных потребителей.

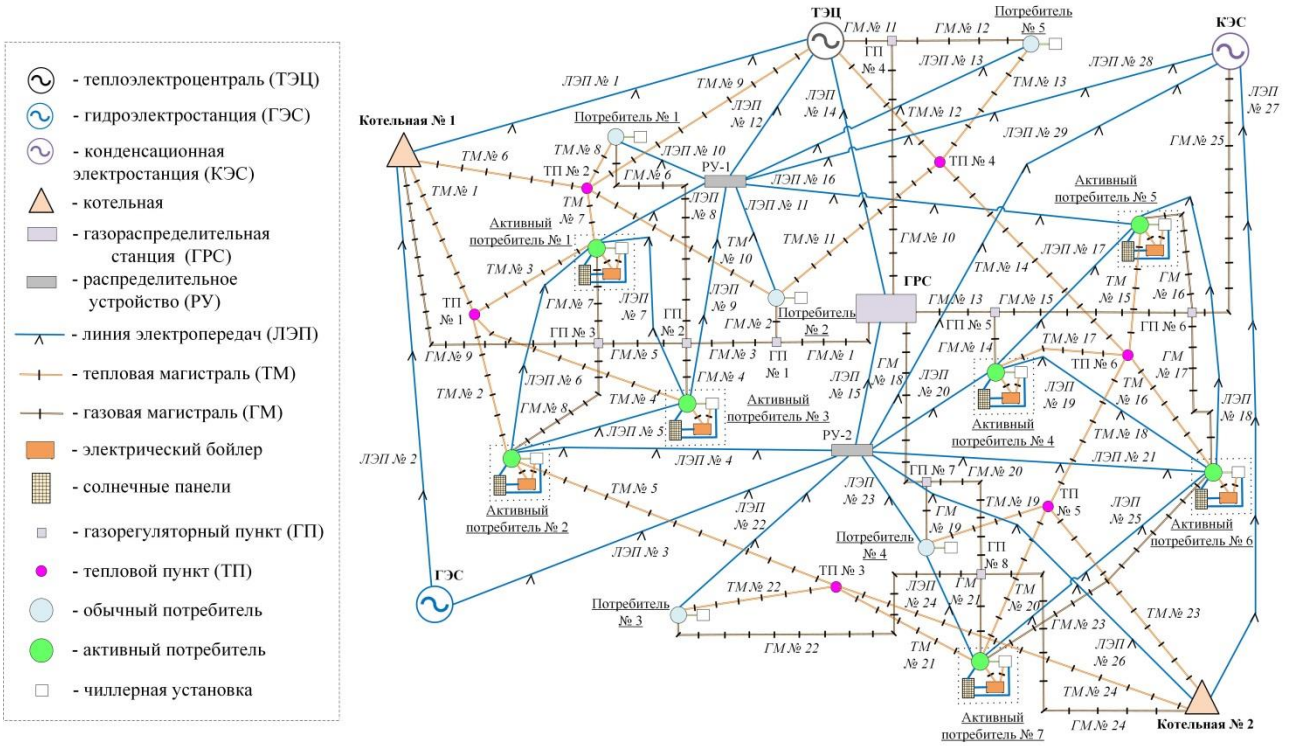


Рис. 3. Тестовая схема интегрированной энергетической системы

С помощью этой схемы выполнена проверка разработанных алгоритмов взаимодействия объектов в ИЭС и проведен анализ полученных данных. В результате проведенного расчета на данной схеме выбрана наиболее оптимальная конфигурация ИЭС, отражающая интересы, предпочтения и возможности активных потребителей и всей ИЭС, с учетом системных условий и ограничений.

Разработана мультиагентная модель ИЭС (рис. 4) в соответствии со структурой, представленной на рис. 2. В этой модели представлены элементы тепловой, электрической, газовой и системы хладоснабжения в виде агентов и выполнено описание взаимодействия этих агентов между собой. Каждый элемент схемы представлен своим агентом, агенты в модели выделены красным цветом (см. рис. 4). Описание логики и поведения агентов в разработанной мультиагентной модели осуществляется через диаграммы состояний. Если у агента можно выделить несколько состояний или поведений, выполняющих различные действия при наступлении каких-то событий, то поведение такого объекта может быть описано в терминах диаграммы состояний. Диаграммы состояний содержат информацию о различных состояниях, в которых может существовать объект и о том, как он переходит из одного состояния в другое. Переходы из одного состояния в другое могут сработать в результате заданного в качестве условия появления события: истечение заданного времени, получение сообщения, выполнение заданного логического условия и т.д. [21-22].

С использованием разработанной мультиагентной модели выполнен вычислительный эксперимент по развитию ИЭС. В результате взаимодействия агентов и подключенных программных компонентов в мультиагентной модели было найдено оптимальное решение, в соответствии с которым сформированы и реализованы необходимые меры по строительству сетевого и генерирующего оборудования. Наглядное представление полученного решения отображено на рис. 5, задействованные в энергоснабжении участки сетей выделены соответствующим цветом. В рамках заданных капиталовложений осуществлен выбор

наиболее экономичных и экологически чистых источников энергии с учетом зон эффективной работы оборудования.

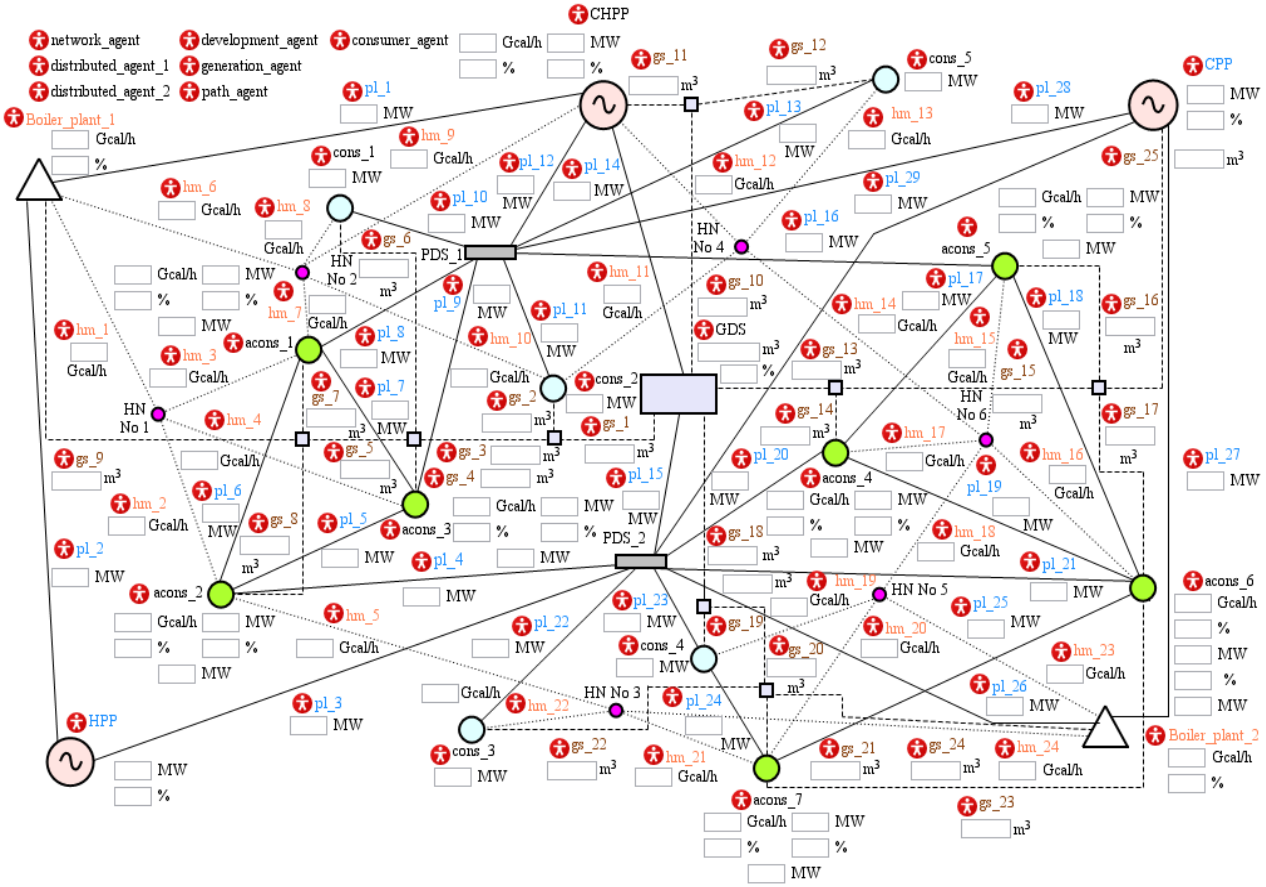


Рис. 4. Мультиагентная модель интегрированной энергетической системы в программной среде AnyLogic

Таким образом, на полученной схеме можно увидеть, что для выработки электрической энергии использовалась ГЭС, загруженная на 100% и ТЭЦ в централизованной системе, также значительное количество электрической энергии взято от солнечных панелей, установленных у активных потребителей, поскольку в соответствии с заданными условиями такая энергия является наиболее экономичной и экологически чистой. В качестве резерва для регулирования доли энергии в ночное время, когда солнечные панели не смогут производить электрическую энергию, планируется использовать мощность генерирующего оборудования ТЭЦ, электрический резерв которых составляет 400 МВт, совместно с маневренными гидрогенераторами ГЭС. Для передачи необходимого количества электрической энергии потребителям построены соответствующие ЛЭП, выбранные из возможных вариантов, также в качестве магистральных сетей построены ЛЭП № 16 и № 4, в данном расчете они не задействованы для передачи электрической энергии, но при перераспределении энергии между централизованными и распределенными источниками будут необходимы. КЭС не была задействована для производства электрической энергии, поскольку ее строительство и строительство протяженных ЛЭП, подходящих к ней, выходит за рамки заданных капиталовложений.

Для выработки тепловой энергии использовались централизованные котельные № 1 и № 2, а также ТЭЦ, распределенные источники тепловой энергии в виде электрических бойлеров были задействованы у нескольких активных потребителей, поскольку с точки зрения экономичности, они являются довольно дорогими при эксплуатации. В качестве резерва тепловой энергии выступают котельные № 1 и № 2, суммарный резерв которых составляет 500

Гкал/ч. Также были выбраны наиболее оптимальные трубопроводы для доставки тепловой энергии потребителям из представленного перечня, в качестве связующих магистральных сетей между подсистемами выступают тепловые магистрали № 5 и № 14. Для выработки хладоэнергии у потребителей были установлены чиллерные установки. Основными потребителями газа являются котельные и ТЭЦ, поэтому к ним были проложены основные газопроводы от газораспределительной станции с ответвлениями к потребителям.

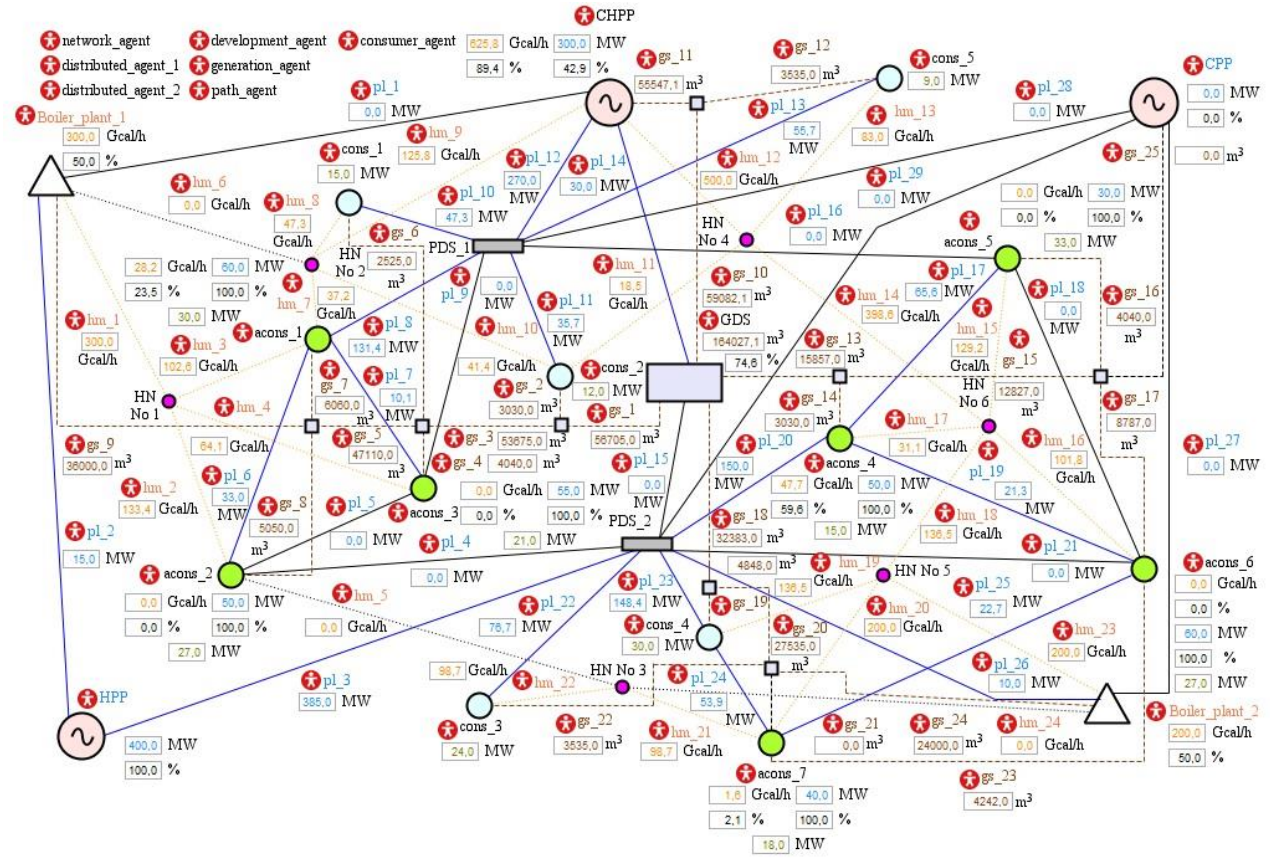


Рис. 5. Результаты расчета интегрированной энергетической системы

Для выработки тепловой энергии использовались централизованные котельные № 1 и № 2, а также ТЭЦ, распределенные источники тепловой энергии в виде электрических бойлеров были задействованы у нескольких активных потребителей, поскольку с точки зрения экономичности, они являются довольно дорогими при эксплуатации. В качестве резерва тепловой энергии выступают котельные № 1 и № 2, суммарный резерв которых составляет 500 Гкал/ч. Также были выбраны наиболее оптимальные трубопроводы для доставки тепловой энергии потребителям из представленного перечня, в качестве связующих магистральных сетей между подсистемами выступают тепловые магистрали № 5 и № 14. Для выработки хладоэнергии у потребителей были установлены чиллерные установки. Основными потребителями газа являются котельные и ТЭЦ, поэтому к ним были проложены основные газопроводы от газораспределительной станции с ответвлениями к потребителям.

Проведенный вычислительный эксперимент показал возможность применения программной платформы для решения задачи развития ИЭС. В результате выполненного эксперимента на разработанной мультиагентной модели удалось сформировать оптимальную схему ИЭС для энергоснабжения потребителей с учетом системных условий и ограничений. Дальнейшее развитие данного направления позволит эффективно решать задачи развития ИЭС.

Заключение. Развитие ИЭС представляет собой сложную задачу, требующую применения сложных математических моделей и алгоритмов, учета характеристик различных

типов энергетических систем и согласования условий их совместного функционирования. Для комплексного решения этой задачи в статье предложен методический подход для создания единой программной платформы. Переход к новым методикам решения задач, базирующимся на использовании универсальной единой программной платформы, позволяет в рамках единого информационного пространства объединить различные математические, информационные и интеллектуальные составляющие для решения комплекса задач развития ИЭС. В рамках разработанного методического подхода к построению программной платформы получены следующие наиболее важные результаты: принципы построения платформы; архитектура платформы; технологии и инструментальные средства разработки для реализации платформы; базовая структура библиотеки программных компонентов, их интерфейсы и механизмы интеграции в платформу. Приведено описание структуры мультиагентной модели ИЭС. Продемонстрировано решение задачи развития на примере условной схемы ИЭС. Практическое применение разработанной программной платформы позволяет повысить качество получаемых проектных решений и снизить затраты на проектирование и эксплуатацию ИЭС.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90266.

Список источников

1. Voropai N.I. Integrated Energy Systems: Challenges, Trends, Philosophy. Studies on Russian Economic Development, 2017, vol. 28, no. 5, pp. 492-499, DOI: 10.1134/S107570071705015X.
2. Voropai N.I. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture. Journal of Physics: Conference Series, 2018, vol. 1111, no. 1, 012001, DOI: 10.1088/1742-6596/1111/1/012001.
3. Ershov A.P. Programming Programme for the BESM Computer. London: Pergamon Press, 1959, 158 p.
4. Smith B.C. Procedural reflection in programming languages PhD Thesis . Brian Cantwell Smit; Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 1982.
5. Booch G. Object-Oriented Analysis and Design with Applications. Boston: Addison-Wesley, 2007, 691 p.
6. Jacobson I. The Unified Software Development Process.Addison-Wesley, 1999, 493 p.
7. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. Boston: Addison-Wesley, 1999, 137 p.
8. Martin R.C. Agile Software Development: Principles. Patterns and Practices. New York: Pearson Education, 2002, 557 p.
9. Fowler M., Rice D., Foemmel M. Patterns of Enterprise Application Architecture. Addison-Wesley, 2002, 560 p.
10. Silva A.R. Model-driven engineering: a survey supported by the unified conceptual model. Computer Languages Systems & Structures, 2015, vol. 43, pp. 139-155, DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
11. Al-Azzoni I., Blank J., Petrović N. A model-driven approach for solving the software component allocation problem. Algorithms, 2021, vol. 354, no. 14, DOI: 10.3390/a14120354.
12. Ren Y., Fan D., Feng Q. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids Applied Energy, 2019, vol. 249, pp. 46-57, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.119.
13. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. Applied Energy, 2022, vol. 309, 118487, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118487.
14. Zhang Z., Jing R., Lin J. Combining agent-based residential demand modeling with design optimization for integrated energy systems planning and operation. Applied Energy, 2020, vol. 263, 114623, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114623.
15. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993, vol. 5, no. 2, pp. 199-220.
16. Staab S., Studer R. Handbook on Ontologies. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, 811 p.
17. Staab S., Jing R., Lin J. Model driven engineering with ontology technologies. Reasoning Web. Semantic Tech. for Soft. Engin. Lect. Notes Comput. Sci, 2010, pp. 62-98, DOI: 10.1007/978-3-642-15543-7_3.
18. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. The Knowledge Engineering Review, 1995, vol. 10, no. 2, pp. 115-152.

19. Fisher K., Muller J.P., Heimig I. Intelligent Agents in Virtual Enterprises. In Proceedings of the First Interational Conference “The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology”. London. UK, 1996, pp. 205-224.
20. Городецкий В.И. Промышленные применения многоагентных систем: прогнозы и реалии / В.И. Городецкий, П.О. Скобелев, О.Л. Бухвалов и др // Труды XVIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: ООО «Офорт». – 2016. – С. 137-162.
21. Абрамов В.И. Применение социального моделирования с использованием агент-ориентированного подхода в приложении к научно-техническому развитию, реализации НИОКР и поддержанию инновационного потенциала / В.И. Абрамов, А.Н. Кудинов, Д.С. Евдокимов // Вестник ВГУИТ. – 2019. – Т. 81. – № 3. – С. 339-357. – DOI: 10.20914/2310-1202-2019-3-339-359.
22. Маковеев В.Н. Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий / В.Н. Маковеев // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 5. – С. 272-289. – DOI: 10.15838/esc.2016.5.47.15.

Стенников Валерий Алексеевич. *Доктор технических наук, профессор, академик РАН, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 442880; SPIN: 7059-4182; ORCID: 0000-0001-6219-0354, sva@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.*

Барахтенко Евгений Алексеевич. *Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 670523; SPIN: 4965-6984; ORCID: 0000-0002-6934-0025, barakhtenko@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.*

Соколов Дмитрий Витальевич. *Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 710020; SPIN: 7029-0680; ORCID: 0000-0002-4068-7770, sokolov_dv@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.*

Майоров Глеб Сергеевич. *Аспирант Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 1001072; SPIN: 9413-6623; ORCID: 0000-0002-7405-1965, mayorovgs@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.*

UDC 621.311.001.57
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.002

Methodical approach to building a software platform for the development of integrated energy systems

Valery A. Stennikov, Evgeny A. Barakhtenko, Dmitry V. Sokolov, Gleb S. Mayorov
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, *mayorovgs@isem.irk.ru*

Abstract. Currently, the direction associated with the study of integrated energy systems is actively developing. This direction considers various types of systems (electricity, heat, cold, gas supply, etc.) as subsystems of a single system and allows you to get advantages over traditional approaches to the study of energy systems, in which these systems are considered independently of each other. The article proposes a methodical approach to organizing a single information space for solving the problems of developing integrated energy systems in the form of a single software platform. This approach includes the following components: platform building principles; platform architecture; technologies and development tools for platform implementation; the basic structure of the library of software components, their interfaces and integration mechanisms into the platform. In the process of building a software system, it is proposed to use ontologies that are used to solve the following problems: automatic integration of software components into the AnyLogic software environment; automated construction of a software system for solving the problem of managing the development of integrated energy systems; application of the software platform in solving practical problems. In accordance with the proposed methodological approach, a software platform prototype has been implemented. The solution of the problem of development is demonstrated on the example of the scheme of an integrated energy system. The results of a computational experiment on a test circuit of an integrated energy system, which was carried out using the developed software prototype, are presented. As a result of the experiment performed on the developed multi-agent model, it was possible to form the optimal scheme of an integrated energy system for power supply to consumers, taking into account system conditions and limitations.

Keywords: integrated energy systems, multi-agent approach, software platform, ontologies, modeling

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0002) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 and funded by RFBR, project number 20-38-90266.

References

1. Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. Integrated Energy Systems: Challenges, Trends, Philosophy. Studies on Russian Economic Development, 2017, vol. 28, no. 5, pp. 492-499, DOI: 10.1134/S107570071705015X.
2. Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture. Journal of Physics: Conference Series, 2018, vol. 1111, no. 1, 012001, DOI: 10.1088/1742-6596/1111/1/012001.
3. Ershov A.P. Programming Programme for the BESM Computer. London: Pergamon Press, 1959, 158 p.
4. Smith B.C. Procedural reflection in programming languages PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 1982.
5. Booch G. Object-Oriented Analysis and Design with Applications. Boston: Addison-Wesley, 2007, 691 p.
6. Jacobson I., Booch G., Rumbaugh J. The Unified Software Development Process. Addison-Wesley, 1999, 493 p.
7. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. Boston: Addison-Wesley, 1999, 137 p.
8. Martin R.C. Agile Software Development: Principles, Patterns and Practices. New York: Pearson Education, 2002, 557 p.
9. Fowler M., Rice D., Foemmel M. et al. Patterns of Enterprise Application Architecture. Addison-Wesley, 2002, 560 p.
10. Silva A.R. Model-driven engineering: a survey supported by the unified conceptual model. Computer Languages Systems & Structures, 2015, vol. 43, pp. 139-155, DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
11. Al-Azzoni I., Blank J., Petrović N. A model-driven approach for solving the software component allocation problem. Algorithms, 2021, vol. 354, no. 14, DOI: 10.3390/a14120354.
12. Ren Y., Fan D., Feng Q. et al. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids. Applied Energy, 2019, vol. 249, pp. 46-57, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.119.
13. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G. et al. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. Applied Energy, 2022, vol. 309, 118487, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118487.
14. Zhang Z., Jing R., Lin J. Combining agent-based residential demand modeling with design optimization for integrated energy systems planning and operation. Applied Energy, 2020, vol. 263, 114623, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114623.
15. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993, vol. 5, no. 2, pp. 199-220.
16. Staab S., Studer R. Handbook on Ontologies. 2nd edn. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, 811 p.
17. Staab S., Walter T., Gröner G. et al. Model driven engineering with ontology technologies. Reasoning Web. Semantic Tech. for Soft. Engin. Lect. Notes Comput. Sci, 2010, pp. 62-98, DOI: 10.1007/978-3-642-15543-7_3.
18. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. The Knowledge Engineering Review, 1995, vol. 10, no. 2, pp. 115-152.
19. Fisher K., Muller J.P., Heimig I. et al. Intelligent Agents in Virtual Enterprises. In Proceedings of the First Interational Conference “The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology”. London. UK, 1996, pp. 205-224.
20. Gorodeczkij V.I., Skobelev P.O., Buxvalov O.L. et al. Promyshlennye primenenija mnogoagentnyh sistem: prognozy i realii [Industrial applications of multi-agent systems: forecasts and realities]. Trudy XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii «Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh si-stemakh». Samara: OOO «Ofort» [Proc. of the XVIII Int. Conf. “Problems of control and modeling in complex systems”. Samara: OOO «Ofort»], 2016, pp. 137-162. (In Russia)
21. Abramov V., Kudinov A., Evdokimov D. Primenenie social'nogo modelirovanija s ispol'zovaniem agent-orientirovannogo podhoda v prilozhenii k nauchno-tehnicheskomu razvitiju, reali-zacii NIOKR i podderzhaniju innovacionnogo potenciala [Application of social modeling using agent based approach in scientific and technical development, implementation of R&D and maintenance of innovative potential]. Izvestiya Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2019, vol. 81, no. 3, pp 339-359, DOI: 10.20914/2310-1202-2019-3-339-359. (In Russia)
22. Makoveev V. Primenenie agent-orientirovannyh modelej v analize i prognozirovanii social'no-jekonomicheskogo razvitija territorij [Using agent-based models in the analysis and forecast of socio-economic development of

territories]. Ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz [Economic and social changes facts trends forecast], 2016, no. 5, pp. 272-289, DOI: 10.15838/esc.2016.5.47.15. (In Russia)

Valery A. Stennikov. *Doctor of technical sciences, professor, academician of RAS, director Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 442880; SPIN: 7059-4182; ORCID: 0000-0001-6219-0354, sva@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.*

Evgeny A. Barakhtenko. *Candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 670523; SPIN: 4965-6984; ORCID: 0000-0002-6934-0025, barakhtenko@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.*

Dmitry V. Sokolov. *Candidate of technical sciences, senior researcher Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 710020; SPIN: 7029-0680; ORCID: 0000-0002-4068-7770, sokolov_dv@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.*

Gleb S. Mayorov. *Postgraduate student Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 1001072; SPIN: 9413-6623; ORCID: 0000-0002-7405-1965, mayorovgs@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.*

Статья поступила в редакцию 29.08.2022; одобрена после рецензирования 12.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 08/29/2022; approved after reviewing 09/12/2022; accepted for publication 09/19/2022.

УДК 51.72+532.546.2
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.003

Методика обработки результатов теплофизических экспериментов, основанная на решении двух видов задач нелинейного математического программирования

Клер Александр Матвеевич[1], Алексеюк Виталий Эдуардович[1,2], Левин Анатолий Алексеевич[1], Хан Полина Вениаминовна[1]
[1]Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, *alexeyuk.vitaliy@yandex.ru,*
[2]Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск

Аннотация. Целью данного исследования является разработка эффективной методики обработки результатов теплофизических экспериментов, основанной на решении двух видов задач нелинейного математического программирования. В статье приводится описание предлагаемой методики идентификации коэффициентов математической модели теплофизического эксперимента по результатам замеренных опытных данных. Также рассматриваются две математические модели, интерпретирующие результаты выполненных натурных экспериментов. Представленная в статье методика основана на методе максимального правдоподобия и учитывает относительные погрешности всех датчиков, использованных для получения значений замеряемых параметров. Более того, методика предполагает двухэтапный подход при решении задачи идентификации параметров математической модели. На первом этапе выполняется минимизация максимальной относительной погрешности среди замеряемых параметров, что позволяет выявить и исключить «плохие» замеры. Далее на втором этапе минимизируется сумма модулей относительных погрешностей всех замеряемых параметров. Вычислительные эксперименты показали, что такой подход более эффективен по сравнению с классическим методом наименьших квадратов, который чувствителен к наличию «плохих» замеров и при определенных условиях может становиться овражной функцией. В последнем разделе статьи приводятся результаты вычислительных экспериментов, апробирующих предлагаемую методику. Расчеты показали, что такой подход весьма эффективен и позволяет настроить коэффициенты математических моделей с высокой точностью.

Ключевые слова: теплофизический эксперимент, идентификация параметров, нелинейное математическое программирование, относительная погрешность, замеряемые параметры, критерий максимального правдоподобия, метод наименьших модулей, математическая модель

Цитирование: Клер А.М. Методика обработки результатов теплофизических экспериментов, основанная на решении двух видов задач нелинейного математического программирования / А.М. Клер, В.Э. Алексеюк, А.А. Левин, П.В. Хан // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 32-49. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.003.

Введение. При проведении теплофизических исследований, направленных на изучение некоторого установившегося процесса, проводится значительное число отдельных экспериментов при различных условиях протекания процесса. При этом в каждом эксперименте измеряется некоторое количество таких параметров, как температура, давление, расход и другие. Замеры параметров производятся с некоторыми погрешностями. Как правило, погрешности измерений различных параметров различаются.

Одной из главных задач теплофизических исследований является подбор наиболее адекватной математической модели процесса. Обычно существуют несколько возможных вариантов математических моделей, среди которых следует выбрать наилучшую. Как правило, в каждой модели имеется несколько коэффициентов, которые необходимо подобрать (оценить) так, чтобы модель наиболее точным, в некотором смысле, образом описывала экспериментальные результаты.

Следует отметить, что на основе анализа каждой математической модели все замеренные параметры процесса можно разделить на две группы: информационно-входные и информационно-выходные. Параметры первой группы играют роль исходных данных для модели, то есть

их значения нужно задать для проведения расчета, а параметры второй группы вычисляются в результате расчета.

В идеальном случае оценке подлежат, как коэффициенты математической модели, так и “истинные” значения всех замеряемых с погрешностями параметров. При этом наиболее эффективным методом определения оценок указанных величин является метод максимального правдоподобия [1]. Метод состоит в поиске таких значений оцениваемых параметров, при которых максимума достигает некоторая функция правдоподобия. Если случайные величины (погрешности замеров) в одном эксперименте являются непрерывными и независимыми, то функция правдоподобия для одного эксперимента равна произведению плотностей вероятностей относительных погрешностей всех замеров одного эксперимента. Относительная погрешность равна модулю абсолютной погрешности, деленной на среднеквадратичное отклонение погрешности замера. Для серии экспериментов функция правдоподобия равна сумме функций правдоподобия экспериментов серии или средней функции правдоподобия для этих экспериментов.

Отметим, что погрешности замеров параметров в теплофизическом эксперименте можно считать случайными величинами с нормальным законом распределения, дисперсии которых определяются точностью измерительных устройств (класс точности α_i и максимальное значение шкалы датчика S_i). Как правило, считается, что среднеквадратичное отклонение (СКО) определяется из условия «трех сигма» [2]

$$\sigma_i = \frac{S_i \cdot \alpha_i}{3 \cdot 100}, \tag{1}$$

где i – номер замеряемого параметра в одном эксперименте.

Следует отметить, что плотность вероятности нормального распределения является весьма неудобной целевой функцией для задач оптимизации. Она состоит из вогнутых и выпуклых частей, что приводит к многоэкстремальности и даже при небольшом числе оптимизируемых параметров препятствует эффективному поиску оптимума.

Поэтому обычно вместо максимума функции правдоподобия ищется экстремальное значение другой функции, точка экстремума которой достаточно близка к точке экстремума функции правдоподобия. Как правило, в качестве такой функции принимается сумма квадратов относительных погрешностей измерений в серии экспериментов. При этом в качестве оптимизируемых параметров выступают «истинные» значения информационно-входных замеряемых параметров и коэффициенты математической модели. Такой подход нашел применение при решении задач оценивания состояния и идентификации коэффициентов математических моделей на основе результатов замеров параметров в нескольких режимах работы для теплоэнергетических установок [3]. Следует отметить, что в решаемых задачах число режимов работы не превосходит пяти, а число параметров, замеренных в каждом режиме, не более пятидесяти.

При обработке результатов теплофизических экспериментов число параметров, замеряемых в одном эксперименте, не велико (не более десяти), однако число отдельных экспериментов составляет несколько сотен, что приводит к общему числу замеряемых параметров, превосходящему тысячу. При таких условиях функция суммы квадратов относительных погрешностей, с учетом ограничений в форме равенств, определяемых математической моделью процесса, становится сильно овражной.

Опыт показал, что такая задача является практически не разрешимой. Поэтому для решения данной задачи на практике используется другой подход [4]. Согласно этому подходу, все «истинные» значения информационно-входных параметров принимаются равными ре-

зультатам замеров. Оптимизируются только коэффициенты математической модели. В целевую функцию включается сумма квадратов относительных погрешностей лишь информационно-выходных параметров. Эта задача имеет гораздо меньшее число оптимизируемых параметров (не более десяти) и может быть решена. Однако в ней не учитываются погрешности измерения информационно-входных параметров.

1. Методика идентификации коэффициентов математической модели теплофизического процесса по экспериментальным данным. В работе по оцениванию параметров теплоэнергетических установок и идентификации коэффициентов их математических моделей вместо минимизации суммы квадратов относительных погрешностей замеров предлагалось минимизировать сумму модулей относительных погрешностей замеряемых параметров [5]. Как известно, модуль некоторой переменной является негладкой функцией, производная которой имеет разрыв при нулевом значении аргумента. В указанной работе сформулирована задача математического программирования с гладкими целевой функцией и ограничениями в форме равенств и неравенств, в точке решения которой достигается минимум суммы модулей относительных погрешностей замеров. Эта задача имеет следующий вид (задача 1):

$$\min \sum_{i=1}^{N_e} \left(\sum_{j=1}^{N_z^{in}} \overline{x_{ij}^{in}} + \sum_{k=1}^{N_z^{out}} \overline{x_{ik}^{out}} \right), \tag{2}$$

при условиях:

$$\begin{gathered} x_{i1}^{r\,out} = h_1\left(x_{i1}^{r\,in}, \ldots, x_{iN_z^{in}}^{r\,in}, c_1, \ldots, c_K\right), \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ x_{iN_z^{out}}^{r\,out} = h_{N_z^{out}}\left(x_{i1}^{r\,in}, \ldots, x_{iN_z^{in}}^{r\,in}, c_1, \ldots, c_K\right), \end{gathered} \tag{3}$$

$$\overline{x_{ij}^{in}} - \frac{\left(x_{ij}^{r\,in} - x_{ij}^{z\,in}\right)}{\sigma_j^{in}} \geq 0, \tag{4}$$

$$\overline{x_{ij}^{in}} + \frac{\left(x_{ij}^{r\,in} - x_{ij}^{z\,in}\right)}{\sigma_j^{in}} \geq 0, \tag{5}$$

$$j = 1, \ldots, N_z^{in},$$

$$x^{\max} \geq \overline{x_{ij}^{in}} \geq 0, \tag{6}$$

$$\overline{x_{ik}^{out}} - \frac{\left(x_{ik}^{r\,out} - x_{ik}^{z\,out}\right)}{\sigma_k^{out}} \geq 0, \tag{7}$$

$$\overline{x_{ik}^{out}} + \frac{\left(x_{ik}^{r\,out} - x_{ik}^{z\,out}\right)}{\sigma_k^{out}} \geq 0, \tag{8}$$

$$k = 1, \ldots, N_z^{out},$$

$$x^{\max} \geq \overline{x_{ik}^{out}} \geq 0, \tag{9}$$

$$i = 1, \ldots, N_e,$$

где N_e – число экспериментов; N_z^{in} – число информационно-входных замеряемых параметров в одном эксперименте; N_z^{out} – число информационно-выходных замеряемых параметров в одном эксперименте; $\overline{x_{ij}^{in}}$ – вспомогательный параметр, соответствующий *j*-ому информационно-входному замеряемому параметру *i*-го эксперимента; $\overline{x_{ik}^{out}}$ – вспомогательный параметр,

соответствующий *k*-ому информационно-выходному замеряемому параметру *i*-го эксперимента; $x_{ij}^{r\,in}$ – оцениваемое значение *j*-го информационно-входного замеряемого параметра *i*-го эксперимента; $x_{ik}^{r\,out}$ – рассчитываемое значение *k*-го информационно-выходного замеряемого параметра *i*-го эксперимента; $c_1, \ldots, c_K$ – оптимизируемые коэффициенты математической модели процесса; $h_1, ..., h_{N_z^{out}}$ – выражения, образующие математическую модель процесса, ориентированные на вычисление информационно-выходных замеряемых параметров; $x_{ij}^{z\,in}$ – замеренное значение *j*-го информационно-входного замеряемого параметра *i*-го эксперимента; $x_{ik}^{z\,out}$ – замеренное значение *k*-го информационно-выходного замеряемого параметра *i*-го эксперимента; σ_j^{in} – среднеквадратичная погрешность замера *j*-го информационно-входного замеряемого параметра; σ_k^{out} – среднеквадратичная погрешность замера *k*-го информационно-выходного замеряемого параметра; $x^{\max}$ – максимально-допустимая относительная погрешность измерений.

Описание математических моделей изучаемого в работе теплофизического эксперимента, приведенное в 3 разделе данной статьи, указывает на наличие нелинейных функций в векторе-функций ограничений в форме равенств *h*. Анализ ограничений в форме равенств и неравенств в задаче (2-9) приводит к выводу, что весьма затруднительно математически строго обосновать, к какому классу задач относится данная задача, и подтвердить, что она является задачей выпуклого математического программирования. Однако, нестрогое суждение о выпуклости данной задачи можно выдвинуть на основании анализа выполненных вычислительных экспериментов. В подобных случаях зачастую используют метод мультистарта, заключающийся в следующем. Проводится серия вычислительных экспериментов из разных начальных точек с неизменными ограничениями в форме равенств и неравенств. Если результаты всех экспериментов сходятся в некоторой достаточно близкой области, в которой значения целевой функции и оптимизируемых параметров близки по значению, это косвенно свидетельствует о выпуклости решаемой задачи нелинейного математического программирования. Подобные исследования были выполнены как для задачи I (2-9), так и для нижеприведенной задачи 0 (10-15).

Как видно из анализа ограничений-неравенств, каждой относительной погрешности соответствуют два ограничения-неравенства и один вспомогательный параметр. Если относительная погрешность имеет положительное значение, то при минимизации вспомогательного параметра активным (стремящимися к нулю) будет первое ограничение, в котором перед относительной погрешностью стоит знак «–». Если относительная погрешность имеет отрицательное значение, то активным будет второе ограничение, в котором перед относительной погрешностью стоит знак «+». Легко увидеть, что в оптимальной точке решения задачи I значение ее целевой функции будет равно сумме модулей относительных погрешностей.

В качестве оптимизируемых параметров в задаче I выступают: вспомогательные параметры $\overline{x_{ij}^{in}}$ и $\overline{x_{ik}^{out}}$, оцениваемые информационно-входные замеряемые параметры $x_{ij}^{r\,in}$ и коэффициенты математической модели $c_1, \ldots, c_K$. Общее количество оптимизируемых параметров задачи составляет $N_I^{opt} = 2 \cdot N_z^{in} \cdot N_e + N_z^{out} \cdot N_e + K$.

Следует отметить, что при подборе коэффициентов математической модели помимо средних показателей погрешностей замеряемых параметров следует обратить внимание на их максимальные отклонения. Если за счет небольшого ухудшения средних показателей удается

достаточно сильно сократить максимальные погрешности, то такое изменение математической модели оправдано. С учетом этого в предлагаемом подходе предусмотрен предварительный этап (задача 0), на котором решается задача минимизации максимальных погрешностей между расчетными и замеренными значениям параметров. Эта задача имеет следующий вид:

$$\min \bar{x}, \tag{10}$$

при условиях (3) и

$$\bar{x} - \frac{\left(x_{ij}^{r\,in} - x_{ij}^{z\,in}\right)}{\sigma_j^{in}} \geq 0, \tag{11}$$

$$\bar{x} + \frac{\left(x_{ij}^{r\,in} - x_{ij}^{z\,in}\right)}{\sigma_j^{in}} \geq 0, \tag{12}$$

$$j = 1, \ldots, N_z^{in},$$

$$\bar{x} - \frac{\left(x_{ik}^{r\,out} - x_{ik}^{z\,out}\right)}{\sigma_k^{out}} \geq 0, \tag{13}$$

$$\bar{x} + \frac{\left(x_{ik}^{r\,out} - x_{ik}^{z\,out}\right)}{\sigma_k^{out}} \geq 0, \tag{14}$$

$$k = 1, \ldots, N_z^{out},$$

$$\bar{x} \geq 0, \tag{15}$$

где $\bar{x}$ – вспомогательный параметр.

В качестве оптимизируемых параметров в задаче 0 выступают: вспомогательный параметр $\bar{x}$, оцениваемые информационно-входные замеряемые параметры $x_{ij}^{r\,in}$ и коэффициенты математической модели $c_1, \ldots, c_K$. Общее количество оптимизируемых параметров составляет $N_0^{opt} = N_z^{in} \cdot N_e + K + 1$.

Следует отметить, что анализ оптимального решения задачи 0 позволяет выявить «плохие» замеры. Параметр $x^{\max}$ принимается равным оптимальному значению параметра $\bar{x}$ после решения задачи 0. Если количество замеров, в точке решения задачи 0 для которых относительная погрешность равна значению $x^{\max}$, существенно больше, чем математическое ожидание числа замеров, для которых относительные погрешности больше или равны максимальной относительной погрешности, то это свидетельствует либо о «плохой» модели, либо о наличии «плохих» замеров. Хотя ожидаемое число замеров, выходящих за установленный диапазон (N^{err}), является целым числом, его математическое ожидание может быть не целым числом.

Указанное математическое ожидание числа замеров, для которых относительная погрешность замера больше или равна $x^{\max}$ в случае нормального распределения определяется из выражения:

$$M\left(N^{err}\right) = \Phi\left(x^{\max}\right) \cdot N = \Phi\left(x^{\max}\right) \cdot N_e \cdot N_z = \Phi\left(x^{\max}\right) \cdot N_e \cdot \left(N_z^{in} + N_z^{out}\right), \tag{16}$$

где $\Phi\left(x^{\max}\right)$ – обратная величина от функции Лапласа [2], показывающая вероятность того, что нормально распределенное число выйдет за пределы установленного диапазона (- $x^{\max}$, $x^{\max}$), N – общее число замеряемых параметров во всех рассматриваемых экспериментах, N_z – число замеряемых параметров в одном эксперименте.

О том, что замер «плохой», можно судить как по близости его относительной погрешности в точке решения задачи 0 к $x^{\max}$, так и по большому значению двойственной переменной одного из двух ограничений-неравенств, относящихся к данному замеряемому параметру. Если экспериментов, в которых выявлены «плохие» замеры, немного и после удаления их результатов из условий задачи 0 и ее повторного решения удается существенно сократить максимальную относительную погрешность, то можно считать, что мы имеем дело с «плохими»

замерами. Если повторное решение задачи 0 не позволило существенно сократить $x^{\max}$, то, скорее всего, мы имеем дело с «плохой» моделью процесса.

Функция правдоподобия серии экспериментов определяется из выражения:

$$F^{PR} = \sum_{i=1}^{N_e} \left[\prod_{j=1}^{N_z^{in}} f\left(\frac{x_{ij}^{r\,in} - x_{ij}^{z\,in}}{\sigma_j^{in}} \right) \cdot \prod_{k=1}^{N_z^{out}} f\left(\frac{x_{ik}^{r\,out} - x_{ik}^{z\,out}}{\sigma_k^{out}} \right) \right], \qquad (17)$$

где f – функция плотности вероятности с нормальным законом распределения погрешностей.

Далее рассматривается применение изложенного подхода к обработке результатов теплофизического эксперимента, направленного на определение закономерностей протекания двухфазной среды через шаровую засыпку.

2. Описание экспериментальной установки. Исследование движения двухфазного потока через пористые среды представляет интерес в таких областях техники, как создание химических каталитических реакторов, высокоэффективных теплообменников, реакторов с шаровыми микротвэлами; анализ безопасности ядерных реакторов; совершенствование технологии добычи нефти и газа [6 – 8]. Одной из основных задач гидравлики и теплообмена является установление связи между расходом, или массовой скоростью, и перепадом давления.

Изучение расходных характеристик двухфазного потока в слое неупорядоченной засыпки сферических частиц выполнялось на установке ЦКП "Высокотемпературный контур" ИСЭМ СО РАН. Установка позволяет исследовать процессы в адиабатных и обогреваемых пароводяных потоках под давлением. Подробное описание установки и эксперимента можно найти в работе [9]. Схема экспериментального участка установки показана на рисунке 1.

Для минимизации тепловых потерь в окружающую среду наружная поверхность участка покрыта тепловой изоляцией. Горячая вода под давлением P_0 до 10 МПа поступает в нижнюю часть секции. При протекании через дроссельную шайбу *6* вода вскипает и образует пароводяную смесь. Изоэнтальпийный характер процесса дросселирования позволяет по измерениям параметров горячей воды T_0 и P_0 и давлению смеси P_1 рассчитать массовое расходное паросодержание x_1 на входе в засыпку.

При помощи вентиля *4* устанавливаются значения давления P_2, определяющие перепад давления в слое при фиксированном давлении P_1. Вентиль *5* открывался дополнительно только при создании очень больших перепадов давления в критических режимах истечения.

После экспериментального участка пароводяная смесь направляется в конденсатор. Охлажденный конденсат возвращается в питательный бак с водой. На линии возврата воды установлен автоматический измеритель расхода, в котором реализован объемный способ измерения с погрешностью, находящейся в пределах 5 % от значения параметра.

Методика проведения экспериментов построена на том, чтобы для каждого типа засыпки, характеризуемого своими значениями диаметра частиц d и высоты слоя H, при заданных параметрах потока на входе – P_1, x_1, получить последовательность значений массовой скорости ρw_{m} от перепада давления ΔP. Установление задаваемого значения x_1 обеспечивалось поддержанием с помощью автоматического регулятора ОВЕН ТРМ 210-Щ1.УР соответствующей температуры воды $T_0 = const$ перед шайбой. Изменением степени открытия вентиля *4* достигаются разные уровни перепада давления ΔP. Поддержание условия $P_1 = const$ обеспечивалось при этом корректировкой расхода через участок. Если при полностью открытом положении вентиля *4* максимальный расход не был достигнут надежно, дальнейшее понижение давления P_2 , вплоть до близкого к атмосферному, производилось открытием вентиля *5*. Давления P_0, P_1 и P_2 измерялись датчиками ПД100, для измерения перепада давления по высоте засыпки использовались датчики DMD-331. Приводимая в техническом паспорте основная погрешность всех вышеперечисленных датчиков составляет 0,5 %.

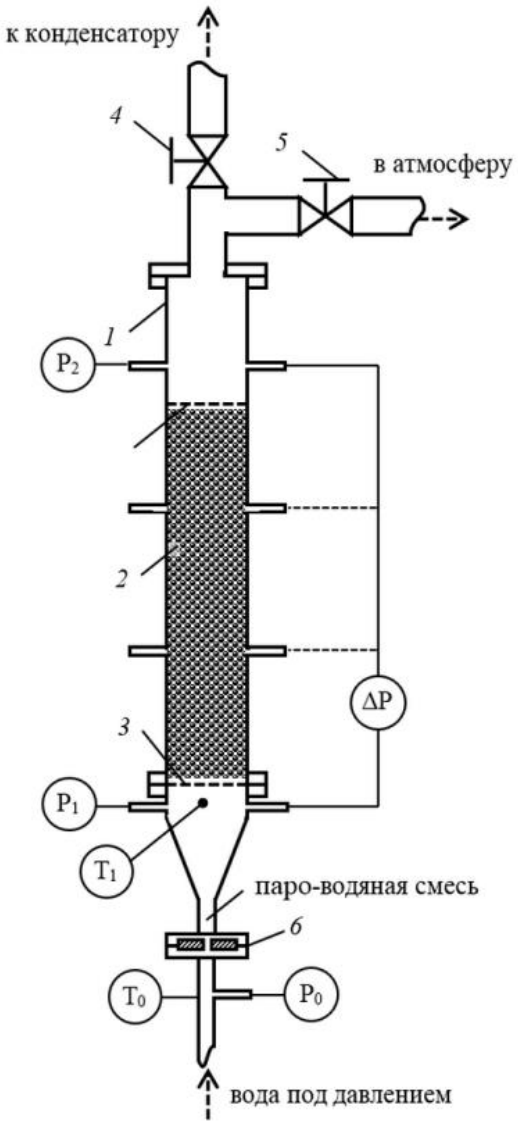


Рис. 1. Схема экспериментального участка. *1* – стальной цилиндрический канал; *2* – засыпка из шаровых частиц; *3* – решетки; *4* и *5* – регулирующие вентили; *6* – дроссельная шайба; ΔP – датчики перепада давления; P_1, P_2 – датчики абсолютного давления; T_0, T_1 – термопары

Для проведения экспериментов использовались стальные шарики диаметром 2 и 4 мм, образующие неупорядоченный зернистый слой в трубе внутренним диаметром 39 мм. Рассмотрены четыре значения высоты слоя H – 50, 100, 250, 355 мм; и три значения давления P_1 – 600, 900, 1200 кПа. Расходное массовое паросодержание x_1 на входе в зернистый слой изменялось в диапазоне от 0,011 до 0,178. Были получены замеры для 53 режимов истечения на данной установке при различных начальных параметрах и типах засыпки, суммарно насчитывающие 430 экспериментов.

3. Математические модели теплофизического эксперимента. Представленная в этой работе методика идентификации была применена к двум моделям, обобщающим данные эксперимента по истечению пароводяной смеси через шаровую засыпку.

3.1 Обзор математических моделей падения давления в двухфазном потоке. Математические модели падения давления в двухфазном потоке основаны на моделях падения давления в однофазных потоках. По происхождению их можно разделить на четыре типа. Модели первого типа основаны на модели элемента гидравлической цепи, где сопротивление учитывает пористость, размер частиц и высоту засыпки, а плотность жидкости заменена на плотность двухфазной смеси [10]. Модели второго типа используют методику Локкарта-Мартинелли, изначально предложенную для адиабатического течения двухфазной смеси в трубах. Экспериментальные исследования течения пароводяной смеси в засыпках и других пористых телах позволили получить параметры модели для таких систем [11, 12]. Модели третьего типа опираются на обобщенные уравнения Дарси-Форхгеймера, описывающие одновременное протекание жидкой и газовой фазы через пористую среду с учетом силы взаимодействия между ними. Построение моделей третьего типа осуществлялось как на основе теоретического описания взаимодействия жидкой и паровой фазы друг с другом и частицами засыпки [13, 14], так и на основе экспериментальных исследований по течению пароводяной смеси через засыпку при почти нулевых скоростях движения жидкой фазы [15, 16]. Модели четвертого типа, рассмотренные в данной работе более детально, основаны на уравнениях динамики газа при истечении через зернистый слой [17].

3.1 Математическая модель А. Первая рассмотренная модель позволяет найти падение давления пароводяной смеси ΔP при известной массовой скорости ρw_m. Массовая скорость ρw_m получена при усреднении по свободному от засыпки сечению канала при средней пористости m. Другими входными параметрами модели являются диаметр шаровых частиц d, толщина слоя H, входное давление P_1 и входное массовое паросодержание x_1.

Модель основана на полученном Гольдштиком [17] уравнении для градиента давления в потоке газа через зернистый слой:

$$\frac{dP}{dy} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{m \cdot (m-1)}{\psi \cdot d} \cdot \frac{(\rho w_m)^2}{\rho}, \tag{18}$$

где $\psi = 0,508 - 0,56 \cdot (1-m)$ – минимальное проходное сечение засыпки.

Путём измерения объема воды, вытесняемой шариками, установлено, что m = 0.370 для частиц диаметром 2, m = 0.396 для частиц диаметром 4 мм.

Таиров и Хан [4, 18] расширили область применения уравнения (18) на двухфазные потоки, выразив плотность двухфазной смеси через давление следующим образом.

Пароводяная смесь движется через засыпку под действием градиента давлений. Вдоль засыпки давление снижается, а смесь расширяется. При этом уменьшается ее плотность, снижается температура, а паросодержание растет. Наличие двух фаз и изменение фазового состава определяют отличие процесса расширения пароводяной смеси от расширения газа.

Плотность двухфазной смеси связана с плотностями жидкой и паровой фаз через истинное объемное паросодержание φ

$$\rho = \rho' \cdot (1-\varphi) + \rho'' \cdot \varphi. \tag{19}$$

В модели Таирова и Хан [18] истинное объемное паросодержание выражено через коэффициент скольжения фаз s

$$\varphi = \left(1 + s \cdot \frac{\rho''}{\rho'} \cdot \frac{1-x}{x}\right)^{-1}, \tag{20}$$

который, в свою очередь, выражен функцией от давления P и массового расходного паросодержания x

$$s = 1 + \frac{C_2 \cdot \Omega \cdot (1-\Omega)}{P^{C_3}}, \tag{21}$$

$$\Omega = \left[1 + \frac{C_1 \cdot (1-x)}{x}\right]^{-1},$$

где C_1, C_2 и C_3 – коэффициенты математической модели.

Связь массового расходного паросодержания x с давлением задана условием сохранения энтальпии при расширении смеси

$$h'(P) \cdot (1-x) + h''(P) \cdot x = h'(P_1) \cdot (1-x_1) + h''(P_1) \cdot x_1. \tag{22}$$

Таким образом, правая часть уравнения (18) с учетом уравнений (19 – 22) является функцией давления.

Обыкновенное дифференциальное уравнение (18) с начальными условиями $P(y=0) = P_1$ было решено численно с помощью метода прямоугольников с шагом 0,5 мм, определенным путем удвоения размера сетки до достижения точности 0,1 %. Решение ОДУ (18) даёт выходное давление $P_2 = P(y=H)$ и перепад давления $\Delta P = P_1 - P_2$ при данных значениях входных параметров модели и коэффициентов C_1, C_2, C_3.

3.2 Математическая модель B. Вторая рассмотренная модель решает обратную задачу нахождения массовой скорости ρw_m при известном перепаде давления пароводяной смеси ΔP. Остальные входные параметры те же, что у модели А.

Для получения аналитического выражения решения как прямой, так и обратной задачи, система уравнений (18 – 22) дополнена уравнением политропы с показателем n, не меняющимся вдоль канала:

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^n . \tag{23}$$

Результат интегрирования (18) с учетом (23) имеет вид

$$P_2 = P_1\left[1 - \frac{3}{2}\cdot\frac{m\cdot(m-1)}{\psi\cdot d}\cdot\frac{(\rho w_m)^2}{\rho_1\cdot P_1}\cdot\frac{H}{d}\cdot\frac{n+1}{n}\right]^{\frac{n}{n+1}}, \tag{24}$$

откуда массовая скорость может быть выражена, как функция входного и выходного давлений (или падения давления, т.к. $P_2 = P_1 - \Delta P$):

$$\rho w_m = \sqrt{\frac{2\cdot n}{3\cdot(n+1)}\cdot\frac{d}{H}\cdot\frac{\psi}{m\cdot(1-m)}\cdot P_1\cdot\rho_1\cdot\left[1-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right]}. \tag{25}$$

Как показано Таировым и Хан [4], показатель политропы можно приблизить функцией входного массового расходного паросодержания

$$n = C_4 + C_5\cdot\left[1-\exp\left(\frac{-x_1}{C_6}\right)\right]. \tag{26}$$

Таким образом, математическая модель B задана уравнением (25) для массовой скорости, уравнениями (19 – 21) для ρ_1 и уравнением (26) для показателя политропы. Модель имеет шесть коэффициентов C_1, …, C_6. В качестве начальных значений коэффициентов приняты значения, представленные в работе [4].

4. Вычислительные эксперименты. Используя замеренные значения параметров из всех 430 экспериментов, были решены задачи 0 и I для математических моделей A, B. Решение этих задач было выполнено модифицированным градиентным методом, разработанным в ИСЭМ СО РАН [19, 20]. Данный метод обладает высокой точностью решения и позволяет решать оптимизационные задачи больших размерностей (тысячи оптимизируемых параметров, тысячи ограничений в форме равенств и неравенств).

Очевидно, что в рамках данной статьи невозможно представить расчетные данные по всем проведенным экспериментам, поэтому для демонстрации полученных результатов из 430 опытов были выбраны пять. В табл. 1 представлены замеренные и рассчитанные значения параметров в выбранных экспериментах для математической модели A. В табл. 2 приводятся замеренные и расчетные данные в выбранных для демонстрации экспериментах для математической модели B.

Погрешность измерений при расчетах учитывалась через среднеквадратичное отклонение (СКО) замеряемых параметров (1). Класс точности измерительных датчиков, максимальное значение шкалы прибора и СКО соответственно составили:

- параметр P_1: α_1 = 0,5%, S_1 = 1600 кПа, СКО (σ_1) = 2,67 кПа;
- параметр T_0: α_2 = 0,5%, S_2 = 800 °C, СКО (σ_2) = 1,33 °C;
- параметр ρw_m: СКО рассчитывалось, как 5% от значения параметра;
- параметр ΔP: α_3 = 0,5%, S_3 = 600 кПа, СКО (σ_3) = 1,0 кПа.

В табл. 1 представлены результаты решения оптимизационных задач 0 и I, направленные на определение трех коэффициентов в математической модели A теплофизического процесса. Для демонстрации результатов из 430 экспериментов, участвующих в расчете, были выбраны пять экспериментов, один из которых содержал «плохие» замеры (эксперимент №1) и был отброшен по результатам решения задачи 0.

Таблица 1. Результаты оптимизационных расчетов для пяти выбранных экспериментов из серии (математическая модель А)

Номер эксперимента	Замеряемый параметр	Замеренные значения	Расчетные (оцениваемые) значения замеряемых параметров							
			Задача 0 (все замеры)		Задача 0 (удалены «плохие» замеры)		Задача I (x^{max} = 3,2)		Задача I (без ограничений x^{max})	
			Значение	Относ. погр-ть	Значение	Относ. погр-ть	Значение	Относ. погр-ть	Значение	Относ. погр-ть
1	T_0, °C	203,5	207,18	3,679						
	P_1, кПа	600	592,64	3,679						
	ρw_m, кг/м^{2}с	162	171,93	3,679						
	ΔP, кПа	98	94,32	3,679						
2	T_0, °C	240,8	237,73	3,073	237,70	3,102	237,61	3,195	240,80	0
	P_1, кПа	600	604,36	2,180	606,24	3,122	603,37	1,687	600,00	0
	ρw_m, кг/м^{2}с	503	474,79	3,366	476,70	3,137	476,18	3,200	461,08	5,000
	ΔP, кПа	351	351,84	0,836	354,10	3,104	351,00	0	351,00	0
3	T_0, °C	184,2	187,27	2,366	187,30	3,102	187,40	3,195	184,20	0
	P_1, кПа	600	596,25	1,876	593,76	3,122	593,61	3,197	600,00	0
	ρw_m, кг/м^{2}с	430	452,85	3,189	452,47	3,136	452,93	3,200	480,02	6,980
	ΔP, кПа	231	229,94	1,062	227,90	3,102	227,81	3,195	231,00	0
4	T_0, °C	199,9	203,19	3,291	202,90	2,995	203,10	3,195	199,90	0
	P_1, кПа	900	896,07	1,965	894,98	2,509	893,61	3,197	900,00	0
	ρw_m, кг/м^{2}с	317	334,81	3,371	333,10	3,047	333,90	3,199	356,59	7,493
	ΔP, кПа	284	282,56	1,437	281,80	2,205	281,11	2,892	284,00	0
5	T_0, °C	263,5	262,65	0,847	261,87	1,634	263,50	0	263,50	0
	P_1, кПа	1200	1200,04	0,021	1200,62	0,309	1200,00	0	1200,0	0
	ρw_m, кг/м^{2}с	303	295,86	1,414	291,85	2,207	290,89	2,398	297,25	1,138
	ΔP, кПа	571	571,055	0,055	571,14	0,140	571,00	0	571,00	0

В первых столбцах таблицы приводятся замеренные значения параметров, снятые с измерительных датчиков во время проведения эксперимента. Далее в таблице приводятся рассчитанные (оцениваемые) значения замеряемых параметров, полученные в результате выполнения вычислительных экспериментов на математической модели А. Столбец «задача 0 (все замеры)» содержит результаты решения задачи 0, в котором участвуют все 430 экспериментов. Размерность оптимизационной задачи составила: 1294 оптимизируемых параметра и 3440 ограничений-неравенств.

В оптимальной точке решения было получено значение максимальной относительной погрешности, равной $\bar{x}$ = 3,679. В соответствии с алгоритмом поиска «плохих» замеров, изложенным выше, было установлено, что пять экспериментов оказывают наибольшее влияние на результаты расчета и их устранение повлечет за собой значительное снижение максимальной относительной погрешности. Исключение соответствующих замеров и повторное решение задачи 0 позволило снизить максимальную относительную погрешность до значения $\bar{x}$ = 3,141. Результаты решения данной задачи для выбранных экспериментов приведены во втором столбце таблицы «Задача 0 (удалены «плохие» замеры)».

Далее была решена задача I (таблица 2), в которую входили замеры параметров оставшихся в расчете 425 экспериментов. Размерность оптимизационной задачи составила: 3013

оптимизируемых параметров и 3430 ограничений-неравенств. Параметр x^{max} в постановке задачи I принимает значение чуть большее, чем значение параметра $\bar{x}$ в точке решения задачи 0. В данной работе параметр x^{max} округлялся в большую сторону до ближайшей десятой части числа. Таким образом, максимально-допустимая относительная погрешность измерений была зафиксирована на значении x^{max} = 3,20. Ограничения в виде неравенств (6, 9) необходимы, чтобы не допустить увеличения максимальной относительной погрешности любого из замеров выше установленного значения

Таблица 2. Результаты оптимизационных расчетов для пяти выбранных экспериментов из серии (математическая модель B)

Номер эксперимента	Замеряемый параметр	Замеренные значения	Расчетные (оцениваемые) значения замеряемых параметров							
			Задача 0 (все замеры)		Задача 0 (удалены «плохие» эксп-ты)		Задача I (x^{max} = 2,7)		Задача I (без ограничений x^{max})	
			Значение	Относ. погр-ть	Зна-чение	Относ. погр-ть	Значение	Относ. погр-ть	Значение	Относ. погр-ть
1	T_0, °C	203,5	207,18	3,684						
	P_1, кПа	600	592,63	3,684						
	ρw_m, кг/м^{2}с	162	171,95	3,684						
	ΔP, кПа	98	94,32	3,684						
2	T_0, °C	240,8	237,74	3,057	238,15	2,653	238,10	2,697	240,80	0
	P_1, кПа	600	604,09	2,043	605,31	2,653	605,00	2,501	600,00	0
	ρw_m, кг/м^{2}с	503	474,97	3,343	480,76	2,653	480,37	2,700	463,86	4,669
	ΔP, кПа	351	351,77	0,774	353,65	2,653	351,01	0,004	351,00	0
3	T_0, °C	184,2	187,77	3,567	186,85	2,653	186,90	2,698	184,20	0
	P_1, кПа	600	593,57	3,215	594,69	2,653	594,60	2,699	600,00	0
	ρw_m, кг/м^{2}с	430	355,70	3,586	449,02	2,653	449,35	2,700	470,99	5,719
	ΔP, кПа	231	228,18	2,821	228,35	2,653	228,35	2,649	231,00	0
4	T_0, °C	199,9	203,35	3,453	202,55	2,653	202,60	2,698	199,90	0
	P_1, кПа	900	895,03	2,486	894,69	2,653	894,60	2,699	900,00	0
	ρw_m, кг/м^{2}с	317	335,46	3,494	331,02	2,653	331,26	2,700	346,67	5,616
	ΔP, кПа	284	281,93	2,071	281,35	2,653	281,30	2,698	284,00	0
5	T_0, °C	263,5	262,29	1,211	262,75	0,746	263,5	0	263,50	0
	P_1, кПа	1200	1200,12	0,058	1200,10	0,049	1200,00	0	1200,00	0
	ρw_m, кг/м^{2}с	303	294,25	1,733	297,25	1,140	296,23	1,340	295,75	1,435
	ΔP, кПа	571	571,07	0,073	571,05	0,048	571,00	0	571,00	0

Результаты решения задачи I для выбранных экспериментов приводятся в столбце «Задача I (x^{max} = 3,2)». Из таблицы видно, что для тех экспериментов, которые выполнены наиболее точно, относительная погрешность замеров стремится к нулю (эксперимент №5). Однако для экспериментов, которые были выполнены менее точно (или в точках, где математическая модель процесса недостаточно корректно описывает реальные процессы, происходящие в установке) максимальная погрешность замеров может достигать установленной границы для нескольких или даже всех замеров в данном эксперименте (эксперименты №2–4).

В последнем столбце таблицы приводятся результаты решения задачи I, в постановке которой отсутствуют ограничения-неравенства на максимальное значение относительных погрешностей замеров (6, 9). Расчеты показывают, что в оптимальной точке относительные погрешности трех из четырех замеряемых параметров в эксперименте стремятся к нулю, а оставшийся параметр «компенсирует» погрешности этих замеров. Максимальная относительная

погрешность в данном случае составила 7,493, что более чем в два раза превышает максимальную относительную погрешность, полученную в результате решения задачи 0.

В табл. 2 представлены результаты решения оптимизационных задач 0 и I, направленные на определение шести коэффициентов в математической модели B теплофизического процесса. В таблице отражены результаты тех же экспериментов, что были выбраны для демонстрации результатов модели A в табл. 1.

Решение задачи 0 для всех 430 экспериментов позволило получить значение максимальной относительной погрешности, равной $\overline{x}$ = 3,684. Также было выявлено, что пять экспериментов содержат «плохие» замеры и их следует исключить из расчета для снижения значения целевой функции до приемлемого значения. Причем пять отброшенных экспериментов оказались теми же, что и для математической модели A, что дополнительно подтверждает их ошибочность. В результате повторного решения задачи 0 максимальная относительная погрешность была минимизирована до значения $\overline{x}$ = 2,653. Далее была решена задача I с максимально-допустимой относительной погрешностью измерений, зафиксированной на значении x^{max} = 2,70. Кроме того, была решена задача I без ограничений на максимальную относительную погрешность измерений.

Главной целью выполненных расчетов является определение настраиваемых коэффициентов математических моделей, представленных в данной работе. Математические модели с оптимальными значениями этих коэффициентов наиболее точно отражают теплофизические процессы, происходящие в экспериментальной установке в заданном диапазоне изменения замеряемых параметров и начальных условий. В табл. 3 приводятся значения трех настраиваемых коэффициентов математической модели A после решения задач 0 и I. В табл. 4 приводятся значения шести настраиваемых коэффициентов математической модели B после решения задач 0 и I.

Таблица 3. Значения коэффициентов математической модели A

Коэффициент	Задача 0 (все замеры)	Задача 0 (удалены «плохие» замеры)	Задача I (x^{max} = 3,2)	Задача I (без ограничений x^{max})
C_1	0,0836	0,0785	0,0800	0,0807
C_2	11,07	10,55	10,92	11,78
C_3	0,234	0,329	0,292	0,195

Таблица 4. Значения коэффициентов математической модели B

Коэффициент	Задача 0 (все замеры)	Задача 0 (удалены «плохие» замеры)	Задача I (x^{max} = 2,7)	Задача I (без ограничений x^{max})
C_1	0,0875	0,0929	0,0949	0,0895
C_2	10,15	9,82	9,53	9,50
C_3	0,335	0,314	0,302	0,281
C_4	0,810	0,509	0,720	0,700
C_5	0,100	0,500	1,000	1,000
C_6	1,000	0,100	0,573	0,456

Используя оптимальные значения настраиваемых коэффициентов математической модели (после решения задачи I), можно построить графики зависимостей падения давления от массовой скорости (для математической модели A) и зависимость массовой скорости от падения давления (для математической модели B) при различных значениях входного массового расходного паросодержания *x*. В качестве примера на рисунках 2, 3 приведены вышеописанные зависимости в виде полиномов для следующих начальных условий: P_1 = 600 кПа, d = 2 мм, H = 50 мм.

Также на рисунках 2, 3 отмечены замеренные значения 42 выполненных экспериментов (один из которых был отмечен как выброс или «плохой» замер) при данных начальных условиях и соответствующие им значения рассчитанных (оцениваемых) на математической модели параметров.

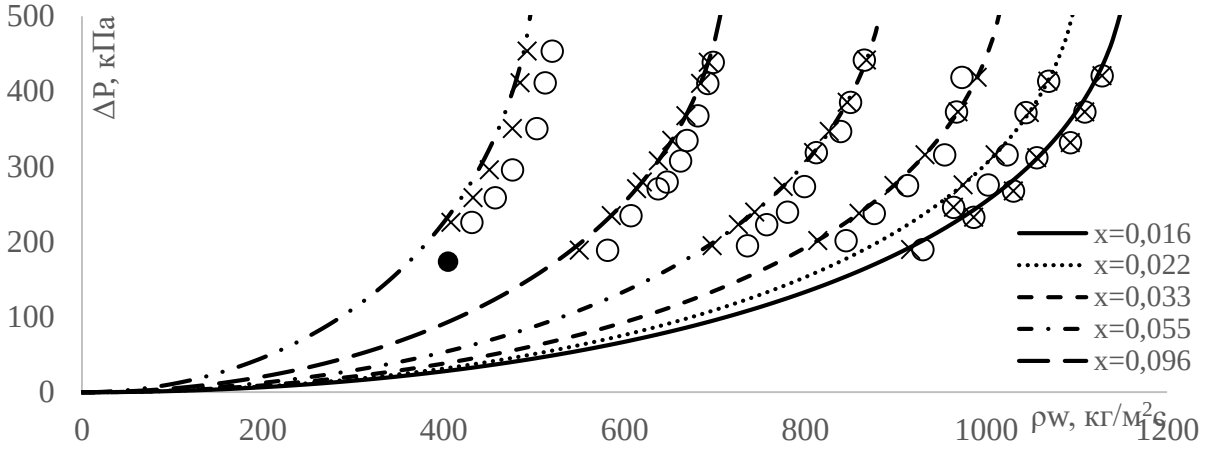


Рис. 2. Зависимости ΔP от ρw_m при различных значениях x для математической модели А при P_1=600 кПа, H=50 мм, d=2 мм

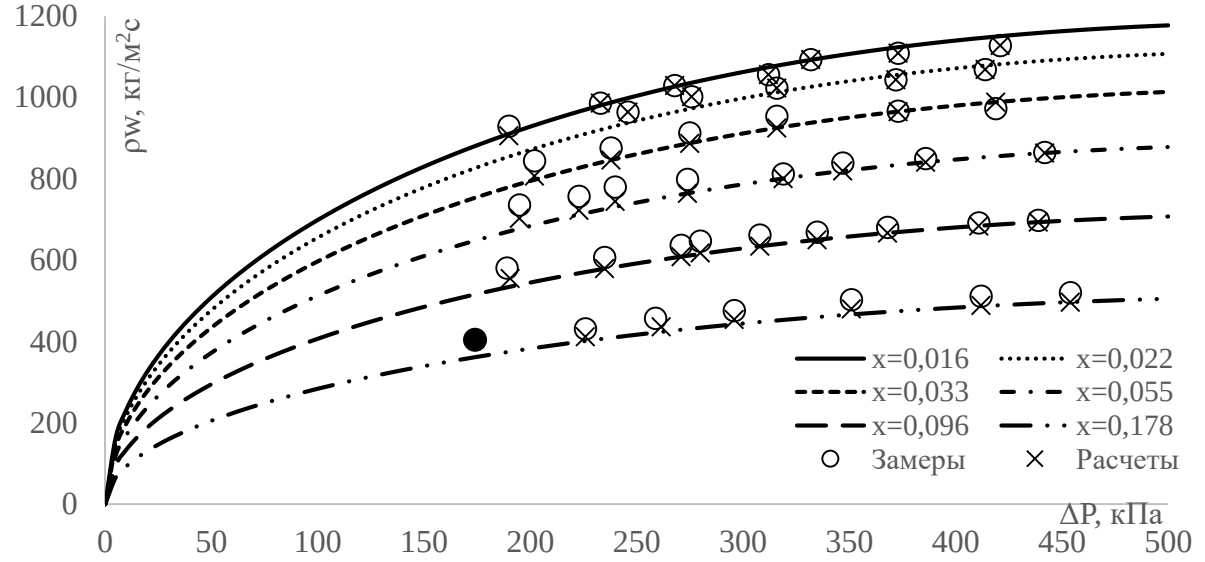


Рис. 3. Зависимости ρw_m от ΔP при различных значениях x для математической модели В при P_1=600 кПа, H=50 мм, d=2 мм

Как отмечалось выше, предлагаемая методика обработки результатов экспериментальных данных позволяет выполнить оценку точности проведенной настройки коэффициентов математической модели теплофизического эксперимента, основываясь на результатах решения оптимизационных задач 0 и I по критерию максимального правдоподобия (17). Более того, данный критерий может использоваться для сравнения различных математических моделей, описывающие один и тот же теплофизический эксперимент, между собой.

В табл. 5 приводится сравнительная оценка математических моделей А, В по суммарной относительной погрешности измерений и критерию максимального правдоподобия. Анализ полученных результатов показывает, что математическая модель В более точна, чем математическая модель А. Этот вывод следует из того, что значение критерия максимального правдоподобия после решения задачи I на 15% больше в случае модели В. Кроме того, средняя относительная погрешность измерений на 18% больше при расчетах математической модели А. Таким образом, результаты вычислений указывают на то, что математическая модель В

лучше подходит для описания проведенных опытов на представленной лабораторной установке. Модель А имеет более высокое значение средней, суммарной и максимальной относительной погрешности, а также меньшее значения критерия максимального правдоподобия.

Таблица 5. Сводная таблица критериев точности для математических моделей А, В

Критерий, обозначение	Математическая модель А				Математическая модель В			
	Задача 0 (все замеры)	Задача 0 (удалены «плохие» замеры)	Задача I (x^{max} = 3,2)	Задача I (без ограничений x^{max})	Задача 0 (все замеры)	Задача 0 (удалены «плохие» замеры)	Задача I (x^{max} = 2,7)	Задача I (без ограничений x^{max})
Количество экспериментов, участвующих в расчете, N_e	430	425	425	425	430	425	425	425
Количество замеров, участвующих в расчете	1720	1700	1700	1700	1720	1700	1700	1700
Максимальная относительная погрешность замеров, $\overline{x}$	3,679	3,141	3,200	7,572	3,684	2,653	2,700	6,910
Сумма модулей относительных погрешностей для всех экспериментов	1261	1244	945	874	1281	1276	777	702
Средняя относительная погрешность, приходящаяся на 1 замер	0,733	0,723	0,556	0,514	0,745	0,751	0,457	0,413
Функция правдоподобия для всех экспериментов, F^{PR}	3,926	4,032	4,711	4,822	3,793	3,894	5,517	5,621
Среднее значение функции правдоподобия, приходящееся на 1 эксперимент	0,00913	0,00938	0,01108	0,01135	0,00882	0,00916	0,01298	0,01323

Необходимо отметить, что полученные результаты (табл. 5) позволяют объективно оценить преимущество двухэтапного подхода при обработке результатов экспериментальных данных, когда сперва решается задача 0, при которой минимизируется максимальная относительная погрешность и устраняются «плохие» замеры параметров (при их наличии), а затем решается задача I, позволяющая достичь значительного увеличения критерия максимального правдоподобия и снижения средней погрешности измерений. Так, применительно к математической модели А критерий максимального правдоподобия увеличился на 18%, а средняя погрешность измерений снизилась на 24% после решения задачи I. Вычислительные экспери-

менты, выполненные на математической модели B, демонстрируют большее увеличение точности идентификации параметров модели: критерий максимального правдоподобия увеличился на 32%, а средняя погрешность измерений снизилась на 45% после решения задачи I.

Можно заметить, что лучшие результаты, как по критерию максимального правдоподобия, так и по средней погрешности измерений, дает решение задачи I без ограничения по максимальной относительной погрешности x^{max}. С другой стороны, при такой постановке оптимизационной задачи максимальная относительная погрешность может выходить за разумные пределы и быть в разы больше, чем ее значение после решения задачи 0 и значительно превышать погрешность «три сигма».

Заключение. Разработан оригинальный подход к обработке результатов теплофизических экспериментов, основанных на решении задач нелинейного математического программирования двух видов. Вначале решается задача на минимизацию максимальной относительной погрешности среди всех замеров в серии экспериментов, что позволяет выявлять «плохие» замеры и получить значение максимальной относительной погрешности, близкой к «трем сигма». Вторая задача направлена на минимизацию суммы модулей относительных погрешностей измерений, приводящую к значительному возрастанию критерия максимального правдоподобия.

Представлены схема экспериментальной установки и описание двух математических моделей, отражающих протекающие в ней теплофизические процессы. Приведены результаты решения оптимизационных задач, направленных на определение оптимальных значений настраиваемых коэффициентов математических моделей с вычислением средней погрешности и критерия максимального правдоподобия.

Представленный в данной работе подход к обработке экспериментальных данных показал хорошую эффективность и высокую точность настройки коэффициентов математических моделей рассмотренного теплофизического процесса. Результаты решения задач указали на то, что математическая модель B лучше подходит для описания результатов выполненных экспериментов. Стоит отметить, что представленный в данной работе подход является достаточно универсальным и может использоваться для идентификации параметров различных математических моделей по результатам выполненных измерений на экспериментальной установке в разных режимах ее работы.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур" (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Список источников

1. Идье В. Статистические методы в экспериментальной физике / В. Идье, Д. Драйард, Ф. Джеймс, М. Рус, Б. Садуле. Пер. с англ. под ред. А.А. Тяпкина. – М.: Атомиздат, 1976. – 335с.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — 10-е изд., стереотипное. – М.: Academia, 2005. – С. 576.
3. Клер А.М. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом реального состояния основного оборудования / А.М. Клер, А.С. Максимов, Е.Л. Степанова [и др.] // Теплоэнергетика. – 2009. – № 6. – С. 50-54.
4. Tairov E., Khan P. Modeling the mass velocity and pressure drop of forced vapor-liquid flow through a granular bed. Int. J. Multiph. Flow, 2020, vol. 133, 103466, DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103466.
5. Vitalii Alekseiuk Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment. ENERGY-21 – Sustainable development & Smart management, E3S Web Conf., 2020, vol. 209, 03002, DOI:10.1051/e3sconf/202020903002.
6. Liu L., Deng J., Zhang D., Wang C., Qiu S., Su. G.H. Experimental analysis of flow and convective heat transfer in the water-cooled packed pebble bed nuclear reactor core. Prog. Nucl. Energy, 2020, vol. 122, 103298, DOI:10.1016/j.pnucene.2020.103298.

7. Шигаров А.Б. Моделирование мембранного реактора парового риформинга метана: от зернистого к структурированному катализатору / А.Б. Шигаров, В.А. Кириллов // Теоретические основы химической технологии, 2012. – Т. 46. – № 2. – С. 97-107.
8. Сморчкова Ю.В. Численное моделирование гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках / Ю.В. Сморчкова, А.В. Дедов // Современная наука. Исследования, идеи, результаты, технологии. НПВК "Триакон", 2013. – Т. 1. – № 12. – С. 62-67.
9. Таиров Э.А. Критическое истечение парожидкостного потока через слой шаровых частиц / Э.А. Таиров, Б.Г. Покусаев, С.М. Быкова // Теплофизика Высоких Температур, 2016. – Т. 54. – № 2. – С. 277-286. DOI:10.7868/S0040364416020228.
10. Avdeev A.A., Soziev R.I. Hydrodynamic drag of a flow of steam-water mixture in a pebble bed. High Temp., 2008, vol. 46, pp. 223-228, DOI:10.1134/s10740-008-2011-0.
11. Зейгарник Ю.А. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления пористых структур при адиабатическом движении пароводяных смесей / Ю.А. Зейгарник, И.В. Калмыков // Теплофизика высоких температур, 1985. – Т. 23. – № 5. – С. 934-940.
12. Сорокин В.В. Расчет двухфазного адиабатического течения в шаровой засыпке / В.В. Сорокин // Теплофизика высоких температур, 2007. – Т. 45. – № 2. – С. 261-266.
13. Tung V.X., Dhir V.K. A hydrodynamic model for two-phase flow through porous media. Int. J. Multiph. Flow, 1988, vol. 14, no. 1, pp. 47-65, DOI:10.1016/0301-9322(88)90033-X.
14. Lipinski R. A model for cooling and dryout in particle beds. Technical Report SAND 82-0765, NUREG, CR-2646, 1982, DOI:10.2172/5114771.
15. Clavier R., Chikhi N., Fichot F., Quintard M. Modeling of inertial multi-phase flows through high permeability porous media: Friction closure laws. Int. J. Multiph. Flow, 2017, vol. 91, pp. 243-261, DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.02.003.
16. Park J.H., Park H.S., Lee M., Moriyama K. Modeling of pressure drop in two-phase flow of mono-sized spherical particle beds. Int. J. Heat Mass Transf., 2018, vol. 127, pp. 986-995, DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.040.
17. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое / М. А. Гольдштик // Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2005. – 358 с.
18. Хан П.В. Технология многофакторного регрессионного анализа данных физического и математического моделирования на основе программы GNUPLOT / П.В. Хан, Э.А. Таиров // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2017. – Т. 4. – № 8. – С. 109-119.
19. Клер А.М. Эффективные методы схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических установок: разработка и применение / Под. ред. А.М. Клера // Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. –145 с.
20. Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. Energy, 2019, 116230, DOI:10.1016/j.energy.2019.116230.

Клер Александр Матвеевич. *Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 20219, SPIN: 8502-2561, ORCID: 0000-0002-0460-9062, kler@isem.irk.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова 130,*

Алексеюк Виталий Эдуардович. *Кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, доцент кафедры теплоэнергетики, Иркутский национальный исследовательский технический университет, AuthorID: 1149694, SPIN: 6956-2240, ORCID: 0000-0002-4226-0519, alexeyuk.vita-liy@yandex.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова 83.*

Левин Анатолий Алексеевич. *Кандидат технических наук, заведующий лабораторией динамики парогенерирующих систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 163204, SPIN: 3144-7341, ORCID: 0000-0002-3268-5302, levin@isem.irk.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова 130.*

Хан Полина Вениаминовна. *Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики парогенерирующих систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 602360, SPIN: 9952-0398, ORCID: 0000-0001-6912-8481, polinakhan@isem.irk.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова 130.*

UDC 51.72+532.546.2
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.003

A method for processing the results of thermophysical experiments based on solving two types of problems of nonlinear mathematical programming

Aleksandr M. Kler[1], Vitalii E. Alekseiuk[1,2], Anatolii A. Levin[1], Polina V. Khan[1]
[1]Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, *alexeyuk.vitaliy@yandex.ru*
[2]Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

Abstract. The purpose of this study is to develop an effective method for processing the results of thermophysical experiments based on solving two types of nonlinear mathematical programming problems. The article provides a description of the proposed method for identifying the coefficients of the mathematical model of a thermophysical experiment based on the results of measured experimental data. We also consider two mathematical models that interpret the results of the performed field experiments. The technique presented in the article is based on the maximum likelihood method and takes into account the relative errors of all sensors used to obtain the values of the measured parameters. Moreover, the technique involves a two-stage approach in solving the problem of identifying the parameters of a mathematical model. At the first stage, the maximum relative error among the measured parameters is minimized, which makes it possible to identify and eliminate "bad" measurements. Further, at the second stage, the sum of the modules of relative errors of all measured parameters is minimized. Computational experiments have shown that this approach is more efficient than the classical least squares method, which is sensitive to the presence of "bad" measurements and, under certain conditions, can become a ravine function. The last section of the article presents the results of computational experiments testing the proposed method. Calculations have shown that this approach is very effective and allows you to adjust the coefficients of mathematical models with high accuracy.

Keywords: thermophysical experiment, identification of parameters, nonlinear mathematical programming, relative error, measured parameters, maximum likelihood criterion, method of least modules, mathematical model

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of Russian Federation2021-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.CKP.21.0038).

References

1. Eadie W.T., Dryard D., James F.E., Roos M., Sadoulet B. Statistical methods in experimental physics [Statistich-eskiye metody v eksperimental'noy fizike]. M.: Atomizdat [Atomizdat] , 1971, 335p.
2. Venttsel' Ye. S. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Moscow: Academia [Academia], 2005, 576 p.
3. Kler A.M. Optimizatsiya rezhimov raboty TETS s uchetom real'nogo sostoyaniya osnovnogo oborudo-vaniya [Optimizing the operating modes of cogeneration stations taking actual state of main equipment into account]. Tep-loenergetika [Thermal Power Engineering], 2009, vol. 56, pp. 500-505, DOI:10.1134/S0040601509060081.
4. Tairov E., Khan P. Modeling the mass velocity and pressure drop of forced vapor-liquid flow through a granular bed. Int. J. Multiph. Flow, 2020, vol. 133, 103466, DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103466.
5. Vitalii Alekseiuk Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment. ENERGY-21 – Sustainable development & Smart management, E3S Web Conf., 2020, vol. 209, 03002, DOI:10.1051/e3sconf/202020903002.
6. Liu L., Deng J., Zhang D., Wang C., Qiu S., Su. G.H. Experimental analysis of flow and convective heat transfer in the water-cooled packed pebble bed nuclear reactor core. Prog. Nucl. Energy, 2020, vol. 122, 103298, DOI:10.1016/j.pnucene.2020.103298.
7. Shigarov A.B., Kirillov V.A. Modelirovanie membrannogo reaktora parovogo riforminga metana: ot zernistogo k strukturirovannomu katalizatoru [Modeling of membrane reactor for steam methane reforming: from granular to structured catalysts]. Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii [Theoretical Foundations of Chemical En-gineering], 2012, vol. 46. no. 2, pp. 97-107.
8. Smorchkova IU.V., Dedov A.V. Chislennoe modelirovanie gidrodinamiki i teploobmena v sharovykh zasypkakh [Numerical simulation of hydrodynamics and heat transfer in spherical fillings]. Sovremennaya nauka. Issledo-vaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii. NPVK “Triakon” [Modern science. Research, ideas, results, technologies. NPVK “Triacon”], 2013, vol. 1, no. 12, pp. 62-67.

9. Tairov E.A., Pokusaev B.G., Bykova S.M. Kriticheskoe istechenie parozhidkostnogo potoka cherez sloi sharovykh chastits. [Critical outflow of a vapor-liquid flow through a layer of spherical particles]. Teplofizika vysokikh temperatur [Thermophysics of High Temperatures], 2016, vol. 54, no. 2, pp. 277-286, DOI:10.7868/S0040364416020228
10. Avdeev A.A., Soziev R.I. Hydrodynamic drag of a flow of steam-water mixture in a pebble bed. High Temp., 2008, vol. 46, pp. 223-228, DOI:10.1134/s10740-008-2011-0.
11. Zeigarnik IU.A., Kalmykov I.V. Eksperimental'noe issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniya poristykh struktur pri adiabaticheskom dvizhenii parovodyanykh smesey [Experimental study of the hydraulic resistance of porous structures during adiabatic motion of steam-water mixtures]. Teplofizika vysokikh temperatur [Thermophysics of High Temperatures], 1985, vol. 23, no. 5, pp. 743-749.
12. Sorokin V.V. Raschet dvukhfaznogo adiabaticheskogo techeniya v sharovoy zasypke [Calculation of two-phase adiabatic flow in a pebble bed]. Teplofizika vysokikh temperatur [Thermophysics of High Temperatures], 2007, vol. 45, no. 2, pp. 227-232.
13. Tung V.X., Dhir V.K. A hydrodynamic model for two-phase flow through porous media. Int. J. Multiph. Flow, 1988, vol. 14, no. 1. pp. 47-65, DOI:10.1016/0301-9322(88)90033-X.
14. Lipinski R. A model for cooling and dryout in particle beds. Technical Report SAND 82-0765, NUREG, CR-2646, 1982, DOI:10.2172/5114771.
15. Clavier R., Chikhi N., Fichot F., Quintard M. Modeling of inertial multi-phase flows through high permeability porous media: Friction closure laws. Int. J. Multiph. Flow, 2017, vol. 91, pp. 243-261, DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.02.003.
16. Park J.H., Park H.S., Lee M., Moriyama K. Modeling of pressure drop in two-phase flow of mono-sized spherical particle beds. Int. J. Heat Mass Transf., 2018, vol. 127, pp. 986-995, DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.040.
17. Goldshtik M.A. Protsessy perenosa v zernistom sloe [Transport Processes in Granular Layer]. Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN [Institute of Thermal Physics SB RAS], 2005, 358 p.
18. Khan P.V., Tairov E.A. Tekhnologiia mnogofaktornogo regressionnogo analiza dannykh fizicheskogo i matematicheskogo modelirovaniia na osnove programmy GNUPLOT. [Technology of multivariate regression analysis of physical and mathematical modeling data based on the GNUPLOT program]. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2017, vol. 4, no. 8, pp. 109-119.
19. Kler A.M. Effektivnye metody skhemno-parametricheskoi optimizatsii slozhnykh teploenergeticheskikh ustanovok: razrabotka i primenenie. [Effective methods of circuit-parametric optimization of complex thermal power plants: development and application]. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo «Geo» [Academic publishing house "Geo"], 2018, 145 p.
20. Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. Energy, 2019, 116230, DOI:10.1016/j.energy.2019.116230.

Kler Aleksandr Matveevich. *Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Thermal Power Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 20219, SPIN: 8502-2561, ORCID: 0000-0002-0460-9062, kler@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, st. Lermontov 130.*

Alekseiuk Vitalii Eduardovich. *Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, Laboratory for Research of Power Installations, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering, Irkutsk National Research Technical University, AuthorID: 1149694, SPIN: 6956-2240, ORCID: 0000-0002-4226-0519, alexeyuk.vitaliy@yandex.ru, Russia, Irkutsk, st. Lermontov 83.*

Levin Anatolii Alekseevich. *Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Dynamics of Steam-Generating Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, SPIN: 3144-7341, ORCID: 0000-0002-3268-5302, levin@isem.irk.ru, 163204, Russia, Irkutsk, st. Lermontov 130.*

Khan Polina Veniaminovna*. Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Dynamics of Steam-Generating Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 602360, SPIN: 9952-0398, ORCID: 0000-0001-6912-8481, polinakhan@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, st. Lermontov 130.*

Статья поступила в редакцию 01.06.2022; одобрена после рецензирования 30.09.2022; принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 06/01/2022; approved after reviewing 09/30/2022; accepted for publication 11/01/2022.

УДК 621.565.83:629.7
DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.004

Численное и физическое моделирование работы системы тепловых труб для отвода тепла от радиоэлектронного оборудования различного назначения

Соколов Никита Юрьевич[1], Кулагин Владимир Алексеевич[2]
[1]Информационные спутниковые системы им. акад. М.Ф. Решетнёва,
Россия, Железногорск, *nikita436@gmail.com*
[2]Сибирский федеральный университет,
Россия, Красноярск, *v.a.kulagin@mail.ru*

Аннотация. Представлена новая математическая модель системы цилиндрических тепловых труб с составным фитилем. Приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований системы тепловых труб (СТТ) для обеспечения отвода заданной тепловой мощности от радиоэлектронного оборудования различного назначения, определена ее минимальная масса. Установлены предельные значения отводимой тепловой мощности одиночной тепловой трубы, двухуровневой СТТ в условиях гравитационного поля. Согласно экспериментальным данным СТТ способна отводить 667 Вт/кг с высоты 0,11 м при температуре минус 5 °С, 910 Вт/кг при температуре плюс 40 °С. Представленные результаты работы позволяют оптимально решать многие инженерные задачи, связанные с передачей тепловой мощности с минимальными потерями, охлаждением и термостатированием или термостабилизацией различных объектов, использующихся как на Земле, так и в космическом пространстве.

Ключевые слова: цилиндрическая тепловая труба, система тепловых труб, охлаждение радиоэлектронной аппаратуры, высокая плотность тепловой мощности

Цитирование: Соколов Н.Ю. Численное и физическое моделирование работы системы тепловых труб для отвода тепла от радиоэлектронного оборудования различного назначения / Соколов Н.Ю., Кулагин В.А. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 50–69. – DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.004.

Введение. Актуальность работы обусловлена необходимостью улучшения предельных характеристик систем охлаждения (СО) на базе тепловых труб (ТТ) в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов (КА) негерметичного исполнения. Одним из непременных условий надежного функционирования КА и его служебных систем, а также оборудования полезной нагрузки является обеспечение необходимого теплового режима всех его компонентов. Тенденция развития современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) тесно связана с усложнением проблемы её охлаждения. Для минимизации массо-энергетических параметров СО целесообразно использовать принцип естественной, нерегулируемой передачи тепловой мощности с более высокого температурного уровня на низкий. Наиболее предпочтительным средством реализации этого принципа являются ТТ, работающие на основе замкнутого испарительно-конденсационного цикла. РЭА КА конструируется таким образом, чтобы тепловая мощность от электрорадиоизделий (ЭРИ) передавалась к определенной теплоотводящей поверхности, например, к поверхности, которой РЭА устанавливается на систему терморегулирования КА.

Обзор конструкций и форм ТТ представлены в работе [1]. Классическая ТТ круглого сечения с пористым фитилем является наиболее дешевой и простой в изготовлении. Однако круглое сечение неудобно для обеспечения тепловых контактов с плоскими поверхностями, необходимы переходные пластины. Кроме того, перенос тепла осуществляется только в одном измерении вдоль ТТ. Последние два десятилетия увеличение мощности и компактности электронных устройств способствовало развитию и активному использованию ТТ для охлаждения электроники. Сейчас ТТ можно встретить повсеместно в системах

охлаждения электронных компонентов в персональных компьютерах, ноутбуках, смартфонах и других устройствах [2, 3].

Основополагающие исследования в этой области были выполнены авторами: М.Н. Ивановским, В.П. Сорокиным, И.В. Ягодкиным, Л.Л. Васильевым и др. В частности, была продемонстрирована оптимизация параметров ТТ, а также способы соединения ТТ. Проведенное Л.Л. Васильевым комплексное экспериментальное исследование процессов тепло- и массообмена в миниатюрных ТТ плоской и цилиндрической формы [4], изготовленных из меди, с водой в качестве теплоносителя, с тремя типами капиллярных структур (порошковой, сеточной и образованной пучком тонких проволок) в широком диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров определяет предел теплопередающих способностей ≈ 20 Вт для миниатюрной ТТ длиной 0,2 м и внешним диаметром 4 мм для вертикальной ориентации (нагреватель над термостабилизированной поверхностью), длине испарителя 0,07 м и длине конденсатора 0,085 м. Поскольку массовый расход будет переменным как в испарителе, так и в конденсаторе, то для этих участков следует использовать не их геометрическую, а некую «эффективную длину». Если изменение массы на единицу длины постоянно, то полный массовый расход для этих участков будет линейно нарастать или убывать, т.е в расчете «эффективной длины» учитывается половина длины испарителя и конденсатора. Можно считать, что реальное перемещение теплоносителя в миниатюрной ТТ составляло не более 0,125 м. Кроме того, в реальных конструкциях РЭА форма ТТ всегда изогнутая, поэтому снимать характеристики ТТ необходимо на С-образной форме, где испаритель и конденсатор занимают горизонтальные части, а адиабатическая зона занимает вертикальную часть.

Плоские ТТ работают по тому же принципу, но обеспечивают перенос тепла в двух измерениях вдоль своей плоской поверхности. Плоская форма позволяет напрямую присоединять к поверхности ТТ плоские источники тепла, такие, как микропроцессоры или радиоэлектронные платы. Важным преимуществом плоских ТТ является возможность трансформации плотности теплового потока с низким перепадом температуры, это позволяет решать задачу распределения теплового потока с высокой плотностью на большую площадь, например, при охлаждении мощных миниатюрных электронных компонентов [5, 6].

Плоские ТТ состоят из плоского тонкого герметичного корпуса, капиллярной структуры и теплоносителя. Капиллярная структура является наиболее важным компонентом ТТ. Существуют разнообразные типы капиллярных структур, которые можно грубо классифицировать следующим образом: канавки, сетки, спеченные металлические порошки или их комбинации. В литературе можно найти множество исследований, посвященных плоским ТТ с канавками [6-8]. Канавки обладают низким гидравлическим сопротивлением и обеспечивают перенос тепла на большие расстояния по сравнению с другими типами капиллярных структур. Слабый капиллярный напор канавок препятствует эффективной работе ТТ против сил гравитации. Отводимая плотность теплового потока обычно ниже по сравнению с другими типами капиллярных структур.

Фитили в виде сеток или волокон также часто рассматриваются в качестве капиллярных структур для плоских ТТ [9-11]. Капиллярный напор таких фитилей и отводимая плотность теплового потока зависят от размера ячеек и обычно выше, чем для ТТ с канавками. Фитили с сетками или волокнами широко используются в ультратонких плоских ТТ, которые имеют толщину менее 2 мм [12]. Однако ультратонкие ТТ, в основном, нацелены на использование в миниатюрных мобильных электронных устройствах с невысокой тепловой нагрузкой около 10 Вт. Плоские ТТ с фитилями из спеченных металлических порошков исследуются очень активно [13-16]. Особым классом плоских ТТ является гипертеплопроводящая секция (ГТПС) [12]. Исследования медной ГТПС

показывают, при вертикальной ориентации и нагревателе во всю ширину ГТПС предел теплопередающих способностей ≈ 35 Вт при «эффективной длине» 0,11 м. Капиллярные структуры из спеченных металлических порошков могут иметь высокую прочность. Недостатком таких фитилей является большое гидравлическое сопротивление, которое ограничивает расстояние переноса тепла. Для компенсации недостатков часто используются гибридные конструкции капиллярных структур в виде комбинаций сеток с канавками или со спеченными фитилями [17-20]. Это позволяет комбинировать преимущества разных типов капиллярных структур.

В области математического моделирования процессов теплопередачи ТТ представляют большой интерес работы В.А. Деревянко и Д.А. Нестерова в ФИЦ ИВМ КНЦ СО РАН [21-24]. Однако, в условиях повышенных требований к высокой точности определения характеристик тепловых труб, имеющихся данных оказывается недостаточно, в известных литературных источниках не проведена оценка возможности преобразования одиночной ТТ в систему последовательно соединенных ТТ (СТТ).

Система охлаждения, построенная на базе СТТ, позволяет значительно минимизировать массогабаритные характеристики по сравнению с консервативными СО, использующими прямое соединение одиночной ТТ [25-32]. Для ТТ из состава СТТ подобран наиболее перспективный тип фитиля – **составной фитиль**, изображен на рис. 1 (см. выносной элемент А). Фитиль ТТ обеспечивает транспортирование теплоносителя от конденсатора к испарителю. В поперечном сечении составного фитиля капиллярное давление распределено не равномерно. Капиллярное давление теплоносителя в пористом фитиле превышает капиллярное давление теплоносителя в канавчатом фитиле. Высота поднятия теплоносителя в капилляре обратно пропорциональна его радиусу (формула Жюрена) [33]. Пористый фитиль имеет радиус капилляров 30–40 мкм, максимальная высота поднятия теплоносителя составляет 0,36 м. В данном случае пористый фитиль дополняет канавчатый фитиль и необходим для преобразования канавок в капилляры, что позволяет поднять теплоноситель по капиллярам 180–200 мкм на высоту до 0,074 м.

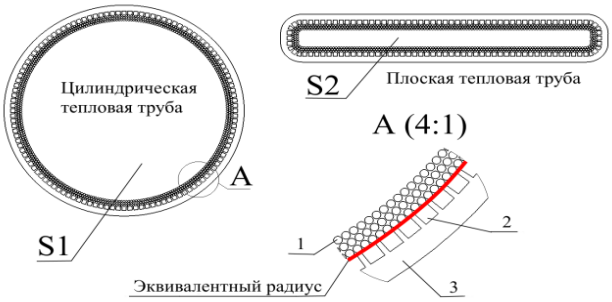


Рис. 1. Внутренне строение цилиндрической ТТ с составным фитилем: 1 – пористый фитиль, 2 – канавчатый фитиль, 3 – металлический корпус; S1 – площадь газового канала цилиндрической ТТ; S2 – площадь газового канала плоской ТТ

В составном фитиле, согласно закону Дарси, потери давления при стационарном ламинарном течении теплоносителя в пористом фитиле может на два порядка превышать потери давления в закрытом канавчатом фитиле. Когда расположение источника тепловой мощности по высоте не превышает максимальной высоты поднятия теплоносителя закрытым канавчатым фитилем, вклад пористого фитиля в транспортирование теплоносителя составляет менее 2 %.

Для ТТ из состава СТТ выбрана наиболее перспективная для РЭА и стабильная (не корродирующая) пара металла и теплоносителя – медь с водой. Характеристики медно-

водяных ТТ сильно зависят от температуры (вязкость, плотность и давление паров теплоносителя; вязкость жидкости; поверхностное натяжение), поэтому в СТТ с учетом роста температуры в зонах соединения ТТ верхние уровни СТТ работают эффективнее нижних, что позволяет отводить значительно большую тепловую мощность от ЭРИ с большей плотностью теплового потока. В отрицательном диапазоне рабочих температур медно-водяная ТТ частично продолжает работать, транспортирование теплоносителя прекращается в зоне ТТ с температурой ниже 0 °С, граница зон определяется тепловым балансом. Прочие теплоносители (ацетон, аммиак, метиловый спирт и т.п.), не замерзающие во всем диапазоне рабочих температур РЭА, уступают воде по теплоте парообразования в 2–4 раза, соответственно фитиль ТТ должен пропорционально больше транспортировать теплоносителя к испарителю, что достигается за счет увеличения поперечной площади фитиля. Увеличение поперечной площади фитиля приводит к резкому увеличению массы ТТ вследствие увеличения поперечной площади металлической оболочки. В СТТ второй и последующие уровни работают в положительном диапазоне температур, что обеспечивает их высокие теплотранспортные характеристики.

При разработке систем охлаждения для источников тепловой мощности, расположенных на высоте более 0,07 м, возникает вопрос о рациональности использования прямого соединения одиночной ТТ, поскольку замена составного фитиля на пористый фитиль приводит к резкому увеличению внутреннего объема ТТ. Таким образом, СТТ на базе цилиндрических медно-водяных ТТ с составным фитилем может значительно снизить массу СО.

Математическая модель комплексной оптимизации массогабаритных характеристик СТТ во всем диапазоне рабочих температур на базе математической модели цилиндрических ТТ имеет вид:

$$i = 1,2,\dots n; \quad j = 1,2,\dots m; \quad \Delta l_1 = 0; \tag{1}$$

$$l_0 = \sum l_{h_{ij}} + \sum l_{g_{ij}}; \qquad l_i = l_{ij} = \frac{\sum l_{g_{ij}} - \Delta l_i}{i} + \Delta l_i; \tag{2}$$

$$l_{eff_{ij}} = \sum l_{h_{ij}} + l_i - \frac{\left(l_{c_{ij}} + l_{e_{ij}}\right)}{2}; \tag{3}$$

$$l_{e_{ij}} = \begin{bmatrix} l_{e_{11}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{e_{n1}} & \cdots & l_{e_{nm}} \end{bmatrix}; \qquad l_{c_{ij}} = \begin{bmatrix} l_{c_{11}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{c_{n1}} & \cdots & l_{c_{nm}} \end{bmatrix}; \tag{4}$$

$$l_{e_{11}} = l_{e_{21}} = l_{e_{n1}} = \text{const};$$

$$l_{c_{11}} = l_{c_{22}} = l_{e_{nm}} = \text{const}, \; n = m;$$

$$l_{e_{nm}} = l_{c_{nm-1}} = \Delta l_n, \; n \geq 2, m \geq 2; \tag{5}$$

$$r_{c_{ij}} = \frac{a_{ij} + b_{ij}}{\pi}; \tag{6}$$

$$\Delta P_{l_{ij}} = \left(\frac{4 \cdot \mu_{l_{ij}} \cdot l_{eff_{ij}} \cdot Q}{\rho_{l_{ij}} \cdot L \cdot a_{ij}^2 \cdot b_{ij}^2 \cdot F_c}\right) \cdot \frac{1}{N} = \frac{G}{N}; \tag{7}$$

$$\Delta P_{c_{ij}} = \frac{2 \cdot \sigma_{ij} \cdot \cos\theta}{r_{c_{ij}}}; \tag{8}$$

$$\Delta P_{g_{ij}} = \rho_{l_{ij}} \cdot g \cdot l_i \cdot \sin\varphi_{ij}; \tag{9}$$

$$N = \frac{G}{\Delta P_{c_{ij}} - \Delta P_{g_{ij}}}; \tag{10}$$

$$\tilde{r}_{f_{ij}} = \frac{N \cdot a \cdot 1{,}2}{2 \cdot \pi}; \tag{11}$$

$$S_{v_{ij}} = \frac{Q}{\rho_{v_{ij}} \cdot L \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T_0}{2(\gamma+1)M}}}; \quad (12)$$

$$S_{f_{ij}} = \pi \cdot \left(\tilde{r}_{f_{ij}} + b\right)^2 - \pi \cdot \tilde{r}_{f_{ij}}^2 \quad (13)$$

$$S_{f_{por_{ij}}} = \pi \cdot \tilde{r}_{f_{ij}}^2 - \pi \cdot \left(\tilde{r}_{f_{ij}} - h_{e_{11}}\right)^2 \quad (14)$$

$$S_{me_{ij}} = 4 \cdot h_{me} \cdot \left(\sqrt{S_{v_{ij}} + S_{f_{ij}} + S_{f_{por_{ij}}}}\right) + 4 \cdot h_{me}{}^2 \quad (15)$$

$$S_{butt_{ij}} = S_{v_{ij}} + 4 \cdot d \cdot \sqrt{S_{v_{ij}}} \quad (16)$$

$$S_{e_{11}} = 4 \cdot l_{e_{11}} \cdot \sqrt{S_{v_{ij}}}; \quad S_{c_{11}} = 4 \cdot l_{c_{11}} \cdot \sqrt{S_{v_{ij}}} \quad (17)$$

$$m_i = \sum_j m_{ij} = \sum_j (\rho_{me_{ij}} \cdot S_{me_{ij}} + \rho_{f_{ij}} \cdot S_{f_{ij}} + \rho_{por_{ij}} \cdot S_{f_{por_{ij}}}) \cdot l_{ij} \quad (18)$$

$$R_i = \sum_j (R_{butt_{ij}} + R_{e_{11}} + R_{c_{11}}) = \frac{2 \cdot (i-1) \cdot h_{e_{11}}}{\lambda_f \cdot S_{butt_{ij}}} + \frac{h_{e_{11}}}{\lambda_f \cdot S_{e_{11}}} + \frac{h_{c_{11}}}{\lambda_f \cdot S_{c_{11}}} \quad (19)$$

$$T_{max} < T = T_{STR} + \Delta T \cdot (i-1) + Q \cdot R_i \quad (20)$$

$$\begin{cases} \frac{Q}{S_{butt}} < Q_{spec}, \Delta l_i = 0; \ \Delta T = 0 \\ \frac{Q}{S_{butt}} > Q_{spec}, \Delta l_i = \Delta l_{ij} = \frac{Q \cdot h_{e_{11}}}{2 \cdot \Delta T \cdot \lambda_f \cdot \sqrt{S_{v_{ij}}}}; \ R_{butt_{ij}} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$m_{i+1} < m_i \quad (22)$$

где i – количество ТТ; j – нумерация ТТ в СТТ; Q – тепловыделение ЭРИ; l_0 – длина одиночной ТТ; Δl_i – длина зоны соединения ТТ; $\sum l_{h_{ij}}$ – длина всех горизонтальных участков ТТ; $\sum l_{g_{ij}}$ – длина всех вертикальных участков ТТ; $l_{eff_{ij}}$ – эффективная длина ТТ (перемещение теплоносителя); $l_{c_{ij}}$ – длина зоны конденсации ТТ в СТТ; $l_{e_{ij}}$ – длина зоны испарения ТТ в СТТ; $l_{a_{ij}}$ – длина адиабатической зоны ТТ в СТТ; $r_{c_{ij}}$ – эквивалентный радиус канавки в фитиле; a – ширина канавки ТТ; b – глубина канавки ТТ; $\mu_{l_{ij}}$ – динамическая вязкость теплоносителя (в жидкой фазе); $\rho_{l_{ij}}$ – плотность теплоносителя (в жидкой фазе); L – скрытая теплота парообразования; F_c – поправочный коэффициент на отношение сторон прямоугольной канавки (артерии); σ_{ij} – поверхностное натяжение; θ – краевой угол смачивания; φ_{ij} – угол наклонения ТТ (к горизонту); N – количество канавок; $\tilde{r}_{f_{ij}}$ – эквивалентный радиус канавчатого фитиля; $S_{v_{ij}}$ – поперечная площадь газового канала; $S_{f_{ij}}$ – поперечная площадь канавчатого фитиля; $S_{f_{por_{ij}}}$ – поперечная площадь пористого фитиля; $S_{me_{ij}}$ – поперечная площадь металлической оболочки; $S_{butt_{ij}}$ – площадь газового канала участвующая в теплообмене при торцевом соединении; d – длина зоны эффективного теплообмена; $S_{e_{11}}$ – площадь испарителя; $S_{c_{11}}$ – площадь конденсатора; $\rho_{v_{ij}}$ – плотность паров теплоносителя; γ – показатель адиабаты; R – газовая постоянная; T_0 – наименьшая рабочая температура ТТ; M – молекулярный вес теплоносителя; m_i – масса ТТ; $\rho_{me_{ij}}$ – плотность металла; $\rho_{f_{ij}}$ – плотность канавчатого фитиля; $\rho_{por_{ij}}$ – плотность пористого фитиля; $h_{e_{11}}, h_{c_{11}}$ – толщина пористого фитиля в зоне испарения и конденсации; λ_f – теплопроводность фитиля; T_{max} – максимальная рабочая температура ЭРИ; T – расчетная температура; T_{STR} – температура системы термостабилизации (температура зоны конденсации).

Описание новой математической модели. Для обеспечения работы ТТ необходимо, чтобы максимальный капиллярный напор фитиля ΔP_c превышал полное падение давления в ТТ: $\Delta P_c \geq \Delta P_i + \Delta P_v + \Delta P_g$, где ΔP_i – перепад давления по жидкости в фитиле, ΔP_v – перепад давления при движении пара в канале, ΔP_g – гидростатический перепад давления. С ростом тепловой нагрузки скорость движения жидкости и пара возрастают, следовательно, перепады давлений также увеличиваются. Данная теория содержится в уравнениях 7 – 10 новой математической модели, перепад давления при движении пара не учитывался, поскольку он пренебрежимо мал [33].

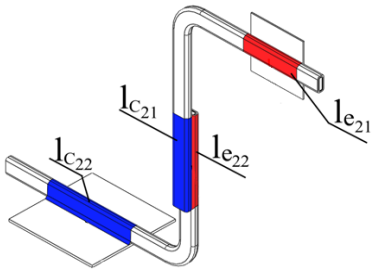


Рис. 2. Схема расположения зон испарения и конденсации в СТТ на базе цилиндрических ТТ

Расстояние от центра цилиндрической ТТ, на котором происходит соединение пористого и канавчатого фитиля, определим, как эквивалентный радиус (рис. 1). Наружу от эквивалентного радиуса отсчитывается площадь поперечного сечения канавчатого фитиля, а внутрь – площадь поперечного сечения пористого фитиля.

Преобразование одиночной ТТ в СТТ (рис. 2) приводит к уменьшению поперечной площади канавчатого и пористого фитилей, а также к появлению дополнительных зон испарения l_e и конденсации l_c. При торцевом соединении ТТ, а также при соединении внахлест ТТ в СТТ из-за высокого теплового сопротивления пористого фитиля по отношению к металлическому корпусу произойдет перераспределение теплового потока.

Уравнения (1), (2) определяют длину ТТ для каждого уровня СТТ с учетом длины зоны соединения Δl_i. Длина зоны соединения Δl_i, определяется по результатам расчета одиночной ТТ. Уравнение (3) определяет «эффективную длину» перемещения теплоносителя в ТТ. Уравнения (4), (5) определяют длину зон испарения и конденсации ТТ. Нумерация зон испарения и конденсации приведена в матричном виде (4). У одиночной ТТ одна зона испарения $l_{e_{11}}$ и одна зона конденсации $l_{c_{11}}$, после преобразования одиночной ТТ в СТТ длины этих зон не изменяются. Поэтому все элементы первого столбца матрицы $l_{e_{ij}}$ равны между собой, а также все диагональные элементы матрицы $l_{c_{ij}}$ равны между собой. После преобразования одиночной ТТ в двухуровневую СТТ появляются дополнительные зоны конденсации и испарения, равные по длине зоне соединения Δl_1. Согласно уравнению (6), квадратное сечение закрытой канавки заменяется на эквивалентное значение круглого сечения (радиус капилляра). Уравнение (7) определяет потери давления по длине ТТ в одиночной закрытой канавке фитиля. По уравнению (8) рассчитывают капиллярное давление в закрытой канавке. Гравитационные потери давления на вертикальном участке ТТ определяются согласно уравнению (9). Уравнение (10) описывает минимально необходимое количество канавок фитиля для отведения тепловой мощности. Выражение (11) определяет $\tilde{r}_{f_{ij}}$ – «эквивалентный радиус» канавчатого фитиля (рис. 1), длина окружности равна ширине всех канавок, умноженных на коэффициент 1,2 (учет толщины стенок). Уравнением (12) описывается минимально необходимая площадь поперечного сечения газового канала (расчет ограничения по скорости звука). Согласно уравнению (13), определяется необходимая площадь поперечного сечения канавчатого фитиля. По выражению (14) определяется площадь поперечного сечения пористого фитиля. Согласно уравнению (15), определяется площадь поперечного сечения металлической оболочки, здесь осуществлен переход от круглого сечения ТТ к квадратному сечению равной площади. По уравнению (16)

вычисляют площадь газового канала $S_{butt_{i,j}}$, участвующего в теплообмене при торцевом соединении. По выражению (17) рассчитывают площадь газового канала, участвующего в теплообмене в испарителе и конденсаторе. Масса ТТ всех уровней СТТ определяется по уравнению (18). Суммарное тепловое сопротивление СТТ вычисляют по уравнению (19). Условие (20) определяет запас по температуре ЭРИ относительно максимальной рабочей температуры. Условие (21) определяет достаточность площади соединения встык, при превышении максимально допустимого теплового потока Q_{spec} для данного типа ТТ необходимо перейти на соединение внахлест. Соединение внахлест предназначено для передачи значительной тепловой мощности с заданным перегревом, т.е. градиент температур определяет исполнитель. Рекомендуется ΔT задать 10 °С. Условие (22) определяет возможность дальнейшего уменьшения массы СТТ исходя из запаса по температуре ЭРИ.

Математическая модель (1)–(22) решается методом подстановки.

Расчет массогабаритных характеристик СТТ на базе цилиндрических медно-водяных ТТ с составным фитилем выполнен для одиночного нагревателя площадью 4 см^2 с тепловыделением 20 Вт, 30 Вт, расположенного на расстоянии 0,11 м от термостабилизированной поверхности с температурой 5 °С. На рисунке 3 показаны две аналогичные по габаритам системы охлаждения: слева одиночная ТТ; справа двухуровневая СТТ. В расчете вся тепловая мощность отводится СО, на рисунке 3 показан контур алюминиевой несущей конструкции. Обе системы охлаждения имеют С-образную геометрию, которая может быть условно разделена на три части: две горизонтальных части длиной 0,08 м и вертикальная часть длиной 0,12 м. Согласно математической модели (1)–(22) вертикальная часть одиночной ТТ будет разделена на несколько частей (преобразовано в двухуровневую СТТ) при выполнении условия уменьшения массы ТТ. Результаты расчета представлены на рисунке 4.

Результаты расчетов показывают, что отведение 30 Вт обеспечивается одиночной ТТ с массой 74 г. Минимальная масса одиночной ТТ обеспечивается при площади поперечного сечения закрытой канавки $1{,}5\cdot10^{-8}$ м^2 (150 х 100 мкм). СТТ в зависимости от заданной разности температуры в зоне соединения ТТ имеют разную массу. Отведение 30 Вт обеспечивается СТТ с массой от 44 г до 50 г и градиентом (в зоне соединения) $\Delta T = 2$ °С, в диапазоне поперечного сечения канавок от $1{,}5\cdot10^{-8}$ до $4\cdot10^{-8}$ м^2. Отведение 30 Вт при градиенте (в зоне соединения) $\Delta T = 10$ °С в зоне соединения ТТ обеспечивается СТТ с массой 28 г, в диапазон поперечного сечения канавок от $1{,}5\cdot10^{-8}$ до $10{,}5\cdot10^{-8}$ м^2.

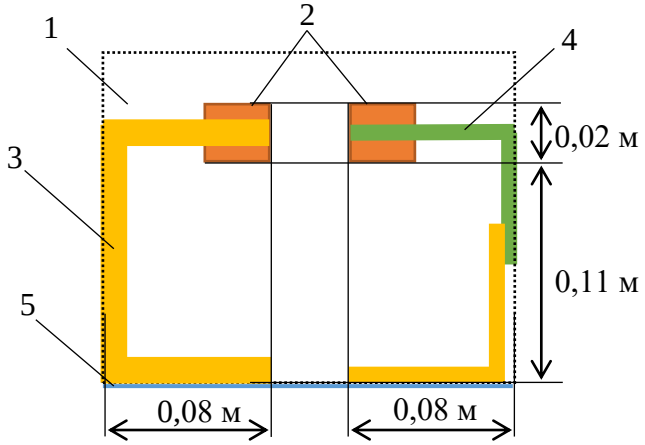


Рис. 3. Схема вычислительного эксперимента: 1 – контур алюминиевой несущей конструкции РЭА, 2 – нагреватель (ЭРИ), 3 – одиночная цилиндрическая ТТ, 4 – СТТ на базе цилиндрических ТТ, 5 – термостабилизированная поверхность

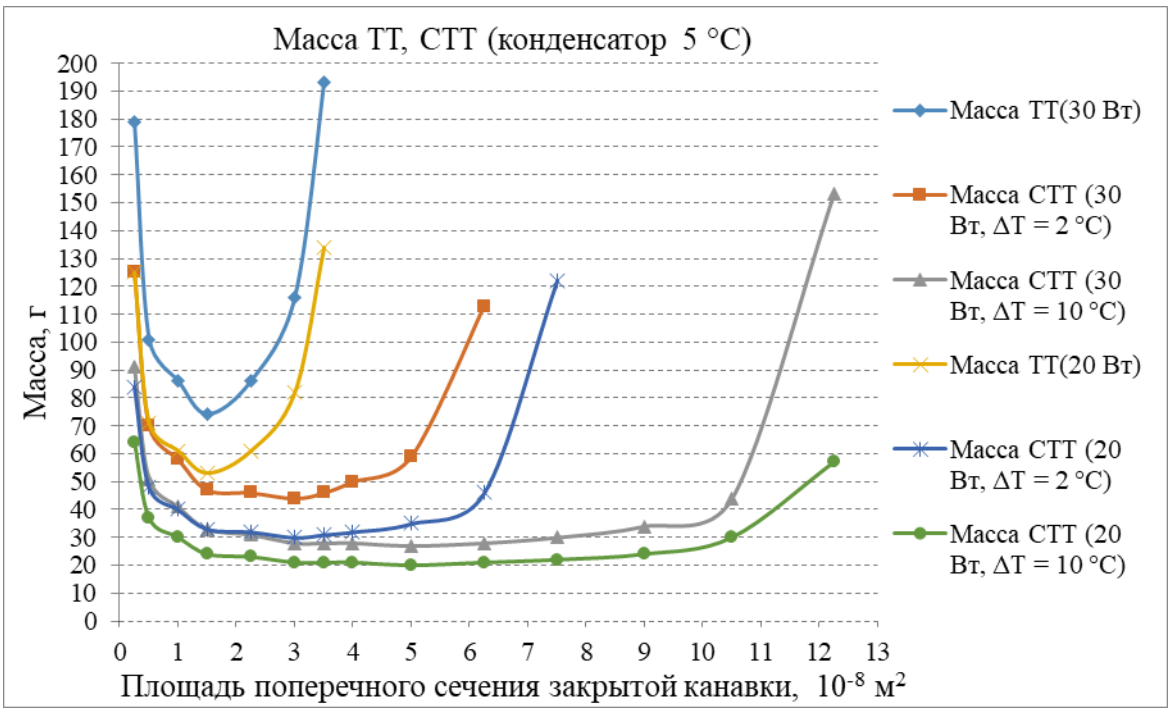
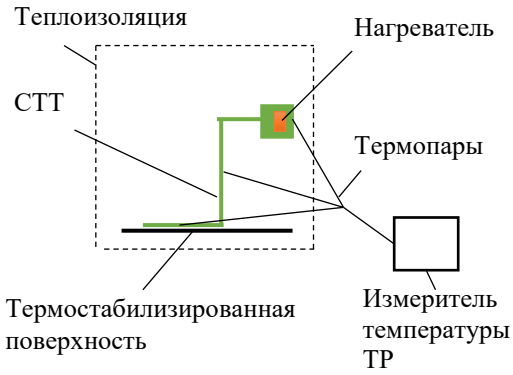
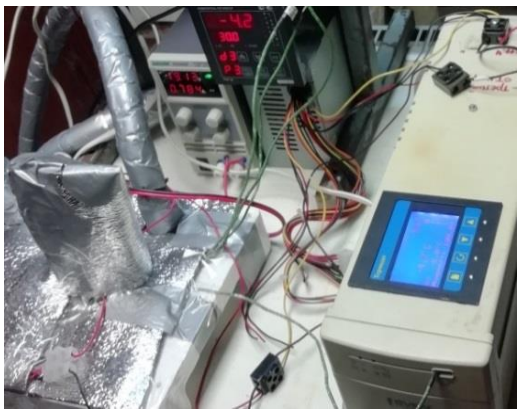


Рис. 4. Зависимость массы ТТ, СТТ (двухуровневую) от площади поперечного сечения закрытой канавки при фиксированной тепловой мощности нагревателя

Натурный эксперимент. Общая схема эксперимента по исследованию характеристик СТТ показана на рисунке 5а.



а)



б)

Рис. 5. Определение характеристик СТТ: а) схема стенда для исследования характеристик СТТ; б) фотография стенда с СТТ

Схема расположения нагревателя показана на рисунке 6. СТТ состоит из двух цилиндрических ТТ, масса каждой ТТ составляет 13 г, соответственно масса СТТ составляет 26 г. Масса переходных пластин испарителя и конденсатора может меняться в зависимости от особенностей конструкции СО, поэтому при расчете массы СТТ масса пластин не учитывается. СТТ располагалась вертикально (испаритель над конденсатором), снаружи обклеена несколькими слоями теплоизолирующего материала (вспененный полиэтилен) с теплопроводностью 0,037 Вт/(м·°С) суммарной толщиной 0,03 м. Медная переходная пластина конденсатора прижималась к термостабилизированной поверхности через слой теплопроводящей пасты. В данной работе использовалась теплопроводящая паста с теплопроводностью $\lambda = 1.8$ Вт/(м·°С) и толщиной слоя $\delta \approx 2 \cdot 10^{-4}$ м.

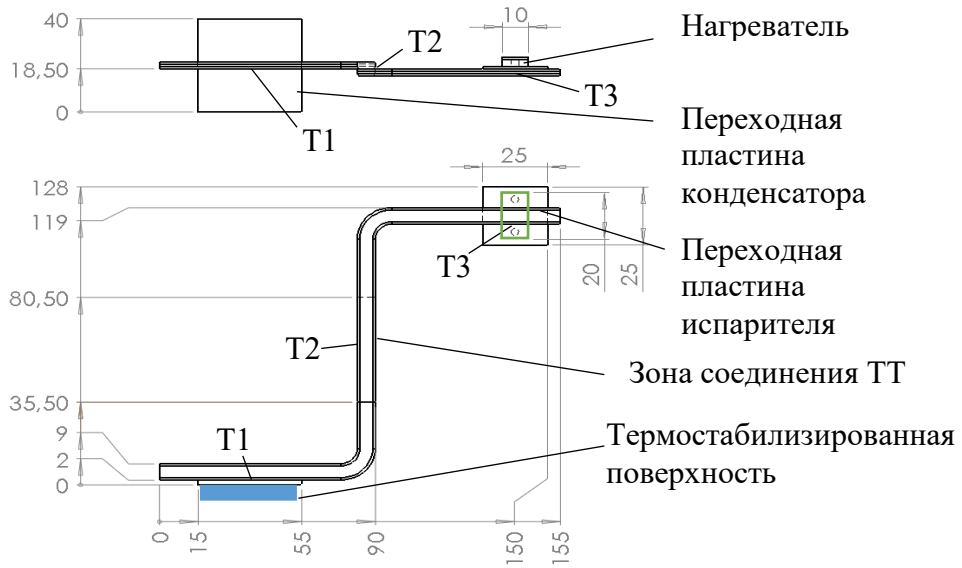


Рис. 6. Схема расположения нагревателя, испарителя и конденсатора в СТТ

Термостат обеспечивал постоянство температуры на переходной пластине конденсатора СТТ в точке Т1 (рис. 6). В экспериментах в качестве нагревателя использовался резистор Р1-17 РКМУ.434110.001 ТУ (площадь контакта ≈ 1 см^2). Все соединения ТТ в СТТ выполнены припоем ПОС61 ГОСТ 21930. Теплопроводность припоя ПОС61 составляет 60 Вт/(м·°С). Система сбора данных построена на базе прибора ТРМ138 ТУ 4217-015-46526536-2008, термопары ТХК 9419 ТУ 4211-088-02566540-2010 подключены к прибору.

Эксперименты проводились при разных температурах термостабилизированной поверхности. В ходе каждого эксперимента мощность тепловыделения нагревателя увеличивалась ступенчато, выдержка по времени составляла не менее 20 мин. Мощность нагревателя рассчитывалась как произведение электрического тока на разность потенциалов, измеряемая непосредственно на контактах нагревателя. Для каждого значения мощности после достижения стационарного состояния фиксировались температуры: место соединения ТТ с переходной пластиной конденсатора – Т1; место соединения ТТ – Т2; место соединения ТТ с переходной пластиной испарителя – Т3. Температура нагревателя в эксперименте не должна превышать 80 °С.

Оценка погрешностей в эксперименте с СТТ. Предел основной приведенной погрешности измерения при использовании термопар у прибора ТРМ138 составляет 0,5 %. Измерение температур обеспечивалось термопарами L-типа, которые обеспечивали погрешность измерения разности температур менее 0,5 °С за счет предварительной калибровки. Калибровка ТРМ138 проведена при температурах: минус 5 °С и 40 °С, отличие показаний термопар, соединенных рабочими концами в одну точку, составляет менее 0,2 °С. Погрешность измерения электрического напряжения и тока на нагревателях была в пределах $\delta I = 0{,}5$ % и $\delta U = 1{,}5$ % соответственно. Стандартный метод анализа позволяет оценить погрешность измерения мощности тепловыделения нагревателей в пределах $\delta Q = (\delta I^2 + \delta U^2)^{0.5} = 1{,}6$ %.

Результаты экспериментального исследования СТТ. СТТ обеспечивает стабильную теплопередачу в диапазоне температур от минус 5 °С до 40 °С, на рисунке 7 представлены результаты эксперимента. При температуре термостабилизированной поверхности от минус 5 °С до 5 °С резкое увеличение температуры нагревателя (осушение фитиля) наблюдается при тепловой мощности 25 Вт. При температурах от минус 5 °С до 5 °С и тепловой мощности 20 Вт температура нагревателя составляет 30 °С ± 2 °С, резкое увеличение

температуры (осушение фитиля) нагревателя наблюдается при тепловой мощности 25 Вт. При 40 °С наблюдается линейный рост температур на обеих ТТ из состава СТТ до 35 Вт, осушения нет.

Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов. Критерий сравнения: масса СТТ при фиксированной тепловой мощности ЭРИ 20 Вт и фиксированной температуре зоны конденсации 5 °С. Внутренняя структура ТТ с составным фитилем показана на рисунке 8, эквивалентный радиус канавок $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ м, толщина пористого фитиля $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ м. Масса экспериментального образца СТТ составляла 26 г. По результатам эксперимента СТТ (рис. 7в) при температуре основания 5 °С до наступления осушения обеспечивает отвод тепловой мощности не более 20 Вт.

На рисунке 4 согласно расчету СТТ математической модели (1)–(22) тепловой мощности 20 Вт и градиенту (в зоне соединения) 2 °С соответствует масса 30 г. Тепловой мощности 20 Вт и градиенту (в зоне соединения) 10 °С соответствует масса 20 г.

Согласно экспериментальным данным СТТ способна отводить тепловую мощность не более 25 Вт при массе в 26 г, т.е. 961 Вт/кг с высоты 0,11 м при температуре минус 5 °С; не более 35 Вт при массе в 26 г, т.е. 1346 Вт/кг при температуре 40 °С.

Численный эксперимент СТТ в ANSYS. Разработка методов расчета СО является комплексной задачей. Результаты расчета математической модели (1)–(22) могут быть использованы в современных системах инженерного анализа (СИА).

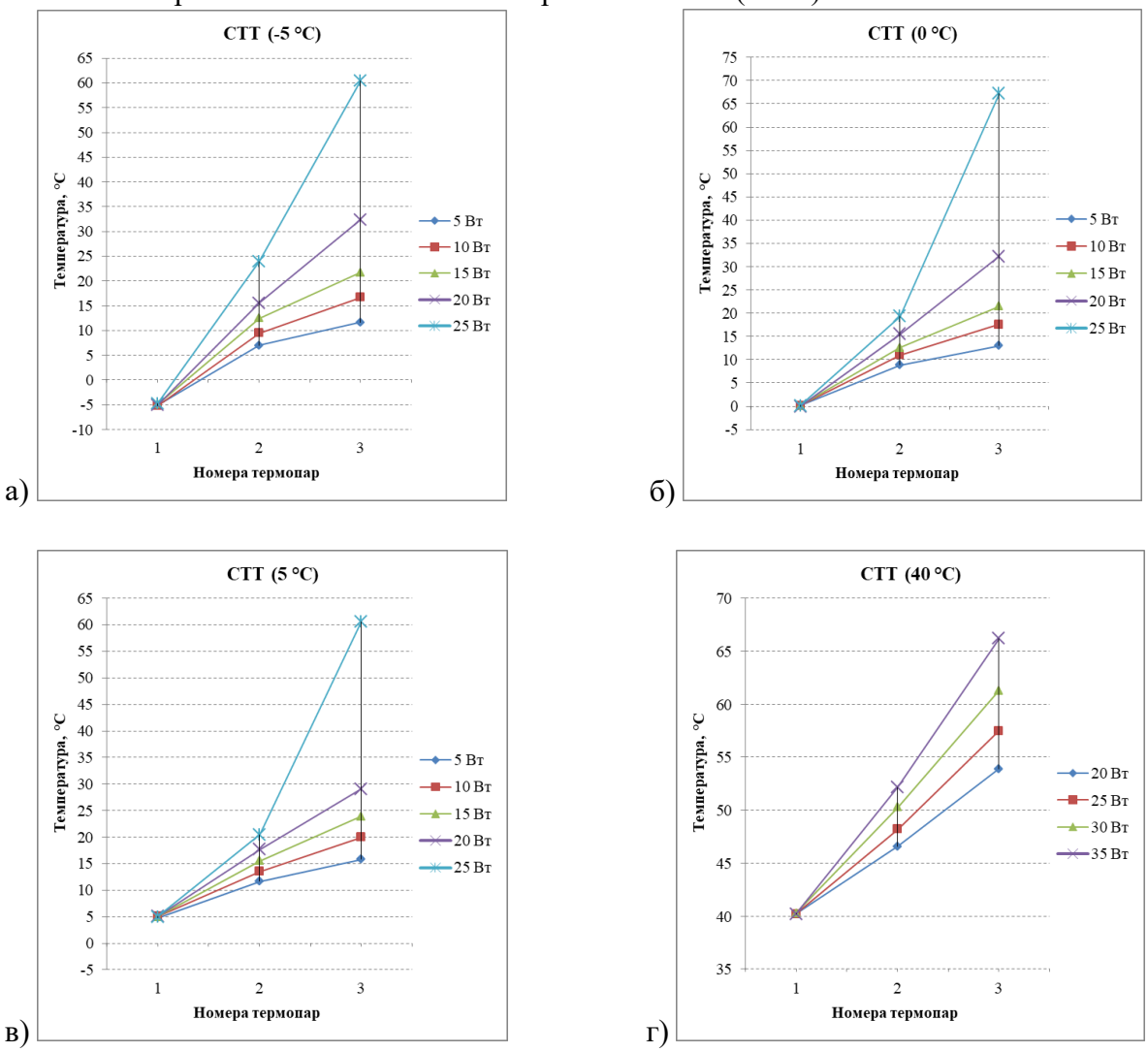
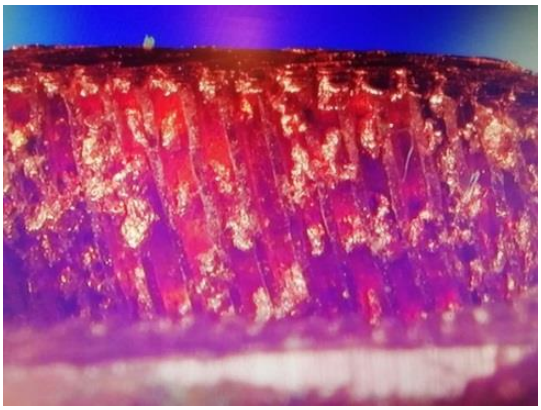


Рис. 7. Результаты экспериментального исследования СТТ при температуре термостабилизированной поверхности: а) минус 5 °С; б) 0 °С; в) 5 °С; г) 40 °С

а)



б)

Рис. 8. ТТ с составным фитилем: а) поперечное сечение ТТ; б) канавчатый фитиль (очищенный от пористого фитиля)

На этом этапе необходимо создать точную геометрическую модель СТТ (цифровой двойник) по результатам расчета математической модели (1)–(22) и интегрировать СТТ в РЭА средствами программных продуктов, например, средством автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks [34]. Следует транслировать геометрическую модель РЭА из САПР в среду СИА ANSYS Workbench [35]. ANSYS Workbench в настоящее время не имеет возможности расчета капиллярного ограничения ТТ.

Таблица 1. Теплопроводность газового канала

Температура, °С	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
-20	1
0	1
5	$2 \cdot 10^3$
50	10^5
100	10^6

Медно-водяная ТТ в ANSYS упрощается до трех деталей: медного корпуса; фитиля; газового канала. Теплопроводность меди составляет 380 Вт/(м·°С), теплопроводность фитиля – 20 Вт/(м·°С), теплопроводность газового канала изменяется от температуры и задается согласно таблице 1. Габариты цифрового двойника СТТ соответствуют рисунку 6. В таблицу внесены расчетные значения теплопроводности согласно результатам натурного эксперимента СТТ.

Качество расчетной сетки удовлетворительное, рисунки 9 - 11.

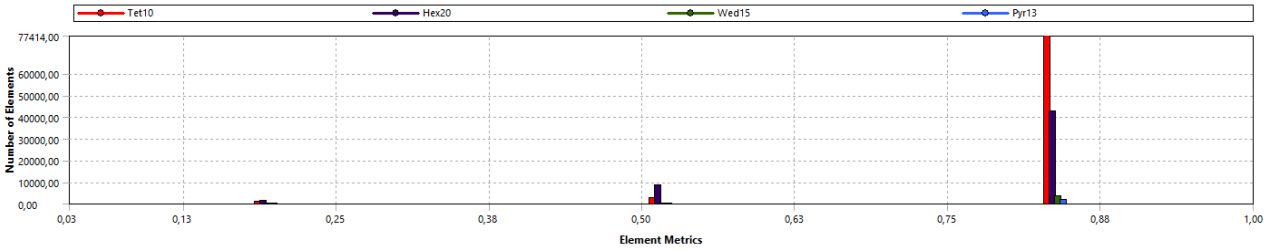


Рис. 9. Качество сетки Jacobian Ratio (Gauss Points)

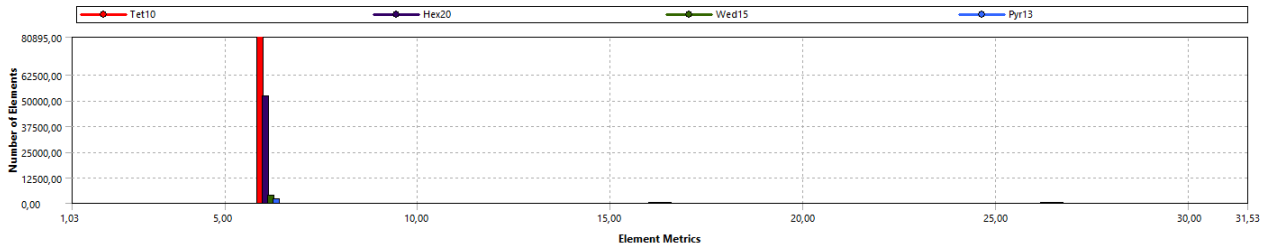


Рис. 10. Качество сетки Aspect Ratio

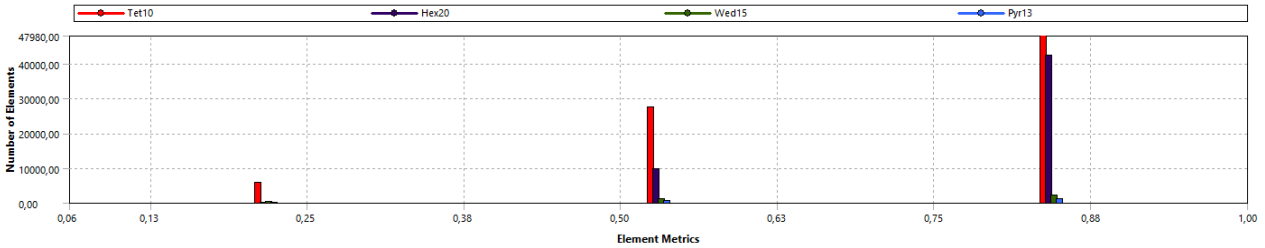


Рис. 11. Качество сетки Element Quality

График сходимости, при температуре термостабилизированной поверхности минус 5 °С и тепловыделении ЭРИ 20 Вт, представлен на рисунке 12.

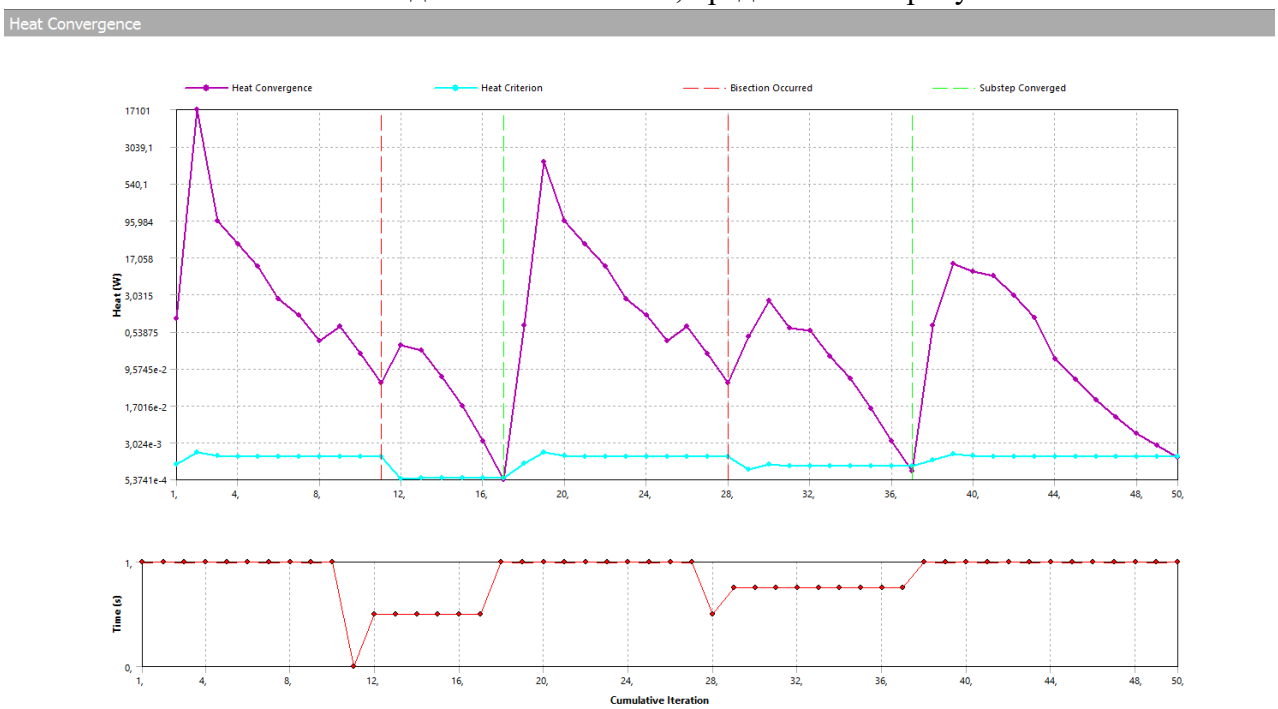


Рис. 12. График сходимости

Результаты моделирования СТТ в ANSYS представлены на рисунках 13, 14.

Площадь поперечного сечения газового канала составляет ≈ $7{,}5 \cdot 10^{-6}$ м^2. В адиабатической зоне ТТ тепловой поток распределен равномерно по поперечной площади сечения газового канала ТТ. СИА ANSYS Workbench позволяет контролировать плотность теплового потока. Согласно расчету (рис. 14а), тепловой поток на ровных участках адиабатической зоны составляет ≈ 2,7 МВт/м^2 (Вт/мм^2), соответственно через газовый канал суммарно проходит 7,5·2,7 ≈ 20 Вт, т.е. тепловая мощность полностью передается через газовые каналы СТТ.

Расчетные значения температуры корпуса СТТ во всем диапазоне рабочих температур в достаточной степени коррелируются с результатами натурного эксперимента с СТТ, что позволяет добавлять модель СТТ в сложные трехмерные модели РЭА КА.

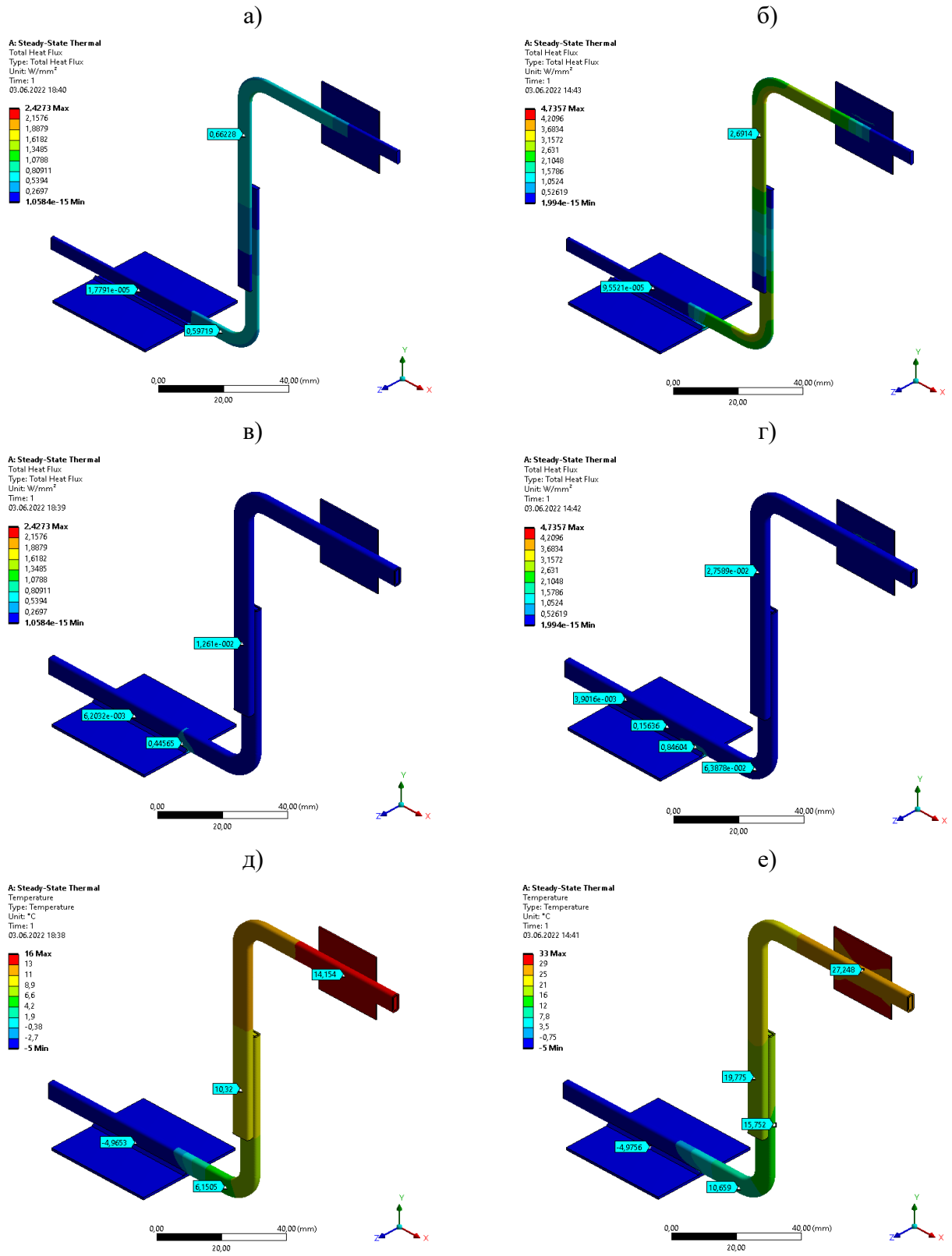


Рис. 13. Результаты численного расчета СТТ в ANSYS (температура термостабилизированной поверхности минус 5 °С), где: а) значение теплового потока в газовых каналах СТТ при тепловой мощности 5 Вт; б) то же в газовых каналах СТТ при тепловой мощности 20 Вт; в) то же на корпусе СТТ при тепловой мощности 5 Вт; г) то же на корпусе СТТ при тепловой мощности 20 Вт; д) распределение температуры по корпусу ТТ при тепловой мощности 5 Вт; е) распределение температуры по корпусу ТТ при тепловой мощности 20 Вт

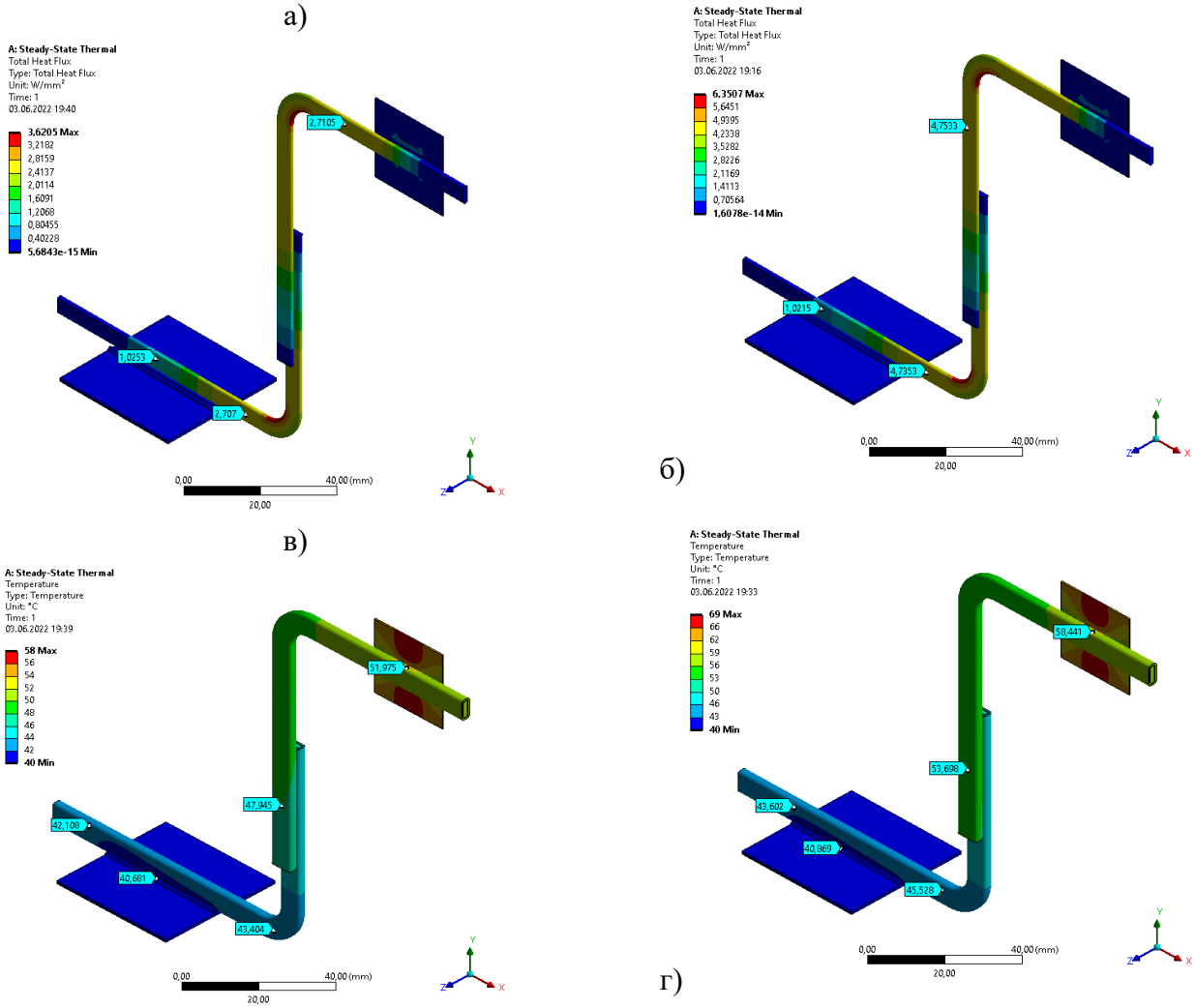


Рис. 14. Результаты численного расчета СТТ в ANSYS (температура термостабилизированной поверхности 40 °С), где: а) значение теплового потока в газовых каналах СТТ при тепловой мощности 20 Вт; б) то же в газовых каналах СТТ при тепловой мощности 35 Вт; в) распределение температуры по корпусу ТТ при тепловой мощности 20 Вт; г) распределение температуры по корпусу ТТ при тепловой мощности 35 Вт

Численный эксперимент СТТ в ANSYS (модуль РЭА). Внешний вид трехмерной модели модуля РЭА представлен на рисунке 15. Алюминиевая несущая конструкция толщиной 10^{-3} м с теплопроводностью 120 Вт/(м·°С). К поверхности несущей конструкции приклеена печатная плата толщиной 10^{-3} м с теплопроводностью 0,3 Вт/(м·°С). На поверхности печатной платы находятся ЭРИ.

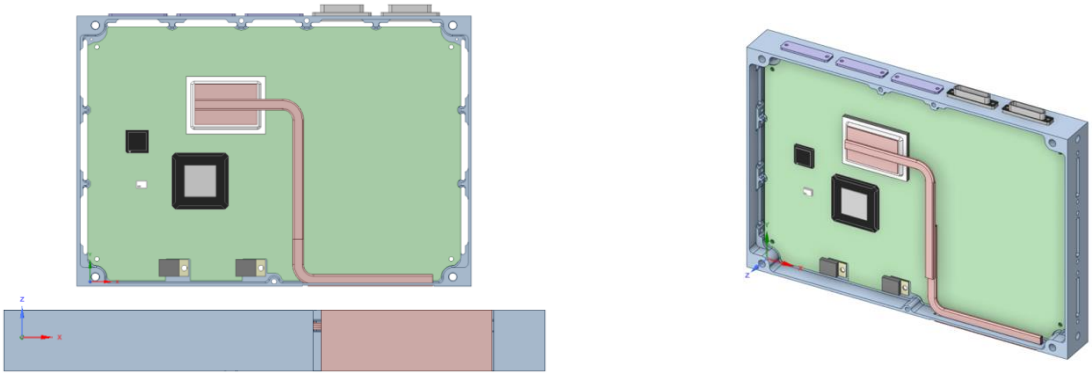


Рис. 15. Трехмерная модель модуля РЭА с СТТ

Модуль РЭА устанавливается на термостабилизированную поверхность, тепловыделение ЭРИ соответствует рисунку 16. Тепловая мощность ЭРИ распределяется между алюминиевой несущей конструкцией и СТТ.

Согласно расчету (рис. 17а), тепловой поток на ровных участках адиабатической зоны СТТ составляет ≈ 2,62 МВт/м^2 (Вт/мм^2), соответственно, через газовые каналы СТТ суммарно проходит 7,5·2,62 ≈ 19,6 Вт. Температура ЭРИ с тепловыделением 20 Вт охлаждаемого СТТ не превышает 48 °С при температуре термостабилизированной поверхности 40 °С.

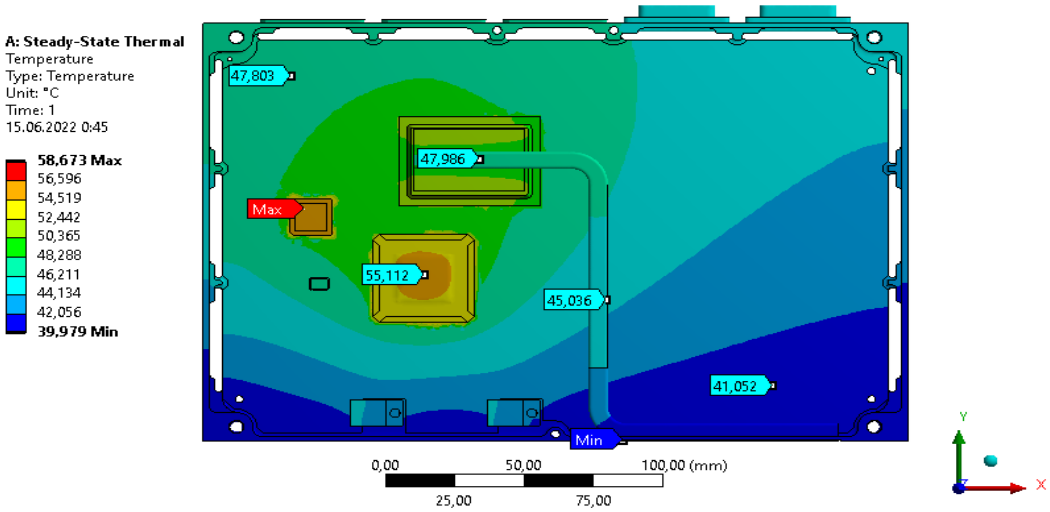
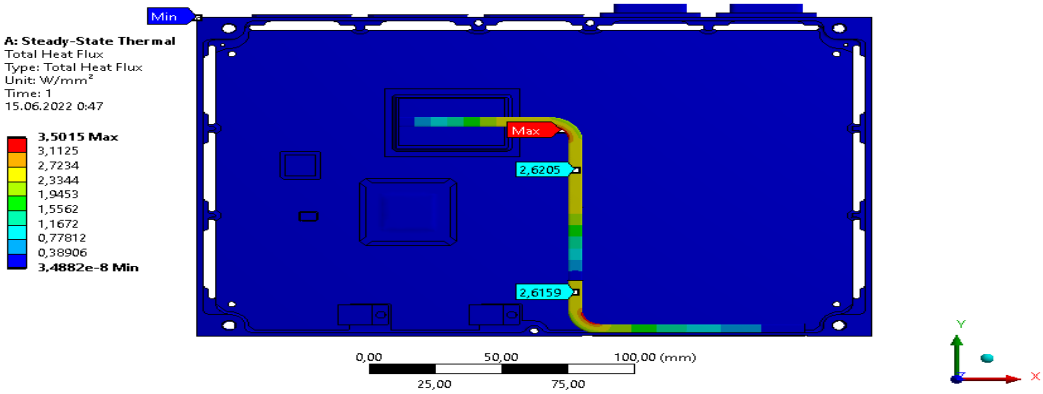


Рис. 16. Граничные условия для модуля РЭА

а)



б)

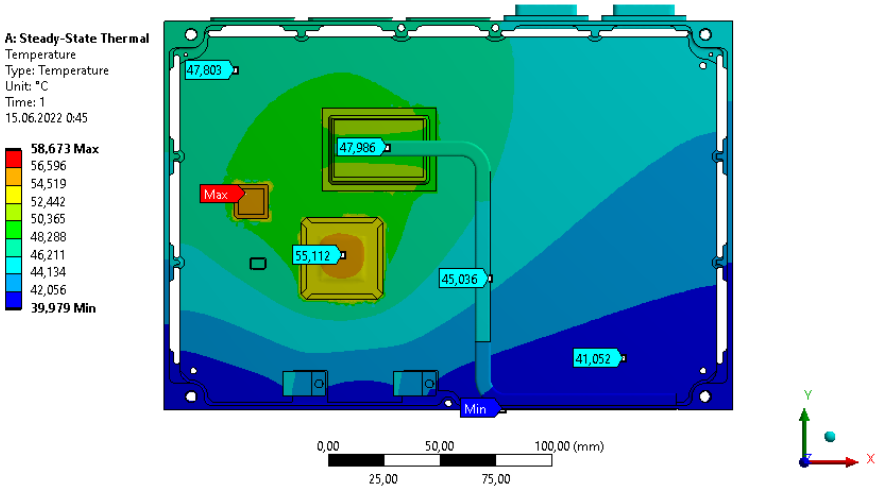


Рис. 17. Результаты численного расчета модуля РЭА с СТТ в ANSYS (температура термостабилизированной поверхности 40 °С), где: а) распределение теплового потока; б) распределение температуры

Заключение. Представленные в статье результаты работы позволяют оптимально решать многие инженерные задачи, связанные с передачей тепловой мощности с минимальными потерями, охлаждением и термостатированием или термостабилизацией различных объектов, использующихся как на Земле, так и в космическом пространстве. На основе полученных данных можно сформулировать основные выводы:

1) создана новая математическая модель комплексной оптимизации массогабаритных характеристик СТТ во всем диапазоне рабочих температур РЭА.

2) установлены предельные значения отводимой тепловой мощности одиночной ТТ, двухуровневой СТТ в условиях гравитационного поля. Согласно экспериментальным данным СТТ способна отводить 961 Вт/кг с высоты 0,11 м при температуре минус 5 °С, 1346 Вт/кг при температуре 40 °С.

Список источников

1. Faghri A., Heat Pipes: Review, opportunities and challenges. Frontiers in heat pipes (FHP), 2014, DOI:10.5098/fhp.5.1.
2. Groll M., Schneider M., Sartre V., Zaghdoudi M.C., Lallemand M. Thermal control of electronic equipment by heat pipes. Revue générale de thermique, 1998, no. 37, pp. 323-352, DOI: 10.1016/S0035-3159(98)80089-5.
3. Chen X., Ye H., Fan X., Ren T., Zhang G. A review of small heat pipes for electronics, Applied Thermal Engineering, 2016. no. 96, pp. 1-17, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.11.048.
4. Vasiliev L.L. Micro and miniature heat pipes – electronic components cooler. Proceedings of the VI Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, Minsk, Belarus, 2005, pp. 74-76.
5. Weibel J.A., Garimella S.V. Recent advances in vapor chamber transport characterization for high heat flux applications. Advances in heat transfer, 2013, vol. 45, pp. 209-301, DOI: 10.1016/B978-0-12-407819-2.00004-9.
6. Mochizuki M., Nguyen T. Review of various thin heat spreader vapor chamber designs, performance, lifetime reliability and application. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 2019, pp. 13-12, DOI: 10.5098/hmt.13.12.
7. Hopkins R., Faghri A., Khrustalev D. Flat miniature heat pipes with micro capillary grooves. Journal of heat and mass transfer, 1999, vol. 121, pp. 102-109, DOI:10.1115/1.2825922.
8. Rullière R., Lefèvre F., Lallemand M. Prediction of the maximum heat transfer capability of two-phase heat spreaders – experimental validation. International journal of heat and mass transfer, 2007, vol. 50, pp. 1255-1262, DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.015.
9. Zaghdoudi M.C., Maalej S., Mansouri J., Sassi M.B.H. Flat miniature heat pipes for electronics cooling: state of the art, experimental and theoretical analysis. International journal of applied science and engineering. 7:3, 2011, DOI:10.5281/zenodo.1075140.
10. Wang Y., Peterson G.P. Investigation of a novel flat heat pipe. Journal of heat transfer, 2005, vol. 127, pp. 165-170, DOI:10.1115/1.1842789.
11. Lefevre F., Conrardy J-B., Raynaud M., Bonjour J. Experimental investigations of flat plate heat pipes with screen meshes or grooves covered with screen meshes as capillary structure. Applied thermal engineering, 2012, vol. 37, pp. 95-102, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.11.022.
12. Lu L., Li J. Managing high heat flux up to 500 W/cm^2 through an ultra-thin flat heat pipe with superhydrophilic wick. Applied thermal engineering, 2017, vol. 122, pp. 593-600, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.05.050.
13. Tang H., Tang Y., Wan Z., Li J., Yuan W., Lu L., Li Y., Tang K. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling. Applied energy, 2018, vol. 223, pp. 383-400, DOI:10.1016/j.apenergy.2018.04.072.
14. Boukhanouf R., Haddad A., North M.T., Buffone C. Experimental investigation of a flat plate heat pipe performance using IR thermal imaging camera. Applied thermal engineering, 2006, vol. 26, pp. 2148-2156, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2006.04.002.
15. Zhu M., Huang J., Song M., Hu Y. Thermal performance of a thin flat heat pipe with grooved porous structure. Applied thermal engineering, 2020, vol. 173, pp. 115-215, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.115215.
16. Li J., Lu L. Experimental studies on a novel thin flat heat pipe heat spreader. Applied thermal engineering, 2016, vol. 93, pp. 139-146, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.09.038.
17. Деревянко В.А. Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космических аппаратах / В.А. Деревянко, Д.А. Нестеров, В.Е. Косенко и др. // Вестник СибГАУ, 2013. –№ 6(52). – С. 111-116.

18. Lia Y., Zhoua W., Li Z., Chen Z., Gan Y. Experimental analysis of thin vapor chamber with composite wick structure under different cooling conditions. Applied thermal engineering, 2019, vol. 156, pp. 471-484, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.04.094.
19. Velardo J., Date A., Singh R., Nihila J., Date A., Long T. Phan, Takahashi M. Experimental investigation of a vapour chamber heat spreader with hybrid wick structure. International journal of thermal sciences, 2019, vol. 140, pp. 28-35, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.009.
20. Mizuta K., Fukunaga R., Fukuda K., Nii S., Asano T., Development and characterization of a flat laminate vapor chamber. Applied thermal engineering, 2016, vol. 104, pp. 461-471, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.05.080.
21. Yang T., Gao T., Zhao S.L., Zhang M.J., Liu Z., Yan Y.X. Research on ground and space flight tests of a new type of ceramic wick flat capillary pump. Joint 20th International heat pipe conference & 14th International heat pipe symposium, Gelendzhik, Russia, 7-10 Sept., 2021.
22. Derevyanko V., Nesterov D., Matrenin V., Suntsov S. The results of mathematical modeling and experimental investigations of the flat heat pipes. Proceeding of the 15th International heat pipe conference. Clemson, SC, USA. April 25-30, 2010.
23. Denis Nesterov, Gennady Dmitriev. Investigation of loop heat pipe oscillating behavior using numerical simulation. Heat pipe science and technology, 2015, vol. 6, issue 1-2, pp. 25-49.
24. Нестеров Д.А. Программный комплекс теплового моделирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры с плоскими тепловыми трубами / Д.А. Нестеров, В.В. Деревянко, С.Б. Сунцов // Материалы XX Юбилейной международной научно-практической конференции Решетневские чтения, Красноярск, 09-12 ноября 2016, – С. 236-238. – ISSN 1990-7702.
25. Сунцов С.Б. Эффективность использования гипертеплопроводящих секций на космических аппаратах информационного обеспечения / С.Б. Сунцов, Д.А. Нестеров, Н.Ю. Соколов // Наукоемкие технологии, 2017. – Т. 18. – № 12. – С. 54-58.
26. Кулагин В.А. Численное исследование характеристик тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов / В.А. Кулагин, Н.Ю. Соколов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2015. – № 8(6). – С. 769-773. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-6-769-773.
27. Кулагин В.А. Математическое моделирование режимов работы тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов / В.А. Кулагин, Н.Ю. Соколов // Безопасность и живучесть технических систем: Матер. и докл. V Всерос. Конф.: в 3 т. (Красноярск, 12–16 октября 2015 г.). Красноярск: Сибирский Федеральный Университет, 2015. т. 2. – С. 6-10.
28. Кулагин В.А. Улучшение теплофизических характеристик тепловых труб. / В.А. Кулагин, Н.Ю. Соколов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2017. – № 10(3), – С. 372-376. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-372-376.
29. Кулагин В.А. Физико-математическое моделирование предельных характеристик системы тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов / В.А. Кулагин, Н.Ю. Соколов // Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: Матер. и докл. VI Всерос. конф. (Красноярск, 18–21 сент. 2018 г.), Красноярск: СФУ, 2018. – С. 205-210.
30. Соколов Н.Ю. Система тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космического аппарата. / Н.Ю. Соколов, В.А. Кулагин, Д.А. Нестеров, // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2021. – № 14(4). – С. 363-377. DOI: 10.17516/1999-494X-0317.
31. Соколов Н.Ю. Математическое моделирование и оптимизация систем тепловых труб / Н.Ю. Соколов, В.А. Кулагин, Д.А. Нестеров // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2021. – № 14(7). – С. 860-879. DOI: 10.17516/1999-494X-0352.
32. Kulagin V.A., Sokolov N.Y. Improvement of heat pipe systems for cooling electronic equipment. AIP Conference proceedings 2528, 020022 (2022). DOI: /10.1063/5.0107183.
33. Дан П.Д. Тепловые трубы / П.Д. Дан, Д.А. Рей // М.: Энергия, 1979. – 272 с.
34. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А.А. Алямовский // М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
35. Бруяка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова и др. // Самара: СамГТУ, 2010. – 271 с.

Кулагин Владимир Алексеевич. *Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники и гидрогазодинамики СФУ, специалист в области гидродинамики больших скоростей и теплофизики. AuthorID: 360076, SPIN: 2418-4408, ORCID: 0000-0002-5433-7579, v.a.kulagin@mail.ru, 660074, г. Красноярск, ул. Ак. Киренского 5А-58, Россия.*

Соколов Никита Юрьевич. *Инженер-конструктор 1 категории; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва, аспирант кафедры теплотехники и гидрогазодинамики СФУ. AuthorID: 1003951, SPIN: 7518-7957, nikita436@gmail.com, 660074, г. Красноярск, ул. Ак. Киренского, д. 24, Россия.*

UDC 621.565.83:629.7
DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.004

Numerical and physical modeling of the operation of a heat pipe system for heat removal from radio-electronic equipment for various purposes

Nikita Yu. Sokolov[1], Vladimir A. Kulagin[2]
[1] JSC Information Satellite Systems Reshetnev,
Russia, Zheleznogorsk *nikita436@gmail.com*
[2]Siberian Federal University,
Russia, Krasnoyarsk, *v.a.kulagin@mail.ru*

Abstract. A new mathematical model of a system of cylindrical heat pipes with a composite wick is presented. The results of numerical modeling and experimental studies of a heat pipe system (SHP) to ensure the removal of a given thermal power from radio-electronic equipment for various purposes are presented, and its minimum mass is determined. The limiting values of the removed thermal power of a single heat pipe, a two-level CTT under the conditions of a gravitational field are established. According to experimental data, the STT is capable of removing 667 W/kg from a height of 0.11 m at a temperature of minus 5 °C, 910 W/kg at a temperature of plus 40 °C. The presented results of the work make it possible to optimally solve many engineering problems related to the transfer of thermal power with minimal losses, cooling and temperature control or thermal stabilization of various objects used both on Earth and in outer space.

Keywords: cylindrical heat pipe, heat pipe system, cooling of electronic equipment, high thermal power density

References

1. Faghri A., Heat Pipes: Review, opportunities and challenges. Frontiers in heat pipes (FHP), 2014, DOI:10.5098/fhp.5.1.
2. Groll M., Schneider M., Sartre V., Zaghdoudi M.C., Lallemand M. Thermal control of electronic equipment by heat pipes. Revue générale de thermique, 1998, no. 37, pp. 323-352, DOI: 10.1016/S0035-3159(98)80089-5.
3. Chen X., Ye H., Fan X., Ren T., Zhang G. A review of small heat pipes for electronics, Applied Thermal Engineering, 2016. no. 96, pp. 1-17, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.11.048.
4. Vasiliev L.L. Micro and miniature heat pipes – electronic components cooler. Proceedings of the VI Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, Minsk, Belarus, 2005, pp. 74-76.
5. Weibel J.A., Garimella S.V. Recent advances in vapor chamber transport characterization for high heat flux applications. Advances in heat transfer, 2013, vol. 45, pp. 209-301, DOI: 10.1016/B978-0-12-407819-2.00004-9.
6. Mochizuki M., Nguyen T., Review of various thin heat spreader vapor chamber designs, performance, lifetime reliability and application. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 2019, pp. 13-12, DOI: 10.5098/hmt.13.12.
7. Hopkins R., Faghri A., Khrustalev D. Flat miniature heat pipes with micro capillary grooves. Journal of heat and mass transfer, 1999, vol. 121, pp. 102-109, DOI:10.1115/1.2825922.
8. Rullière R., Lefèvre F., Lallemand M. Prediction of the maximum heat transfer capability of two-phase heat spreaders – experimental validation. International journal of heat and mass transfer, 2007, vol. 50, pp. 1255-1262, DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.015.
9. Zaghdoudi M.C., Maalej S., Mansouri J., Sassi M.B.H. Flat miniature heat pipes for electronics cooling: state of the art, experimental and theoretical analysis. International journal of applied science and engineering. 7:3, 2011, DOI:10.5281/zenodo.1075140.
10. Wang Y., Peterson G.P. Investigation of a novel flat heat pipe. Journal of heat transfer, 2005, vol. 127, pp. 165-170, DOI:10.1115/1.1842789.
11. Lefevre F., Conrardy J-B., Raynaud M., Bonjour J. Experimental investigations of flat plate heat pipes with screen meshes or grooves covered with screen meshes as capillary structure. Applied thermal engineering, 2012, vol. 37, pp. 95-102, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.11.022.

12. Lu L., Li J. Managing high heat flux up to 500 W/cm^2 through an ultra-thin flat heat pipe with superhydrophilic wick. Applied thermal engineering, 2017, vol. 122, pp. 593-600, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.05.050.
13. Tang H., Tang Y., Wan Z., Li J., Yuan W., Lu L., Li Y., Tang K. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling. Applied energy, 2018, vol. 223, pp. 383-400, DOI:10.1016/j.apenergy.2018.04.072.
14. Boukhanouf R., Haddad A., North M.T., Buffone C. Experimental investigation of a flat plate heat pipe performance using IR thermal imaging camera. Applied thermal engineering, 2006, vol. 26, pp. 2148-2156, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2006.04.002.
15. Zhu M., Huang J., Song M., Hu Y. Thermal performance of a thin flat heat pipe with grooved porous structure. Applied thermal engineering, 2020, vol. 173, pp. 115-215, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.115215.
16. Li J., Lu L. Experimental studies on a novel thin flat heat pipe heat spreader, Applied thermal engineering, 2016, vol. 93, pp. 139-146, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.09.038.
17. Derevyanko V.A., Nesterov D.A., Kosenko V.Ye. Ploskiye teplovyye truby dlya otvoda tepla ot elektronnoy apparatury v kosmicheskikh apparatakh [Flat heat pipes for heat removal from electronic equipment in space vehicles]. Vestnik SibGAU [Bulletin of the SibSAU], 2013, 6(52), pp. 111-116.
18. Lia Y., Zhoua W., Li Z., Chen Z., Gan Y. Experimental analysis of thin vapor chamber with composite wick structure under different cooling conditions. Applied thermal engineering, 2019, vol. 156, pp. 471-484, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.04.094.
19. Velardo J., Date A., Singh R., Nihila J., Date A., Long T. Phan, Takahashi M. Experimental investigation of a vapour chamber heat spreader with hybrid wick structure. International journal of thermal sciences, 2019, vol. 140, pp. 28-35, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.009.
20. Mizuta K., Fukunaga R., Fukuda K., Nii S., Asano T., Development and characterization of a flat laminate vapor chamber. Applied thermal engineering, 2016, vol. 104, pp. 461-471, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.05.080.
21. Yang T., Gao T., Zhao S.L., Zhang M.J., Liu Z., Yan Y.X. Research on ground and space flight tests of a new type of ceramic wick flat capillary pump. Joint 20th International heat pipe conference & 14th International heat pipe symposium, Gelendzhik, Russia, 7-10 Sept., 2021.
22. Derevyanko V., Nesterov D., Matrenin V., Suntsov S. The results of mathematical modeling and experimental investigations of the flat heat pipes. Proceeding of the 15th International heat pipe conference. Clemson, SC, USA. April 25-30, 2010.
23. Denis Nesterov, Gennady Dmitriev. Investigation of loop heat pipe oscillating behavior using numerical simulation, Heat Pipe Science and Technology, An International Journal, 2015, vol. 6, issue 1-2, pp. 25-49.
24. Nesterov D.A., Derevyanko V.V., Suntsov S.B. Programmnyy kompleks teplovogo modelirovaniya bortovoy radioelektronnoy apparatury s ploskimi teplovymi trubami [Tech. Software complex for thermal modeling of on-board radio-electronic equipment with flat heat pipes]. Materialy XX YUbilejnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii Reshetnevskie chteniya [Proceedings of the XX Anniversary International Scientific and Practical Conference Reshetnev Readings], Krasnoyarsk, November 09–12, 2016, pp. 236-238, ISSN 1990–7702.
25. Suntsov S.B., Nesterov D.A., Sokolov N.Yu. Effektivnost' ispol'zovaniya giperteploprovodyashchikh sektsiy na kosmicheskikh apparatakh informatsionnogo obespecheniya [Efficiency of using hyperheat-conducting sections on information support spacecraft]. Naukoemkie tekhnologii [Science Intensive Technologies], 2017, v. 18, no. 12, pp. 54-58.
26. Kulagin V.A., Sokolov N.Yu. Chislennoye issledovaniye kharakteristik teplovykh trub v sostave radioelektronnogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov [Numerical study of the characteristics of heat pipes as part of the radio-electronic equipment of spacecraft]. Jurnal SibFU. Tekhnika i tekhnologii [Journal of SibFU. Engineering & Technologies], 2015, no. 8(6), pp. 769-773, DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-6-769–773.
27. Kulagin V.A., Sokolov N.Yu. Matematicheskoye modelirovaniye rezhimov raboty teplovykh trub v sostave radioelektronnogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov [Mathematical modeling of operating modes of heat pipes as part of radio-electronic equipment of spacecraft]. Security and survivability of technical systems: Proceedings of the V All-Russian Conf.: in 3 volumes (Krasnoyarsk, October 12–16, 2015), Krasnoyarsk: SibFU, 2015, v. 2, pp. 6-10.
28. Kulagin V.A., Sokolov N.Yu. Uluchsheniye teplofizicheskikh kharakteristik teplovykh trub [Improving the thermophysical characteristics of heat pipes]. Jurnal SibFU. Tekhnika i tekhnologii [Journal of SibFU. Engineering & Technologies], 2017, no. 10(3), pp. 372-376, DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-372-376.
29. Kulagin V.A., Sokolov N.Yu. Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye predel'nykh kharakteristik sistemy teplovykh trub v sostave radioelektronnogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov [Physico-mathematical modeling of the limiting characteristics of a heat pipe system as part of the radio-electronic equipment of

spacecraft]. Bezopasnost' i monitoring tekhnogennyh i prirodnyh sistem: Mater. i dokl. VI Vseros. konf. (Krasnoyarsk, 18–21 sent. 2018 g.) [Safety and monitoring of technogenic and natural systems: Proceedings of the VI All-Russian. conf. (Krasnoyarsk, Sept. 18-21, 2018)], Krasnoyarsk: SFU, 2018, pp. 205-210.

30. Sokolov N.Yu., Kulagin V.A. Nesterov D.A. Sistema teplovykh trub v sostave radioelektronnogo oborudovaniya kosmicheskogo apparata pipes Jurnal SibFU. Tekhnika i tekhnologii [Journal of SibFU. Engineering & Technologies], 2021, no. 14(4), pp. 363-377, DOI: 10.17516/1999-494X-0317.
31. Sokolov N.Yu., Kulagin V.A., Nesterov D.A. Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya sistem teplovykh trub [Mathematical modeling and optimization of heat pipe systems], Jurnal SibFU. Tekhnika i tekhnologii [Journal of SibFU. Engineering & Technologies], 2021, no. 14(7), pp. 860-879. DOI: 10.17516/1999-494X-0352.
32. Kulagin V.A., Sokolov N.Yu. Improvement of heat pipe systems for cooling electronic equipment. AIP Conference proceedings 2528, 020022 (2022), DOI: /10.1063/5.0107183.
33. Dan P.D., Rey D.A. Teplovyye truby [Heat pipes], M.: Energiya [Moscow, Energy], 1979, 272 p.
34. Alyamovskiy, A.A. SolidWorks/COSMOSWorks. Inzhenernyy analiz metodom konechnykh elementov [SolidWorks/COSMOSWorks. Engineering analysis by the finite element method]. M.: DMK Press [Moscow, DMK Press], 2004, 432 p.
35. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova Ye.A. et al. Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench [Engineering Analysis with ANSYS Workbench]. Samara: SamGTU [Samara: SamSTU], 2010, 271 p.

Kulagin Vladimir Alekseevich. *Dr. tech. sciences, professor, head of the department of heat engineering and hydro-gas dynamics, Siberian Federal University, specialist in the field of high-velocity hydrodynamics and thermal physics, AuthorID: 360076, SPIN: 2418-4408, ORCID: 0000-0002-5433-7579, v.a.kulagin@mail.ru, 660074, Russia, Krasnoyarsk, st. Ak. Kirensky 5A-58.*

Sokolov Nikita Yurievich. *Design engineer of the 1st category; JSC "Information Satellite Systems" named after Academician M.F. Reshetnev, post-graduate student of the Department of Heat Engineering and Hydro-Gas Dynamics of the Siberian Federal University. AuthorID: 1003951, SPIN: 7518-7957, nikita436@gmail.com, 660074, Russia, Krasnoyarsk, st. Ak. Kirensky, 24.*

Статья поступила в редакцию 20.07.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 06.12.2022.

The article was submitted 07/20/2022; approved after reviewing 10/05/2022; accepted for publication 12/06/2022.

УДК 519.217
DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.005

Полумарковская и скрытая марковская модели функционирования автономного ветродизельного комплекса

Обжерин Юрий Евгеньевич, Сидоров Станислав Михайлович, Федоренко Сергей Николаевич
Севастопольский государственный университет,
Россия, Севастополь, *xaevec@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается задача оценки надежности и анализа функционирования автономного ветродизельного комплекса. Построены его полумарковская и скрытая марковская модели. Скрытая марковская модель используется для нахождения оценок характеристик функционирования автономного ветродизельного комплекса и прогнозирования его состояний на основе полученного в результате функционирования вектора сигналов. Результаты исследования получены в общем виде и инвариантны относительно законов распределения случайных величин, описывающих элементы, позволяют прогнозировать режимы работы автономного ветродизельного комплекса.

Ключевые слова: ветродизельный комплекс, полумарковская модель, скрытая марковская модель, анализ функционирования, прогнозирование

Цитирование: Обжерин Ю.Е. Полумарковская и скрытая марковская модели функционирования автономного ветродизельного комплекса / Обжерин Ю.Е., Сидоров С.М., Федоренко С.Н. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 70-82. DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.005.

Введение. В настоящее время возобновляемые источники электроэнергии повсеместно внедряются в системы электроснабжения. Совместное использование ветроэнергетических установок и дизельных генераторов способствует не только получению экономической выгоды, но и сокращению выбросов продуктов переработки топлива. [1, 2] Однако, эффективность работы ветроэнергетических установок зависит от многих факторов, в частности, от ветровой нагрузки, которая является стохастической. В связи с этим возникает задача построения адекватных математических моделей, учитывающих стохастический характер работы и используемых природных ресурсов (например, ветра) и наличие дизель-генератора (резервного источника энергии).

В статье [3] рассматривается приближенная модель ветродизельного комплекса в Matlab\Simulink. В статьях [4, 5] приводятся результаты исследований имитационного моделирования. В [6, 7] исследуется оценка режимов работы комплекса электроснабжения с ветродизельной электростанцией. В [1, 2] используются марковские модели для анализа функционирования ветродизельного комплекса. Следует отметить, что большинство результатов, полученных другими авторами, рассматривают случаи, когда случайные величины, описывающие систему, имеют экспоненциальное распределение (марковская модель). Полумарковская модель, предлагаемая в данной статье, позволяет использовать распределения произвольного вида. Она также позволяет находить временные характеристики надежности и эффективности системы, в отличие от марковской модели. Во-вторых, для территориально удаленных систем (или систем, управляемых дистанционно) оператору не всегда удается при изменении их состояний полностью получить информацию, содержащуюся в кодировке состояний полумарковской модели, но всегда имеется возможность получить некоторый сигнал (информацию), связанный с состояниями вложенной цепи Маркова, которые можно считать ненаблюдаемыми (скрытыми). В таких случаях использование теории скрытых марковских моделей позволяет решать задачи нахождения и оценки характеристик на основе наблюдаемого вектора сигналов.

Цель нашей работы – применение теории полумарковских процессов с общим фазовым пространством состояний и теории скрытых марковских моделей для анализа надежности и эффективности автономного ветродизельного комплекса (ВДК).

В данной статье рассматривается задача оценки надежности и анализа функционирования автономного ВДК, состоящего из ветроэнергетической установки, рабочего и резервного дизельных генераторов, инвертора и аккумуляторной батареи.

В работе сначала строится полумарковская модель [8-12] автономного ВДК, позволяющая рассчитать стационарные и временные характеристики надежности. Затем, следуя предложенной авторами методике [18], на ее основе разрабатывается скрытая марковская модель [15-17], которая используется для решения задач прогнозирования и оценки ее характеристик с учетом заданных параметров.

1. Полумарковская модель автономного ВДК. Рассмотрим систему S, представляющую собой автономный ветродизельный комплекс. Будем считать инвертор и аккумуляторную батарею абсолютно надежными в том смысле, что вероятности их отказа намного меньше вероятностей отказа других элементов. Следовательно, не будем их учитывать при построении полумарковской модели. Тогда систему S можно представить трехэлементной системой с резервом времени: элемент 1 – ветроустановка, элемент 2 – дизельный генератор (ДГ), элемент 3 – резервный дизельный генератор (РДГ) (резерв времени). Под отказом элемента 1 следует понимать любое событие, приводящее к нарушению нормального функционирования (например, отсутствие ветра, поломка одной из составляющих и т.п.). Система функционирует следующим образом: если элемент 1 (2) выходит из строя, то элемент 2 (1) отключается, элемент 3 включается, и система функционирует за счет резерва времени (элемент 3). Как только элемент 1 (2) восстанавливается, то элемент 3 отключается (при этом считаем, что к следующему моменту времени его характеристики полностью восстанавливаются), а элемент 2 (1) приступает к работе с прежним уровнем наработки. Отказ системы наступает в том случае, когда элемент 1 (2) находится на восстановлении, элемент 2 (1) отключен, и заканчивается резерв времени (отказ элемента 3). Резерв времени заканчивается в случае, если либо кончается топливо резервного генератора (время работы за счет запаса топлива), либо он выходит из строя.

Предположим, что времена безотказной работы элементов 1 и 2 описываются случайными величинами (СВ) α_1 и α_2, соответственно, имеющими функции распределения $F_1(x) = P(\alpha_1 \le x)$, $F_2(x) = P(\alpha_2 \le x)$ и плотности распределения $f_1(x)$, $f_2(x)$, а время восстановления – случайными величинами β_1 и β_2, имеющими функции распределения $G_1(x) = P(\beta_1 \le x)$, $G_2(x) = P(\beta_2 \le x)$ и плотности распределения $g_1(x)$, $g_2(x)$,. Рассматривается случайный мгновенно пополняемый резерв времени, который описывается СВ τ , имеющей функцию распределения $R(x) = P(\tau \le x)$ и плотности распределения $r(x)$. Случайные величины $\alpha_1,\ \alpha_2,\ \beta_1, \beta_2, \tau$ предполагаются независимыми, имеющими конечные математические ожидания. Отметим, что СВ τ представляет собой минимум из времени работы за счет запаса топлива резервного генератора и времени его безотказной работы.

На рис. 1 представлена структурная схема рассматриваемой системы.

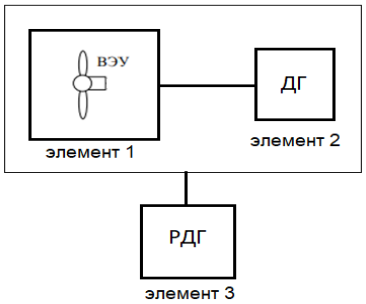


Рис. 1. Структурная схема рассматриваемой система

Рассмотрим дискретно-непрерывное фазовое пространство состояний рассматриваемой системы:

$$E = \{1112x_2, 2112x_1, 1021x_2, 2201x_1, 3020x_1x_2, 3200x_1x_2\}.. \quad (1)$$

Фазовые состояния обозначаются согласно следующей схеме: первая цифра кода означает номер элемента, в котором произошло изменение состояний; остальные цифры – что происходит с каждым элементом (1 – работа, 2 – отключен, 0 – восстановление). Непрерывные компоненты показывают время, оставшееся до следующей смены состояний.

Расшифруем значения кодов состояний:

- $1112x_2$ $(2112x_1)$ – элемент 1(2) восстановился, элемент 2(1) включается, элемент 3 отключен, x_2 (x_1) – время до конца работы элемента 2(1).
- $1021x_2$ $(2201x_1)$ – элемент 1(2) выходит из строя и начинает восстановление, элемент 2(1) отключается, включается элемент 3, x_2 (x_1) – время до конца работы элемента 2(1).
- $3020x_1x_2$ $(3200x_1x_2)$ – отказ системы: x_1 (x_2) – время до конца восстановления элемента 1(2), x_2 (x_1) – время до конца работы элемента 2(1).

Запишем вероятности переходов между состояниями системы:

$$P_{1112x_2}^{2201x_1} = f_1(x_2 + x_1), x_1 > 0; \quad P_{1112x_2}^{1021y_2} = f_1(x_2 - y_2), 0 < y_2 < x_2;$$
$$P_{2112x_1}^{1021x_2} = f_2(x_1 + x_2), x_2 > 0; \quad P_{2112x_1}^{2201y_1} = f_2(x_1 - y_1), 0 < y_1 < x_1;$$
$$P_{1021x_2}^{1112x_2} = \int_0^\infty g_1(t)\bar{R}(t)dt = P(\tau > \beta_1); \quad P_{1021x_2}^{3020x_1x_2} = \int_0^\infty r(t)g_1(x_1 + t)dt\,;$$
$$P_{2201x_1}^{2112x_1} = \int_0^\infty g_2(t)\bar{R}(t)dt = P(\tau > \beta_2);$$
$$P_{2201x_1}^{3200x_1x_2} = \int_0^\infty r(t)g_2(x_2 + t)dt\,;\ P_{3020x_1x_2}^{1112x_2} = 1, \quad P_{3200x_1x_2}^{2112x_1} = 1. \tag{2}$$

Выпишем систему уравнений для нахождения стационарного распределения ВЦМ.

$$\begin{cases} \rho(1112x_2) = \rho(1021x_2)\int_0^\infty g_1(t)\bar{R}(t)dt + \int_0^\infty \rho(3020x_1x_2)dx_1\,, \\ \rho(2112x_1) = \rho(2201x_1)\int_0^\infty g_2(t)\bar{R}(t)dt + \int_0^\infty \rho(3200x_1x_2)dx_2\,, \\ \rho(1021x_2) = \int_{x_2}^\infty f_1(y_2 - x_2)\,\rho(1112y_2)dy_2 + \int_0^\infty f_2(x_2 + x_1)\rho(2112x_1)dx_1\,, \\ \rho(2201x_1) = \int_{x_1}^\infty f_2(y_1 - x_1)\,\rho(2112y_1)dy_1 + \int_0^\infty f_1(x_1 + x_2)\rho(1112x_2)dx_2\,,. \\ \rho(3020x_1x_2) = \rho(1021x_2)\int_0^\infty r(t)g_1(x_1 + t)dt\,, \\ \rho(3200x_1x_2) = \rho(2201x_1)\int_0^\infty r(t)g_2(x_2 + t)dt\,, \\ \int_E \rho(e)de = 1 \text{ (условие нормировки).} \end{cases} \tag{3}$$

Подставим уравнение 5 в уравнение 1 системы (3). Получим

$$\rho(1112x_2) = \rho(1021x_2)\int_0^\infty g_1(t)\bar{R}(t)dt + + \rho(1021x_2)\int_0^\infty dx_1\int_0^\infty r(t)g_1(x_1 + t)dt =$$
$$= \rho(1021x_2)\left[\int_0^\infty g_1(t)\bar{R}(t)dt + \int_0^\infty dx_1\int_0^\infty r(t)g_1(x_1 + t)dt\right] =$$
$$= \rho(1021x_2)\left[\int_0^\infty g_1(t)\bar{R}(t)dt + \int_0^\infty r(t)dt\int_0^\infty g_1(x_1 + t)dx_1\right] =$$
$$= \rho(1021x_2)\left[\int_0^\infty g_1(t)\bar{R}(t)dt + \int_0^\infty r(t)\overline{G_1}(t)dt\right] = \rho(1021x_2).$$

Аналогично, подставляя уравнение 6 в уравнение 2 системы (3), получаем:

$$\rho(2112x_1) = \rho(2201x_1).$$

Следовательно, система (3) приводится к виду:

$$\begin{cases} \rho(1021x_2) = \int_{x_2}^\infty f_1(y_2 - x_2)\,\rho(1021y_2)dy_2 + \int_0^\infty f_2(x_2 + x_1)\rho(2201x_1)dx_1\,, \\ \rho(2201x_1) = \int_{x_1}^\infty f_2(y_1 - x_1)\,\rho(2201y_1)dy_1 + \int_0^\infty f_1(x_1 + x_2)\rho(1021x_2)dx_2\,. \end{cases} \tag{4}$$

Решение системы (4) найдено в [12] и имеет вид:

$$\rho(1112x_2) = \rho(1021x_2) = \rho_0\overline{F_2}(x_2),$$

$$\rho(2112x_1) = \rho(2201x_1) = \rho_0\overline{F_1}(x_1),$$
$$\rho(3020x_1x_2) = \rho_0\overline{F_2}(x_2)\int_0^\infty r(t)g_1(x_1+t)dt,$$
$$\rho(3200x_1x_2) = \rho_0\overline{F_1}(x_1)\int_0^\infty r(t)g_2(x_2+t)dt \qquad (5)$$

константа ρ_0 находится из условия нормировки.

Времена пребывания в состояниях системы:

$$\theta_{1112x_2} = \alpha_1 \wedge x_2, \qquad \theta_{2112x_1} = \alpha_2 \wedge x_1, \qquad \theta_{1021x_2} = \beta_1 \wedge \tau,$$
$$\theta_{2201x_1} = \beta_2 \wedge \tau,\ \theta_{3020x_1x_2} = x_1,\ \theta_{3200x_1x_2} = x_2, \qquad (6)$$

где $\wedge$ – знак минимума.

Тогда средние времена пребывания в состояниях равны:

$$M\theta_{1112x_2} = \int_0^{x_2}\overline{F_1}(t)dt, \qquad M\theta_{2112x_1} = \int_0^{x_1}\overline{F_2}(t)dt,$$
$$M\theta_{1021x_2} = \int_0^\infty \overline{G_1}(t)\bar{R}(t)dt,\ M\theta_{2201x_1} = \int_0^\infty \overline{G_2}(t)\bar{R}(t)dt. \qquad (7)$$
$$M\theta_{3020x_1x_2} = x_1, \qquad M\theta_{3200x_1x_2} = x_2.$$

Разобьем пространство состояний E на два непересекающихся подмножества: работоспособных (E_+) и отказовых состояний (E_-):

$$E_+ = \{1112x_2, 2112x_1, 1021x_2, 2201x_1\}, \qquad E_- = \{3020x_1x_2, 3200x_1x_2\}$$

Найдем стационарные характеристики надежности системы.

Используя вероятности переходов (2), стационарное распределение (5), средние времена пребывания в состояниях (7), получаем:

$$\int_{E_+} m(x)\rho(dx) = \rho_0\int_0^\infty \overline{F_2}(x_2)dx_2\int_0^\infty \overline{G_1}(t)\bar{R}(t)dt +$$
$$+\rho_0\int_0^\infty \overline{F_1}(x_1)dx_1\int_0^\infty \overline{G_2}(t)\bar{R}(t)dt + \rho_0\int_0^\infty \overline{F_2}(x_2)dx_2\int_0^{x_2}\overline{F_1}(t)dt +$$
$$+\rho_0\int_0^\infty \overline{F_1}(x_1)dx_1\int_0^{x_1}\overline{F_2}(t)dt = \rho_0 M\alpha_2 M(\beta_1\wedge\tau) + \rho_0 M\alpha_1 M(\beta_2\wedge\tau) +$$
$$+\rho_0 M\alpha_1 M\alpha_2.$$

$$\int_{E_+} P(x,E_-)\rho(dx) = \rho_0\int_0^\infty dx_1\int_0^\infty \overline{F_2}(x_2)dx_2\int_0^\infty r(t)g_1(x_1+t)dt +$$
$$+\rho_0\int_0^\infty dx_2\int_0^\infty \overline{F_1}(x_1)dx_1\int_0^\infty r(t)g_2(x_2+t)dt =$$
$$= \rho_0 M\alpha_2\int_0^\infty r(t)\overline{G_1}(t)dt + \rho_0 M\alpha_1\int_0^\infty r(t)\overline{G_2}(t)dt =$$
$$= \rho_0 M\alpha_2 P(\beta_1 > \tau) + \rho_0 M\alpha_1 P(\beta_2 > \tau).$$

$$\int_{E_-} m(x)\rho(dx) = \rho_0\int_0^\infty x_1dx_1\int_0^\infty \overline{F_2}(x_2)dx_2\int_0^\infty r(t)g_1(x_1+t)dt +$$
$$+\rho_0\int_0^\infty x_2dx_2\int_0^\infty \overline{F_1}(x_1)dx_1\int_0^\infty r(t)g_2(x_2+t)dt =$$
$$= \rho_0 M\alpha_2\int_0^\infty x_1dx_1\int_0^\infty r(t)g_1(x_1+t)dt + \rho_0 M\alpha_1\int_0^\infty x_2dx_2\int_0^\infty r(t)g_2(x_2+t)dt.$$

Используя результаты, полученные в [18, с. 61], получаем

$$\int_{E_-} m(x)\rho(dx) = \rho_0 M\alpha_2[M\beta_1 - M(\beta_1\wedge\tau)] + \rho_0 M\alpha_1[M\beta_2 - M(\beta_2\wedge\tau)].$$

$$\int_E m(x)\rho(dx) = \int_{E_-} m(x)\rho(dx) + \int_{E_+} m(x)\rho(dx) =$$

$$= \rho_0 M\alpha_2[M\beta_1 - M(\beta_1 \wedge \tau)] + \rho_0 M\alpha_1[M\beta_2 - M(\beta_2 \wedge \tau)] + \rho_0 M\alpha_2 M(\beta_1 \wedge \tau) +$$
$$+\rho_0 M\alpha_1 M(\beta_2 \wedge \tau) + \rho_0 M\alpha_1 M\alpha_2 = \rho_0[M\alpha_1 M\alpha_2 + M\alpha_2 M\beta_1 + M\alpha_1 M\beta_2],$$

где выше обозначено:

$m(x)$ – средние времена пребывания в состояниях, $P(x, E_-)$ – вероятности перехода из работоспособных состояний в отказовые, $M(\beta \wedge \tau)$ – математическое ожидание минимума двух СВ, $P(\beta > \tau)$ – математическое ожидание того, что СВ β больше СВ τ.

$$P(\beta > \tau) = \int_0^\infty r(t)\bar{G}(t)dt \ , \qquad M(\beta \wedge \tau) = \int_0^\infty \bar{G}(t)\bar{R}(t)dt \ .$$

Используя формулы, представленные в [12, 13], и выражения, найденные выше, получаем:

– среднее стационарное время безотказной работы T_+:

$$T_+ = \frac{\int_{E_+} m(x)\rho(dx)}{\int_{E_+} P(x, E_-)\rho(dx)} = \frac{M\alpha_2 M(\beta_1 \wedge \tau) + M\alpha_1 M(\beta_2 \wedge \tau) + M\alpha_1 M\alpha_2}{M\alpha_2 P(\beta_1 > \tau) + M\alpha_1 P(\beta_2 > \tau)},$$

– среднее стационарное время восстановления T_-:

$$T_- = \frac{\int_{E_-} m(x)\rho(dx)}{\int_{E_+} P(x, E_-)\rho(dx)} = \frac{M\alpha_2[M\beta_1 - M(\beta_1 \wedge \tau)] + M\alpha_1[M\beta_2 - M(\beta_2 \wedge \tau)]}{M\alpha_2 P(\beta_1 > \tau) + M\alpha_1 P(\beta_2 > \tau)},$$

– стационарный коэффициент готовности $K_г$:

$$K_г = \frac{\int_{E_+} m(x)\rho(dx)}{\int_{E} m(x)\rho(dx)} = \frac{M\alpha_2 M(\beta_1 \wedge \tau) + M\alpha_1 M(\beta_2 \wedge \tau) + M\alpha_1 M\alpha_2}{M\alpha_1 M\alpha_2 + M\alpha_2 M\beta_1 + M\alpha_1 M\beta_2}.$$

В случае неслучайного резерва времени, т.е. когда $R(x) = 1(x - h)$, где h – величина резерва времени, стационарные характеристики надежности примут вид:

– среднее стационарное время безотказной работы T_+:

$$T_+ = \frac{M\alpha_2 \int_0^h \overline{G_1}(t)dt + M\alpha_1 \int_0^h \overline{G_2}(t)dt + M\alpha_1 M\alpha_2}{M\alpha_2 \overline{G_1}(h) + M\alpha_1 \overline{G_2}(h)}, \tag{8}$$

– среднее стационарное время восстановления T_-:

$$T_- = \frac{M\alpha_2 \int_h^\infty \overline{G_1}(t)dt + M\alpha_1 \int_h^\infty \overline{G_2}(t)dt}{M\alpha_2 \overline{G_1}(h) + M\alpha_1 \overline{G_2}(h)}, \tag{9}$$

– стационарный коэффициент готовности $K_г$:

$$K_г = \frac{M\alpha_2 \int_0^h \overline{G_1}(t)dt + M\alpha_1 \int_0^h \overline{G_2}(t)dt + M\alpha_1 M\alpha_2}{M\alpha_1 M\alpha_2 + M\alpha_2 M\beta_1 + M\alpha_1 M\beta_2}. \tag{10}$$

В качестве иллюстративного примера использования формул (8)-(9), рассмотрим систему S, для которой перед началом её функционирования принято, что СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ имеют распределение Эрланга IV порядка и $M\alpha_1 = 150$ ч., $M\alpha_2 = 100$ ч., $M\beta_1 = 24$ ч., $M\beta_2 = 20$ ч., а резерв времени h изменяется от 10 до 20 часов. Полученные результаты изображены на рис. 2 (а, б, в).

а)

б)

в)

Рис. 2. Графики стационарных характеристик надежности при различных значениях резерва времени h: а – среднее время безотказной работы, б – среднее время восстановления, в – стационарный коэффициент готовности

2. Нахождение вероятностей перехода укрупненной полумарковской модели. Для построения скрытой марковской модели (СММ) укрупним по непрерывным компонентам стационарные распределения (5), т.е. применим алгоритм стационарного фазового укрупнения к каждому состоянию. Отметим, что фазовое пространство полумарковских состояний получается добавлением к кодам физических состояний совокупности непрерывных компонент, фиксирующих остаточные времена действия факторов, изменяющих состояния системы. [13] Эти непрерывные компоненты и желательно укрупнять, оставляя только дискретное множество физических состояний.

Получим

$$\int_0^\infty \rho(1112x_2)dx_2 = \int_0^\infty \rho(1021x_2)dx_2 = \rho_0 \int_0^\infty \overline{F_2}(x_2)dx_2 = \rho_0 M\alpha_2,$$

$$\int_0^\infty \rho(2112x_1)dx_1 = \int_0^\infty \rho(2201x_1)dx_1 = \rho_0 \int_0^\infty \overline{F_1}(x_1)dx_1 = \rho_0 M\alpha_1,$$

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \rho(3020x_1x_2)dx_1\,dx_2 = \rho_0 \int_0^\infty \overline{F_2}(x_2)dx_2 \int_0^\infty x_1 dx_1 \int_0^\infty r(t)g_1(x_1+t)dt =$$

$$= \rho_0 M\alpha_2 \int_0^\infty r(t)\overline{G_1}(t)dt = \rho_0 M\alpha_2 P(\beta_1 > \tau).$$

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \rho(3200x_1x_2)dx_1\,dx_2 = \rho_0 \int_0^\infty \overline{F_1}(x_1)dx_1 \int_0^\infty x_2 dx_2 \int_0^\infty r(t)g_2(x_2+t)dt =$$

$$= \rho_0 M\alpha_1 \int_0^\infty r(t)\overline{G_2}(t)dt = \rho_0 M\alpha_1 P(\beta_2 > \tau).$$

Следовательно, дискретное фазовое пространство укрупненных состояний рассматриваемой системы имеет вид:

$$\hat{E} = \{1112,\ 2112,\ 1021,\ 2201,\ 3020,\ 3200\}.$$

Используя формулы, представленные в [12, стр. 36],

$$\widehat{p_k^r} = \frac{\int_{E_k} \rho(de) P(e, E_r)}{\rho(E_k)}, \quad \widehat{m_k} = \frac{\int_{E_k} \rho(de) m(e)}{\rho(E_k)}. \tag{11}$$

найдем вероятности переходов $\widehat{p_k^r}$ между укрупненными состояниями и средние времена пребывания $\widehat{m_k}$ в них.

Вычислим знаменатели формул (11).

$$\rho(E_{1112}) = \rho(E_{1021}) = \rho_0 M\alpha_2, \ \ \rho(E_{2112}) = \rho(E_{2201}) = \rho_0 M\alpha_1,$$
$$\rho(E_{3020}) = \rho_0 M\alpha_2 P(\beta_1 > \tau), \ \ \rho(E_{3200}) = \rho_0 M\alpha_1 P(\beta_2 > \tau).$$

Средние времена пребывания $\widehat{m_k}$ равны:

$$\widehat{m}_{1112} = \frac{\int_0^\infty \overline{F_2}(x_2)dx_2 \int_0^{x_2} \overline{F_1}(t)dt}{M\alpha_2}, \qquad \widehat{m}_{2112} = \frac{\int_0^\infty \overline{F_1}(x_1)dx_1 \int_0^{x_1} \overline{F_2}(t)dt}{M\alpha_1},$$

$$\widehat{m}_{1021} = \frac{\int_0^\infty \overline{F_2}(x_2)dx_2 \int_0^\infty \overline{G_1}(t)\bar{R}(t)dt}{M\alpha_2} = M(\beta_1 \wedge \tau), \qquad \widehat{m}_{2201} = M(\beta_2 \wedge \tau),$$

$$\widehat{m}_{3020} = \frac{M\beta_1 - M(\beta_1 \wedge \tau)}{P(\beta_1 > \tau)}, \qquad \widehat{m}_{3200} = \frac{M\beta_2 - M(\beta_2 \wedge \tau)}{P(\beta_2 > \tau)}.$$

Найдем вероятности переходов $\widehat{p_k^r}$:

$$\hat{p}_{1112}^{1021} = \frac{\int_0^\infty \overline{F_2}(x_2)dx_2 \int_0^{x_2} f_1(x_2 - t)dt}{M\alpha_2} = \frac{M\alpha_2 - M(\alpha_1 \wedge \alpha_2)}{M\alpha_2},$$

$$\hat{p}_{1112}^{2201} = \frac{M(\alpha_1 \wedge \alpha_2)}{M\alpha_2}, \qquad \hat{p}_{2112}^{1021} = \frac{M(\alpha_1 \wedge \alpha_2)}{M\alpha_1}, \hat{p}_{2112}^{2201} = \frac{M\alpha_1 - M(\alpha_1 \wedge \alpha_2)}{M\alpha_1},$$

$$\hat{p}_{1021}^{1112} = P(\tau > \beta_1), \qquad \hat{p}_{1021}^{3020} = P(\tau < \beta_1), \qquad \hat{p}_{2201}^{2112} = P(\tau > \beta_2),$$
$$\hat{p}_{2201}^{3200} = P(\tau < \beta_2), \qquad \hat{p}_{3020}^{1112} = 1, \qquad \hat{p}_{3200}^{2112} = 1.$$

Тогда матрица переходных вероятностей $\hat{P}_i^j$ между укрупненными состояниями системы равна:

$$\hat{P}_i^j = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{M\alpha_2 - M(\alpha_1 \wedge \alpha_2)}{M\alpha_2} & \frac{M(\alpha_1 \wedge \alpha_2)}{M\alpha_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{M(\alpha_1 \wedge \alpha_2)}{M\alpha_1} & \frac{M\alpha_1 - M(\alpha_1 \wedge \alpha_2)}{M\alpha_1} & 0 & 0 \\ P(\tau > \beta_1) & 0 & 0 & 0 & P(\tau < \beta_1) & 0 \\ 0 & P(\tau > \beta_2) & 0 & 0 & 0 & P(\tau < \beta_2) \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

3. Скрытая марковская модель рассматриваемой системы. Для полного описания СММ [16, 17] необходимо определить:

1. Множество состояний модели соответствует множеству состояний укрупненной модели $\hat{E}$.

2. Алфавит наблюдаемой последовательности (множество сигналов).

Предположим, что при функционировании системы S состояния ВЦМ укрупненной модели не наблюдаются (скрытые состояния), а наблюдаются только количество работоспособных элементов во время смены состояний ВЦМ. Введём следующее множество сигналов:

$$J = \{0, 1, 2\},$$

где

– 0 – отказ системы;
– 1 – элементы 1 и 2 системы функционируют;
– 2 – система работоспособна за счет резервного дизельного генератора.

Множество сигналов можно выбирать по-разному. Множество сигналов J выбрано в таком виде, т.к. «точную» информацию о количестве работоспособных основных и резервных элементов можно получить практически для любой системы.

3. Матрицу переходных вероятностей между состояниями системы.

Для нашей модели матрица переходных вероятностей состоит из переходных вероятностей $\hat{P}_i^j$ укрупненной полумарковской модели.

4. Связь состояний модели с сигналами.

Рассмотрим связь между состояниями вложенной цепи Маркова (ВЦМ) укрупненной модели и сигналами, т.е. определим функцию связи $R(s|\boldsymbol{x})$ [16, 18]:

$$R(s|\boldsymbol{x}) = P(S_n = s|X_n = \boldsymbol{x}), \boldsymbol{x} \in \hat{E}, s \in J, \sum_{s\in J} R(s|\boldsymbol{x}) = 1,$$

где S_n – n-ый сигнал.

Будем считать, что сигналы 0 и 2 испускаются верно с вероятностью 0,99 и с вероятностью 0,01 ошибочно.

Функция $R(s|\boldsymbol{x})$ связи состояний ВЦМ укрупненной модели с сигналами представлена в таблице 1.

Таблица 1. Функция связи $R(s|x)$ состояний ВЦМ укрупненной модели с сигналами

Сигнал, s / Состояние, x	s=0	s=1	s=2
1112	0	1	0
2112	0	1	0
1021	0,01	0	0,99
2201	0,01	0	0,99
3020	0,99	0	0,01
3200	0,99	0	0,01

5. Начальное распределение вероятностей модели.

Будем считать, что в начальный момент времени укрупненная модель равновероятно может находится в состоянии 1112 или 2112.

СММ на основе укрупненной полумарковской модели построена.

4. Оценка характеристик и прогнозирование состояний. В качестве иллюстративного примера, рассмотрим систему S, для которой перед началом её функционирования принято, что СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ имеют распределение Эрланга IV порядка и $\mathrm{M}\alpha_1 = 150$ ч., $\mathrm{M}\alpha_2 = 100$ ч., $\mathrm{M}\beta_1 = 24$ ч., $\mathrm{M}\beta_2 = 20$ ч., $\mathrm{M}\tau = 15$ ч. Предполагается, что в начальный момент времени система находится в состояниях 1112 и 2112 с вероятностями 0,5.

Предположим, что в результате функционирования системы S получен следующий вектор сигналов:

$$\overline{s}_{30} = (1,2,1,2,1,2,1,2,0,1,2,1,2,1,2,0,1,2,1,2,0,1,2,1,2,1,2,1,2,1), n=30.$$

Рассмотрим задачи по оценке характеристик скрытой марковской модели с учетом введённых параметров, следуя [18, 19].

1. Определим вероятности состояний скрытой модели в момент испускания 30-го сигнала (последнего сигнала в цепочке).

Т.к. 30-й сигнал равен 1 (элементы 1 и 2 системы функционируют), то стоит задача определения вероятности нахождения укрупненной системы в состояниях, приводящих к испуска-

нию указанного сигнала. В результате получаем, что на 30-ом шаге укрупнённая модель с вероятностью 0,3553 находилась в состоянии 1112, с вероятностью 0,6447 в состоянии 2112. Для остальных состояний эта вероятность равна нулю.

2. Найдём вероятности, с которыми скрытая модель осуществит переход в состояния на следующем 31-ом шаге.

Вероятности перехода скрытой модели на 31-ом шаге: в состояние 1021 с вероятностью 0,419, в состояние 2201 – 0,581, во все остальные – с нулевой.

3. Определим вероятности появления сигналов на следующем 31-ом шаге.

Получаем, что вероятность появления сигнала 2 на 31-м шаге равна 0,99, сигнала 0 – 0,01, сигнала 1 – 0.

4. Найдем вероятность появления (испускания) полученного вектора сигналов $\overline{s}_{30}$.

Вероятность появления полученного вектора сигналов $\overline{s}_{30}$ равна 0,00000243.

5. Прогнозирование состояний скрытой модели по полученному вектору сигналов.

В таблице 2 указаны наиболее вероятные состояния скрытой модели на указанных в ней переходах и вероятности этих состояний.

Применяя алгоритм алгоритм Баума-Велша [15, 16], получаем переоцененную матрицу переходных вероятностей для рассматриваемой системы. Исходная матрица переходных вероятностей и матрица переходных вероятностей после переоценки представлены на рисунке 3.

Таблица 2. Наиболее вероятные состояния скрытой модели на переходах

Номер перехода	1	7	11	17	21	26	29
Наиболее вероятное состояние	1112	2112	2201	2112	3200	2112	2201
Вероятность состояния	0,5233	0,6737	0,6520	0,5190	0,5136	0,6132	0,6447

Применяя алгоритм Витерби [15, 16] к переоцененной модели, определяем наиболее вероятную цепочку состояний для полученного вектора сигналов: 1112, 2201, 2112, 1021, 1112, 2201, 2112, 1021, 3020, 1112, 2201, 2112, 1021, 2112, 2201, 3200, 2112, 2201, 2112, 1021, 3020, 1112, 2201, 2112, 1021, 2112, 2201, 2112, 1021, 2112.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0{,}1454 & 0{,}8546 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}5697 & 0{,}4303 & 0 & 0 \\ 0{,}2606 & 0 & 0 & 0 & 0{,}7394 & 0 \\ 0 & 0{,}3469 & 0 & 0 & 0 & 0{,}6531 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0{,}1283 & 0{,}8717 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}5369 & 0{,}4631 & 0 & 0 \\ 0{,}7075 & 0 & 0 & 0 & 0{,}2925 & 0 \\ 0 & 0{,}8066 & 0 & 0 & 0 & 0{,}1934 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

а) б)

Рис. 3. Матрицы переходных вероятностей: а) исходная матрица переходных вероятностей P_i^j, б) переоцененная матрица переходных вероятностей $\overline{P}_i^j$

Обсуждение. Результаты данной статьи открывают большие возможности для оценки функционирования автономных ветродизельных комплексов. В статье показано, как применить аппарат теории скрытых марковских моделей (используемый для систем с конечным множеством состояний) для полумарковских моделей, у которых общее фазовое пространство состояний, что расширяет возможности применения теории СММ.

В статье приведены лишь иллюстративные примеры, показывающие расширение возможностей моделирования автономных ветродизельных комплексов при использовании

разработанной авторами методики. Однако, очевидно, что для специалистов-энергетиков не составит труда использовать параметры реальных ветродизельных комплексов в качестве входных данных моделей с последующим расчетом характеристик.

Следует отметить, что полученные результаты при должной переформулировке могут быть использованы для анализа функционирования технических систем различного назначения.

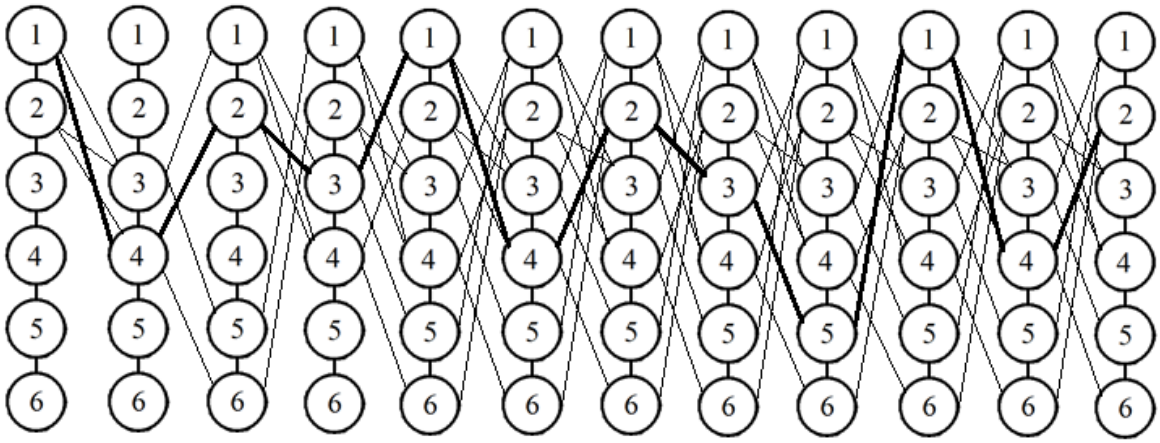


Рис. 4. Решетчатая диаграмма функционирования системы

Решетчатая диаграмма для первых 12 полученных сигналов изображена на рис. 4. Для простоты используется следующая перекодировка состояний модели: $1112 \leftrightarrow 1$, $2112 \leftrightarrow 2$, $1021 \leftrightarrow 3$, $2201 \leftrightarrow 4$, $3020 \leftrightarrow 5$, $3200 \leftrightarrow 6$. Наиболее вероятные состояния (по алгоритму Витерби для переоцененной модели) для вектора полученных сигналов выделены жирной линией. Тонкими линиями соединены другие возможные состояния, которые система могла бы достичь без информации о векторе сигналов.

Заключение. В данной работе построена полумарковская модель автономного ВДК, позволяющая рассчитать стационарные и временные характеристики надежности. Затем на ее основе разработана скрытая марковская модель, которая используется для нахождения оценок характеристик автономного ВДК и прогнозирования его состояний на основе полученного в результате функционирования вектора сигналов. Результаты исследования позволят прогнозировать режимы работы автономного ВДК. Полученная СММ позволяет переоценивать параметры построенной модели (обучать) для повышения ее адекватности, согласно получаемым в процессе функционирования сигналам.

Результаты исследования получены в общем виде и инвариантны относительно законов распределения случайных величин, описывающих элементы автономного ВДК. Они позволяют моделировать функционирование системы при различных законах распределения, основываясь на статистических данных, не видоизменяя саму модель. В дальнейшем планируется обобщить результаты на случай парка (состоящего из N штук) ветродизельных комплексов.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-329.2022.4.

Список источников

1. Ветродизельные комплексы в децентрализованном электроснабжении: монография / А. В. Бобров, В.А. Тремясов // Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 216 с.
2. Григорьева О.А. Анализ надежности автономного ветродизельного комплекса / О.А. Григорьева, Т.В Кривенко, В.А. Тремясов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2016. – № 2(243). – С. 45-52.

3. Salima Meziane, Omar Feddaoui, Riad Toufouti Modeling and simulation of hybrid wind-diesel power generation system. International journal of renewable energy, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 49-58.
4. Sebastián R., Nevado A. Study and simulation of a wind hydro isolated microgrid. Energies, 2020, vol. 13(22), DOI: 10.3390/en13225937.
5. Sebastián R. Modeling, simulation and control of wind diesel power systems. Energies, 2022, vol. 15, no. 1712, DOI: 10.3390/en15051712.
6. Shklyarskiy Y.E., Batueva D.E. Operation mode selection algorithm development of a wind-diesel power plant supply complex. Journal of mining institute, 2022, vol. 253, pp. 115-126, DOI: 10.31897/PMI.2022.7.
7. Baikov A.I., Dar'enkov A.B., Sosnina E.N. Simulation modeling of a wind-diesel power plant. Russian electrical engineering, 2018, vol. 89, pp. 161-167, DOI: 10.3103/S1068371218030033.
8. Limnios N., Nikulin M. Recent advances in reliability theory: methodology, practice, and inference. New York, Springer science+business media, 2000, 514 p.
9. Руденко Ю.Н. Надёжность систем энергетики / Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков // Новосибирск: Наука, 1989. – 328 с.
10. Обжерин Ю.Е. Полумарковские и скрытые марковские и полумарковские модели систем энергетики / Ю.Е. Обжерин // Известия РАН. Энергетика, 2019. – № 5. – С. 26-32.
11. Обжерин Ю.Е. Анализ надежности и фазовое укрупнение систем с поэлементными накопителями / Ю.Е. Обжерин, С.М. Сидоров, М.М. Никитин // Известия РАН. Энергетика, 2019. – № 6. – С. 66-77.
12. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надёжности систем / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин // Киев: Наук. думка, 1982. – 236 с.
13. Korolyuk V.S. Stochastic models of systems. Dordrecht: Springer science+business media, 1999, 185 p.
14. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский // Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. – 284 с.
15. Ross S.M. Introduction to probability models. USA, Elsevier academic press, 2006, 800 p.
16. Rabiner L.R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE, 1989, vol. 77, no.2, pp. 257-286, DOI: 10.1109/5.18626.
17. Cappe´ O., Moulines E., Ryde´n T. Inference in hidden markov models. New York, Springer-Verlag, 2005, 653 p.
18. Obzherin Y.E., Nikitin M.M., Sidorov S.M. Hidden Markov model based on signals from blocks of semi-markov system's elements and its application for dynamics analysis energy systems. Smart innovation, systems and technologies. Singapore: Springer, 2021, vol. 187, p. 477-486.
19. Обжерин Ю.Е. Скрытая марковская модель технического обслуживания по возрасту элементов системы / Ю.Е. Обжерин, М.М. Никитин, С.М. Сидоров // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 92-е заседание семинара, учрежденного при ИСЭМ СО РАН. В 3-х книгах. – Иркутск: Изд-во ИСЕМ СО РАН, 2020. – С. 89-98.

Обжерин Юрий Евгеньевич. *Доктор технических наук, профессор, кафедра высшей математики Севастопольского государственного университета. Исследовательские интересы связаны с теорией случайных процессов, теорией надежности, теорией массового обслуживания, математическим моделированием систем, теорию скрытых марковских моделей. AuthorID: 766997, SPIN: 7589-4167, ORCID: 0000-0003-1180-1084. objsev@mail.ru, 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, кафедра «Высшая математика».*

Сидоров Станислав Михайлович. *Кандидат технических наук, доцент кафедр «Высшая математика» и «Интеллектуальные сети энергоснабжения» Севастопольского государственного университета, ученый секретарь Института природно-технических систем. Исследовательские интересы включают прикладную математику, теорию надежности, математическое моделирование систем, теорию скрытых марковских моделей. AuthorID: 889130, SPIN: 2766-5222, ORCID: 0000-0002-9785-918. xaevec@mail.ru, 299011, Российская Федерация г. Севастополь, ул. Ленина, д. 28.*

Федоренко Сергей Николаевич. *Старший преподаватель кафедры Приборные системы и автоматизация технологических процессов Севастопольского государственного университета. Исследовательские интересы включают автоматизацию и математическое моделирование систем. AuthorID: 930695, SPIN: 4100-2953, ORCID: 0000-0003-3080-7668, sergey.fedor@mail.ru, 299055, г. Севастополь, проспект генерала Острякова, д.167, кв.32.*

UDC 519.217
DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.005

Semi-Markov and hidden Markov models of autonomous wind diesel complex functioning

Yuriy E. Obzherin, Stanislav M. Sidorov, Sergey N. Fedorenko
Sevastopol State University,
Russia, Sevastopol, *xaevec@mail.ru*

Abstract. The problem of assessing the reliability and analyzing the functioning of an autonomous wind-diesel complex is considered. Its semi-Markov and hidden Markov models are constructed. A hidden Markov model is used to find performance estimates for an autonomous wind-diesel complex and predict its states based on the resulting signal vector. The results of the study are obtained in a general form and are invariant with respect to the laws of distribution of random variables describing the elements. They make it possible to predict the operating modes of an autonomous wind-diesel complex.

Keywords: wind diesel complex, semi-Markov model, hidden Markov model, performance analysis, forecasting

Acknowledgements: The study was supported by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – Candidates of Sciences No. MK-329.2022.4.

References

1. Bobrov A.V., Tremjasov V.A. Vetrodizel'nye kompleksy v decentralizovannom jelektrosnabzhenii: monografija [Wind-diesel complexes in decentralized power supply: monograph]. Krasnojarsk, Izd-vo SFU [SFU Publishing House], 2012, 216 p.
2. Grigor'eva O.A., Krivenko T.V., Tremjasov V.A. Analiz nadezhnosti avtonomnogo vetrodizel'nogo kompleksa [Reliability analysis of an autonomous wind-diesel complex]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburg-skogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta [Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University], 2016, no. 2 (243), pp. 45-52.
3. Salima Meziane, Omar Feddaoui, Riad Toufouti. Modeling and simulation of hybrid wind-diesel power generation system. International journal of renewable energy, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 49-58.
4. Sebastián R., Nevado A. Study and simulation of a wind hydro isolated microgrid. Energies, 2020, vol. 13(22), DOI: 10.3390/en13225937.
5. Sebastián R. Modeling, simulation and control of wind diesel power systems. Energies, 2022, no. 15, DOI: 10.3390/en15051712.
6. Shklyarskiy Y.E., Batueva D.E. Operation mode selection algorithm development of a wind-diesel power plant supply complex. Journal of mining institute, 2022, no. 253, pp. 115-126, DOI: 10.31897/PMI.2022.7.
7. Baikov A.I., Dar'enkov A.B., Sosnina E.N. Simulation modeling of a wind-diesel power plant. Russian electrical engineering, 2018, vol. 89, pp. 161-167, DOI: 10.3103/S1068371218030033.
8. Limnios N., Nikulin M. Recent advances in reliability theory: methodology, practice, and inference. New York: Springer science+business media, 2000, 514 p.
9. Rudenko Y.N., Ushakov I.A. Nadjozhnost' sistem jenergetiki, 2-e izd [Reliability of power systems, 2nd edition]. Novosibirsk, Nauka [The Science], 1989, 328 p.
10. Obzherin Y.E. Polumarkovskie i skrytye markovskie i polumarkovskie modeli sistem jenergetiki [Semi-Markov and hidden Markov and semi-Markov models of energy systems]. Izvestiya RAN. Energetika [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2019, no 5, pp. 26-32.
11. Obzherin Y.E., Sidorov S.M., Nikitin M.M. Analiz nadezhnosti i fazovoe ukrupnenie sistem s pojelementnymi nakopiteljami [Analysis of reliability and phase merging of systems with component-wise storages]. Izvestiya RAN. Energetika [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2019, no. 6, pp. 66-77.
12. Koroljuk V.S., Turbin A.F. Processy markovskogo vosstanovlenija v zadachah nadjozhnosti system [Markov recovery processes in problems of system reliability]. Kiev, Nauk. Dumka [Scientific Thought], 1982, 236 p.
13. Korolyuk V.S., Stochastic models of systems. Dordrecht, Springer science+business media, 1999, 185 p.
14. Kopp V.Ja., Obzherin Yu.E., Peschanskij A.I. Stohasticheskie modeli avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem s vremennym rezervirovaniem [Stochastic models of automated production systems with time redundancy]. Sevastopol', Izd-vo SevGTU [Publishing House of SevSTU], 2000, 284 p.
15. Ross S.M. Introduction to probability models. USA: Elsevier academic press, 2006, 800 p.
16. Rabiner L.R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE, 1989, vol. 77, no.2, pp. 257-286, DOI: 10.1109/5.18626.

17. Cappe´ O., Moulines E., Ryde´n T. Inference in hidden Markov models. New York, Springer-Verlag, 2005, 653 p.
18. Obzherin Yu.E., Nikitin M.M., Sidorov S.M. Hidden Markov model based on signals from blocks of semi-markov system's elements and its application for dynamics analysis energy systems. Smart innovation, systems and technologies, Singapore, Springer, 2021, vol. 187, pp. 477-486.
19. Obzherin Yu.E., Nikitin M.M., Sidorov S.M. Skrytaja markovskaja model' tehnicheskogo obsluzhivanija po vozrastu jelementov sistemy [Hidden Markov model of maintenance by age of system elements]. Metodicheskie voprosy issledovanija nadezhnosti bol'shih sistem jenergetiki. 92-e zasedanie seminara, uchrezhdennogo pri ISJeM SO RAN. V 3-h knigah [Methodological issues of reliability research of large energy systems. 92nd meeting of the seminar established at ISEM SB RAS. In 3 books], 2020, pp. 89-98.

Obzherin Yuri Evgenievich. *Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Higher Mathematics, Sevastopol State University. Research interests are related to the theory of random processes, reliability theory, queuing theory, mathematical modeling of systems, the theory of hidden Markov models. AuthorID: 766997, SPIN: 7589-4167, ORCID: 0000-0003-1180-1084. objsev@mail.ru, 299053, Russian Federation, Sevastopol, st. Universitetskaya, 33, Department of Higher Mathematics.*

Sidorov Stanislav Mikhailovich. *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Departments of Higher Mathematics and Intelligent Power Supply Networks of the Sevastopol State University, Scientific Secretary of the Institute of Natural and Technical Systems. Research interests include applied mathematics, reliability theory, mathematical modeling of systems, the theory of hidden Markov models. AuthorID: 889130, SPIN: 2766-5222, ORCID: 0000-0002-9785-918. xaevec@mail.ru, 299011, Russian Federation, Sevastopol, st. Lenina, d. 28.*

Fedorenko Sergey Nikolaevich. *Senior Lecturer, Department of Instrument Systems and Automation of Technological Processes, Sevastopol State University. Research interests include automation and mathematical modeling of systems. AuthorID: 930695 SPIN: 4100-2953 ORCID: 0000-0003-3080-7668 sergey.fedor@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 26.08.2022; одобрена после рецензирования 06.10.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 08/26/2022; approved after reviewing 10/06/2022; accepted for publication 11/25/2022.

Математическое моделирование

УДК 681.5
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.006

Антропоцентрический подход к ситуационному управлению симбиотических систем

Данеев Алексей Васильевич, Сизых Виктор Николаевич
Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *daneev@mail.ru*

Аннотация. В статье описывается совместное оценивание и прогнозирование функционального состояния человека-оператора и технической части системы «оператор-технический объект». Методика развивается в обобщенном с человеком варианте, и может быть использована для различных типов технических систем, включая летательные аппараты (ЛА) и другие транспортные системы, как приложение к управлению процессами в симбиотических (т.е. человеко-машинных) комплексов. На информационном уровне реализуется процедура перераспределения функций между оператором и автоматикой по интегральному показателю безопасности прогнозируемого движения объекта, величина которого определяет окончательный выбор режима ситуационного управления. Такой режим является ручным, комбинированным (с участием человека и автоматики одновременно) или автоматическим режимом.

Ключевые слова: антропоцентрический подход, ситуационное управление, симбиотическая система

Цитирование: Данеев А.В. Антропоцентрический подход к ситуационному управлению симбиотических систем / А.В. Данеев, В.Н. Сизых // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 83-94. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.006.

Введение. Создание моделей деятельности оператора (МДО) представляет собой научную проблему, имеющую важное прикладное значение в задаче синтеза структуры человеко-машинной системы (ЧМС), эргономического обеспечения. Достаточно универсальные и эффективные (адекватные) МДО пока не созданы. Это связано со сложностью структуры деятельности человека-оператора, принципиальным отличием природы его мыслительных процессов от вычислительных, не изученностью механизмов интуитивных, подсознательных и других действий человека [1].

В настоящее время существуют и общеприняты три основополагающих подходы к деятельности биотехнических систем: 1) машиноцентрический подход (человек-оператор как звено системы управления); 2) антропоцентрический подход, который предполагает информационный уровень принятия решения (информационную антиэнтропийную систему управления); 3) телецентрический подход (целеполагающий), который предполагает реализацию концепции системной интеграции (объединение ресурсов и целей управления), с давних времен известная под названием супервизорного управления [1].

В основу построения функциональных моделей профессиональной деятельности человека-оператора может быть положено известное высказывание И.М. Сеченова: «Чувствование повсюду имеет значение регулятора движений». В задаче проектирования эргатических (человеко-машинных) интегрированных бортовых комплексов (ИБК) это высказывание можно переформулировать так: «Когда оператор является звеном замкнутой системы «оператор–технический объект», то он выполняет в ней роль регулятора».

Это положение в психологии изучалось с различных точек зрения. С кибернетических и физиологических позиций его рассматривали Н.А. Бернштейн и П.К. Анохин [2], с точки зрения чисто психологической регуляции – М.А. Котик [3], Саймон [4] и Смит [5]. Первое направление исследований получило название бихевиоризм. В рамках этого направления человече-

ское поведение сводится к известной цепочке «стимул – реакция» (П.К. Анохин, Н.А. Бернштейн). П.К. Анохин в 1935 г. установил факт наличия обратной афферентации – сложного, высокоорганизованного вида обратной связи.

1. Неформализованные модели деятельности человека-оператора. Расширенная схема функциональной системы П.К. Анохина, переработанная для процессов, определяющих действия летчика представлена на рис 1.

В рамках машиноцентрического подхода в процессе непрерывного пилотирования летчик в соответствии с требованиями задачи и воспринимаемыми сигналами *e* вырабатывает управляющие воздействия *c*. Действия летчика в таких условиях могут быть представлены динамической системой, описывающей последовательность трех взаимосвязанных процессов [6]: восприятие информации, ее переработку и выработку стратегии действий, отработку управляющих действий по функциональной модели (рис. 2).

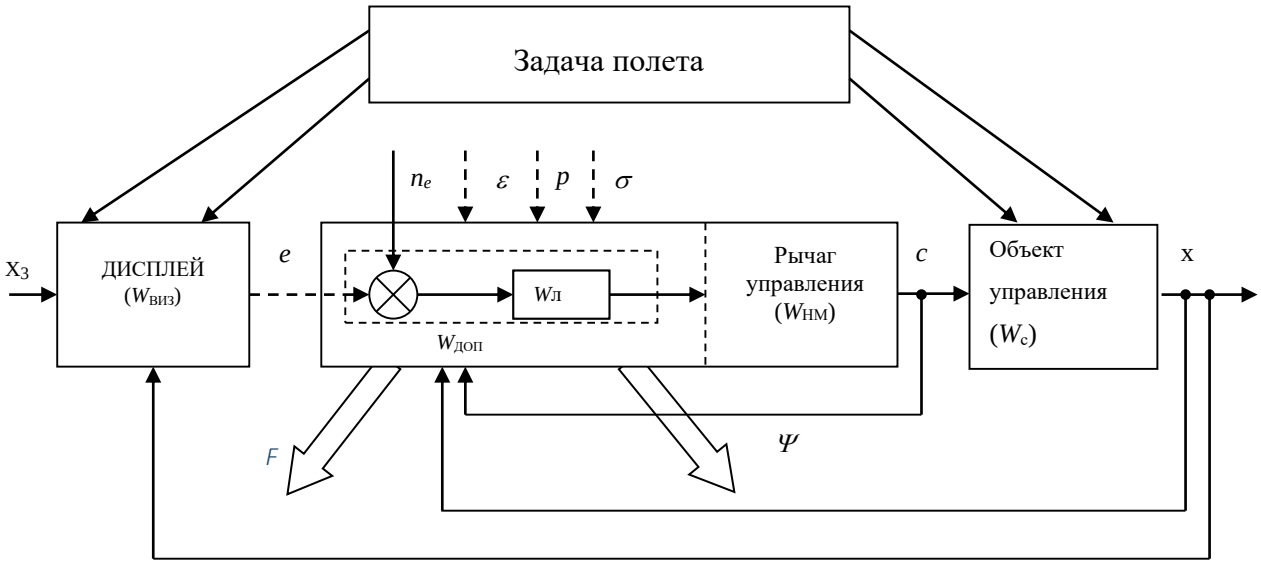


Рис. 1. Структурная схема процессов, определяющих действия летчика

Комментарии: $e = f(x_3, x, t, \Delta t)$ – командный сигнал; $\Delta t > 0$ – прогнозирование, $\Delta t < 0$ – учет переданной информации («глубина пассивной памяти»); x_3, x – входной и выходной сигналы системы «летчик–самолет»; ε – переменные окружающих условий (вибрация, t^0, шум, внешняя освещенность и др.); p – процедурные переменные (программа обучения, порядок представления исследованных вариантов, инструкции); σ – внутренние переменные задачи (усталость, уровень натренированности, мотивация); *F* – показатели физиологической реакции (частота дыхания и пульса, кровяное давление t^0 тела, кожно-гальваническая реакция); Ψ – показатели психофизиологической реакции (субъективные оценки летчиков о процессе выполнения задачи и уровне ее сложности); n_e – сенсорные и моторные шумы

В процессе непрерывного пилотирования летчик в соответствии с требованиями задачи и воспринимаемыми сигналами *e* вырабатывает управляющие воздействия *c* (рис 1). Действия летчика в таких условиях могут быть представлены динамической системой, описывающей последовательность трех взаимосвязанных процессов [6]: восприятие информации, ее переработку и выработку стратегии действий, отработку управляющих действий по функциональной модели (рис. 2). Входным блоком здесь служит афферентный синтез, включающий восприятие входной информации (пусковой афферентации); переработку информации (оценку ситуации и параметров на основе концептуальной модели и мотивации деятельности), выработку стратегии (доминирующей мотивации), формирование образа цели.

Затем следует блок предвидения (опережающего отражения) и принятия решения. За счет предвидения (активизации на значимую задачу [3]) оператор принимает решение на прогнозирование процессов по уровням управления (визуальной обстановки, бортовых систем,

траекторный, пилотажный) через акцептор (приемник) результатов действия по схеме обратной афферентации (с обратной связью через управляющее поле кабины) или через сформированную им программу, не дожидаясь сличения результата выполненного действия с отраженным в акцепторе ожидаемым результатом (без обратной связи).

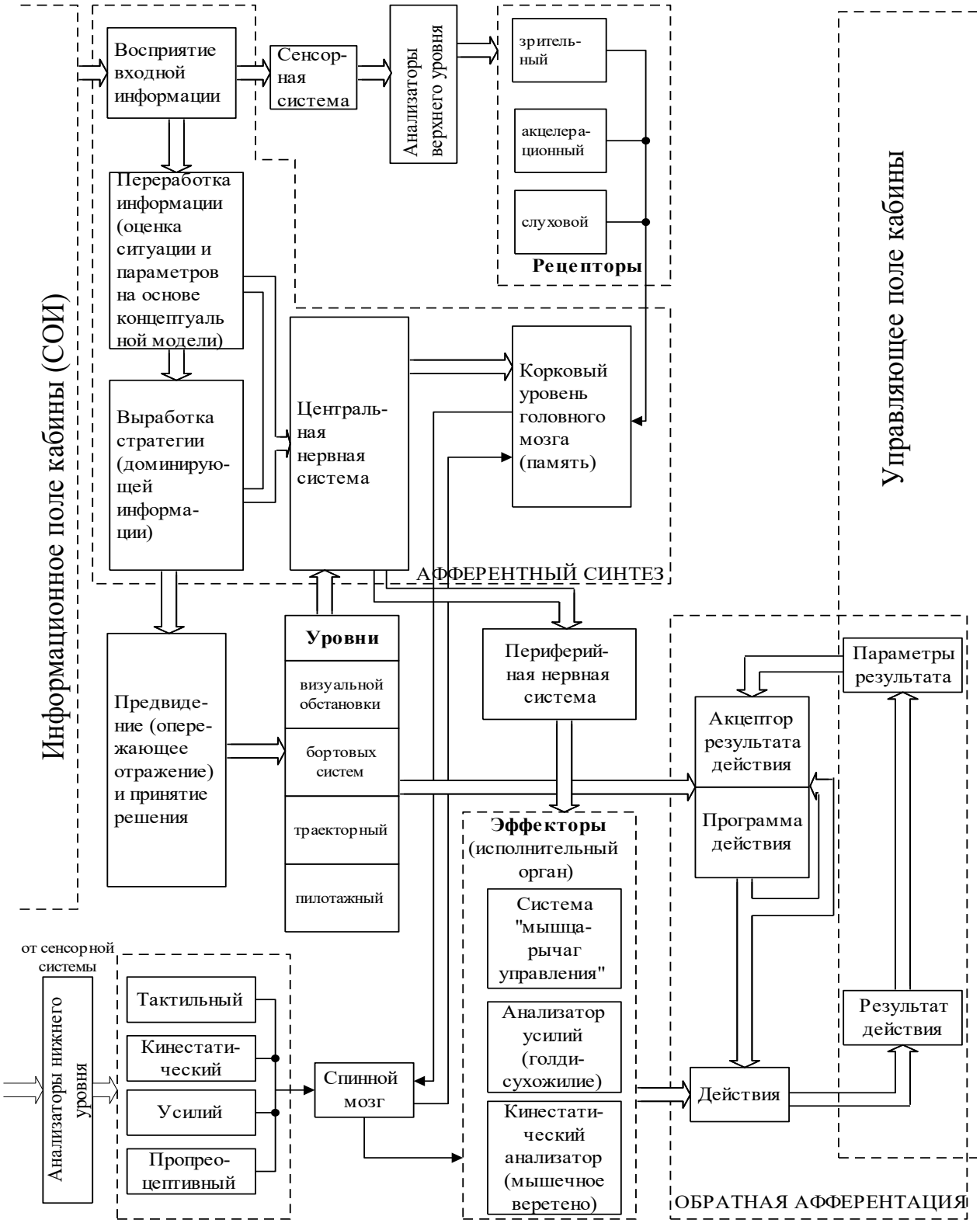


Рис. 2. Функциональная модель деятельности человека-оператора (летчика)

Восприятие информации осуществляется сенсорной системой, состоящей из совокупности анализаторов верхнего (связанных с механизмами действия центральной нервной системы (ЦНС)) и нижнего (от моторной (периферийной) нервномышечной системы) уровней. Каждый

анализатор (у человека имеется около 200 рецепторов) приспособлен к определенному виду информации (зрительный, акселерационный, проприоцептивный и др. анализаторы). Под восприятием понимаются процессы, возникающие в анализаторе от момента воздействия на него стимула (командного сигнала) до поступления стимулов в сенсорные отделы головного мозга. Отработка управляющих команд осуществляется периферийной нервно-мышечной системой через анализаторы нижнего уровня. Проприоцептивный и кинестетический анализаторы одновременно являются эффекторами (исполнительными органами) моторной системы. Процесс обработки стимулов начинается с момента поступления импульсов из моторных отделов головного мозга и заканчивается перемещением конечности вместе с рычагом управления. Центральная нервная система (ЦНС) осуществляет связь сенсорных отделов головного мозга с моторными. При передаче сигнала от одного отдела к другому принятая информация корректируется и вырабатывается стратегия управления (доминирующая мотивация). Между периферийной НС и ЦНС имеется кинестетическая обратная связь.

Таким образом, главными свойствами данной неформализованной функциональной модели оператора являются: доминирующая мотивация и оптимальность, предвидение (прогнозирование), адаптация (саморегуляция).

Второе направление исследований – когнитивная психология – изучает процессы переработки информации человеком-оператором [5]. Деятельность оператора в ЧМС здесь направлена на обеспечение надежности ее функционирования. Основное положение концепции: в самом человеке-операторе, как звене системы управления, действуют механизмы психической саморегуляции, способствующие повышению надежности его управленческой деятельности.

Под надежностью человека-оператора, осуществляющего функциональную оперативную связь между информационным и управляющим полями кабины, понимается его способность в течение заданного времени в условиях окружающей среды (внутрикабинной обстановки и метасреды) сохранять нормальное состояние жизнедеятельности и поддерживать технические параметры и заданные режимы работы систем летательного аппарата (ЛА) в установленных инструкциями пределах. Летчик в системе управления в отдельных случаях более полезное звено, чем технические системы многократного резервирования [7]. По данным американских исследователей [7], надежность работы навигационной системы, управляемой в течение двух недель оператором, оказалась больше ($P_{чмс} \approx 0{,}84$), чем при ее четырехкратном резервировании ($P_{НС} \approx 0{,}78$). Путь повышения надежности технической части системы исчерпал свои возможности и экономически не выгоден (повышение надежности с 0,99 до 0,999 влечет за собой удорожание образцов техники примерно на 30%).

Второй путь повышения надежности связан с принципиально иной стратегией проектирования более эргономически совершенной системы «летчик – ЛА – окружающая среда» через действующие в человеке механизмы саморегуляции его деятельности, т.е. через **функциональное состояние оператора.**

Подходя к человеку-оператору с формальных кибернетических позиций, можно констатировать [2], что в его организме происходит преобразование вещества, энергии и информации. Саморегуляция процессов преобразования вещества (физиологических процессов), вещества и энергии (психофизиологических процессов) описывается функциональной моделью человека-оператора П.К. Анохина (рис. 2).

Единый механизм саморегуляции процессов преобразования информации и энергии (психических процессов) рассмотрим как совокупность отдельных механизмов саморегуляции в сфере информационных и энергетических (эмоциональных процессов). Для этого воспользуемся схемой организации предметного действия в сфере информационных процессов [7], переработанной и соответствующим образом дополненной для биотехнической системы «летчик – ЛА» (рис. 3). На рис. 3 представлена функциональная модель человека-оператора в

сфере информационных процессов и основные элементы, связанные с его управленческой деятельностью: информационное поле кабины (СОИ), окружающая среда, управляющее поле кабины, система поддержки принятия решения (СППР).

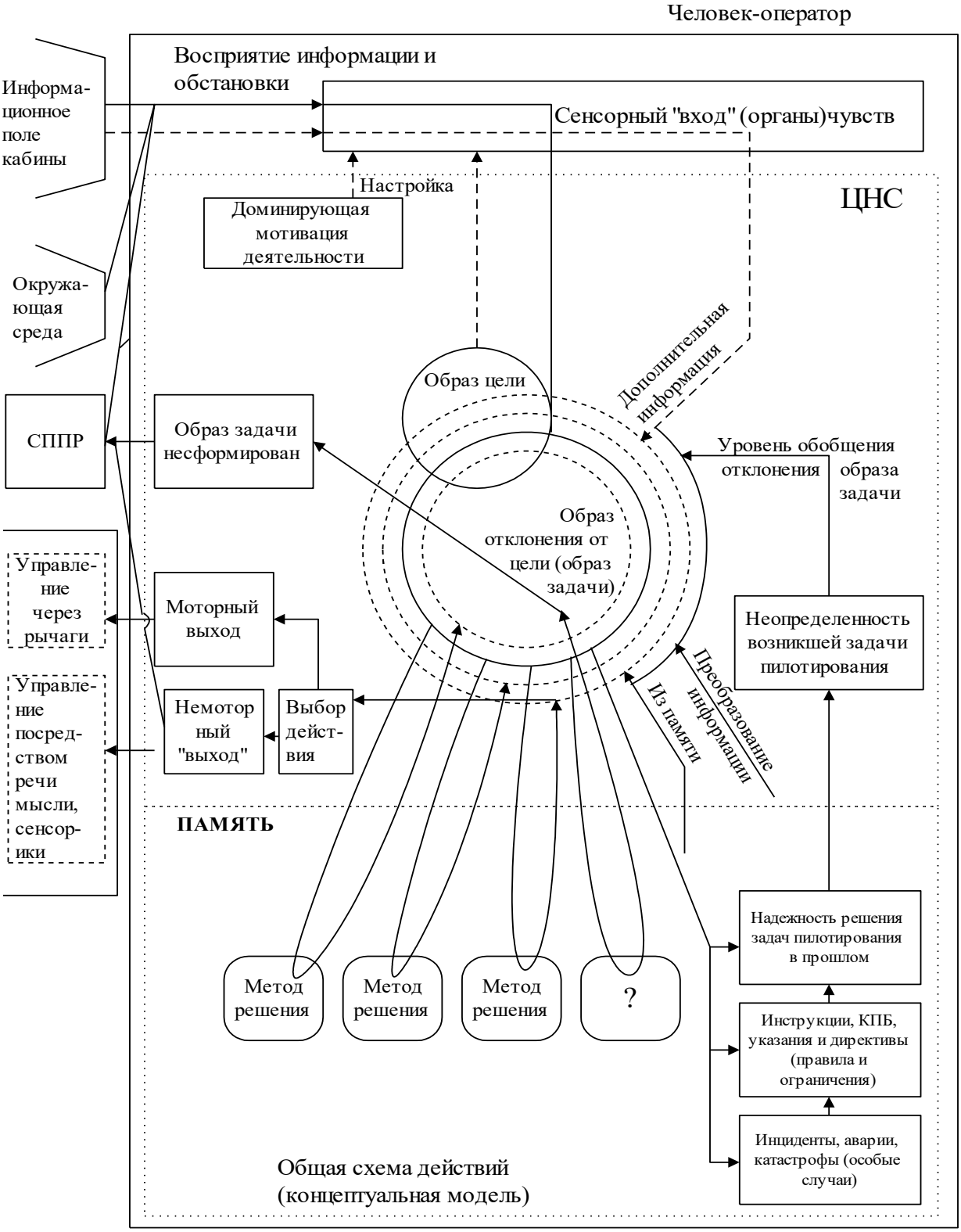


Рис. 3. Функциональная модель человека-оператора в сфере информационных процессов

В блоке «человек-оператор» выделены три главные его подструктуры – органы чувств, ЦНС, моторный и немоторный «выходы». Моторным «выходом» человека-оператора явля-

ются эффекторы (мышцы), немоторным «выходом» – сигналы от биодатчиков сенсорной системы, результаты энцефалографирования, электрокардиографирования, электромиографирования и другие параметры, несущие информацию о функциональном состоянии оператора.

По оценке функционального состояния оператора через немоторный «выход» появляется возможность:

– прямого (через картинные дисплеи) управления системой «летчик – ЛА» (например, посредствам выявления и фиксации фазы принятия решения летчиком по результатам энцефалографирования);
– передачи его функций управления СППР в экстремальных ситуациях (потеря сознания, стрессовые состояния и др.) по результатам обработки информации от биодатчиков и устройств регистрации физиологических процессов. Летчик также может передать функции управления СППР в случае, когда он не успевает сформировать образ задачи, значимой по результату действия и интенсивной по смене информационных процессов.

Действия оператора направлены на достижение заданных целей пилотирования, образ которых актуализируется в его сознании в виде модели «потребного будущего» (Н.А. Бернштейн). Под влиянием этих целей и мотиваций ЦНС летчика и органы чувств настраиваются на восприятие текущей информации о параметрах объекта и на визуальную обстановку. Объединение имеющейся информации о сложившейся ситуации (по П.К. Анохину – сенсорный синтез) осуществляется с учетом прошлого опыта летчика, эмоциональных проявлений, связанных с выполнением подобных действий пилотирования.

Если существующая ситуация не соответствует желаемой цели пилотирования, то в сознании летчика формируется новый образ – образ отклонения от заданной цели (образ задачи). Образ задачи, сложившийся под влиянием потребной цели действия, обстановочной афферентации и мотивации, подсказывает оператору, что нужно ему делать. Началу выполнения действия летчика предшествует выработка в его сознании доминирующей мотивации, формирующейся по значимой внешней информации или завершенному предшествующему действию (по санкционирующей афферентации). Порядок выполнения действия оператора состоит из нескольких этапов преобразования информации:

На первом этапе (этапе идентификации задачи по прошлому опыту) образ возникшей задачи пилотирования в сознании летчика соотносится с представлением о том, насколько надежно в прошлом он решал подобные задачи.

На втором этапе летчик оценивает степень неопределенности (степень сложности для него) данной задачи относительно достижения образа цели, определяет значимость (ответственность, важность, опасность) задачи. Исходя из степени неопределенности задачи, оператор организует информационную базу для поиска ее решения (сбор дополнительных данных о ситуации, преобразование новой информации, извлечение потребной информации из памяти). Для задач с высокой неопределенностью он привлекает больший объем информации и расширяет образ задачи до более высокого уровня обобщения (штриховые окружности на рис. 3). После подготовки информационной базы в памяти оператора, исходя из прошлого опыта, происходит актуализация различных вариантов решения подобных задач и выбора такого, который представляется ему наиболее подходящим для достижения цели пилотирования.

Третий этап – реакция летчика на задачу пилотирования через эффекторы и немоторный «выход». Эта реакция уточняется по каналам обратной связи (через зрительный, тактильный, слуховой, кинестетический и другие анализаторы) по информации о ходе выполнения действия от СОИ.

Итак, сущность саморегуляции в сфере информационных процессов заключается в том, что оператор на основе представлений о собственной надежности оценивает степень неопре-

деленности поставленной задачи. Исходя из этого, он организует информационную базу задачи и доводит обобщение ее образа до такого уровня, который позволяет снять оператору эту неопределенность и найти образ цели.

Значимость поставленной перед оператором задачи имеет эмоциональную окраску. Причиной этого является тот факт, что, начиная выполнять управляющее действие, человек-оператор никогда до конца не может быть уверен в успешности этого действия. В условиях большой значимости поставленной перед летчиком задачи полета у него возникают эмоциональные реакции, проявляющиеся в эндокринных, вегетативных, мышечных и в других процессах [8], порождающие общую энергетическую мобилизацию организма.

В 1965 г. американский психолог Р. Ладарус обратил внимание на психические проявления человека при возникновении угрозы для него и его деятельности. У пилота возникают защитные реакции, направленные на предвосхищение ожидаемой опасности или снижение ее отрицательного воздействия. От возникшей угрозы активизируются различные психические проявления оператора – внимание, восприятие, мышление, память и формируется оперативный образ [7]. Поэтому можно говорить о прогнозном характере деятельности оператора не только в сфере физиологических и информационных процессов, но и в сфере его эмоциональных проявлений. Именно благодаря предвидению будущей ситуации летчик не считывает показания приборов как совершенно новые, а сличает наличие показаний с образованным в сознании оперативным образом (моделью). Следовательно, он не ищет неизвестное событие, а лишь подтверждает наличие предвиденного [9].

Таким образом, механизм саморегуляции оператора в сфере энергетических (эмоциональных) процессов заключается в следующем. В значимой задаче, от решения которой зависит успех деятельности оператора, сложное, опасное и ответственное действие порождает у него эмоции и связанную с ними энергетическую мобилизацию организма. В его организме непроизвольно создается энергетическая готовность нервных структур такого уровня, который адекватен сложности, важности и опасности решаемой задачи.

Из вышеизложенного следует, что системы саморегуляции в сфере физиологических, психофизиологических и психических процессов человека-оператора имеют сходные механизмы, которые нужно рассматривать в непрерывном единстве. Такой подход к описанию природных процессов человека, в котором единый механизм деятельности оператора важнее его составляющих, отражает холистический (целостный) взгляд [10] на концепцию построения биотехнической системы «оператор – технический объект». С этих позиций ИБК как ЧМС представляет собой иерархическую систему, в которой технические компоненты подчинены более высокоорганизованной биологической субстанции – человеку-оператору и находятся в динамической взаимосвязи с ним.

2. Подходы к описанию характеристик управляющих действий оператора. Комплексная оптимизация процессов управления в ИБК ЛА предназначена, прежде всего, для решения наиболее сложных задач, в которых ответственным за выполнение полетного задания остается летчик. Обеспечение активности летчика требует решения проблемы распределения функций в системе управления [11].

Исторически первый сложившийся машиноцентрический подход к построению МДО основан на преобразовании материи и движения по принципу «стимул – реакция» (см. рис. 2). Суть подхода: оператор является регулятором (пассивным звеном управления) замкнутой системы «оператор – технический объект», действующей по определенным законам и описывающей его отдельные характерные свойства и закономерности функционирования ЦНС [6]:

– адаптируемость (от компенсаторного слежения к сопровождению и далее к предвидению);
– прогностичность (опережающее отображение оператором своей деятельности);

– выбор глобального экстремума (способность принятия решения по степени приоритета стимулов);
– оптимальность (способность наилучшим образом выполнить поставленную задачу);
– дискретность восприятия стимулов и их непрерывная (непрерывно-дискретная) отработка через органы управления;
– информационная и временная ограниченность одновременно поступающих командных сигналов;
– существенное влияние на безопасность полета физиологического и психофизиологического состояния летчика и его внутренних переменных (усталость, уровень натренированности, мотивация).

Главный недостаток этого подхода состоит в том, что он отождествляет саморегуляцию психических процессов оператора с регулирующими характеристиками системы «летчик – ЛА» (т.е. машины).

Антропоцентрический подход связан с построением МДО, учитывающих, помимо физиологических и психофизиологических характеристик, психические (информационные и эмоциональные) процессы деятельности оператора (рис. 3). В антропоцентрической системе человек-оператор является активным звеном управления, обеспечивающим надежность и безопасность функционирования замкнутой системы «летчик – ЛА» и комплексно описывающим присущие ему свойства и закономерности функционирования ЦНС. Такой подход отражает холистический взгляд на проектирование ИБК, который заключается во всестороннем учете свойств человека-оператора как равноценной части этого комплекса. При этом характеристикам человека-оператора отдается предпочтение.

Следует отметить, что в настоящее время МДО, в полной мере учитывающие функциональное состояние оператора в антропоцентрической системе, отсутствуют. В связи с этим классификация МДО осуществляется в рамках машиноцентрического подхода:

1) по характеру знаний о свойствах и структуре моделей оператора: математические модели (структура и свойства объекта известны в виде постоянных передаточных функций или уравнений состояния); имитационные модели (модели входных-выходных зависимостей);

2) по назначению: компенсационные модели (оператору предъявляется сигнал невязки между входными и выходными переменными системы); модели слежения (помимо сигнала ошибки оператор наблюдает текущее значение входного сигнала); предсказывающие модели (оператор управляет по сигналу ошибки и развертке входного сигнала в виде функции времени (непрерывного или дискретного через фиксаторы n-го порядка)); прогнозирующие модели (оператор управляет по сигналу ошибки и временным разверткам входного и выходного сигнала);

3) по способу описания характеристик оператора: линейные, нелинейные;

4) по способу оценки выходного сигнала: по спектральной плотности ремнанты (остатку, учитывающему нестационарность и нелинейность линеаризованной МДО); с помощью наблюдателей (типа наблюдателя Люенбергера и фильтра Калмана); через вероятностные распределения;

5) по способу описания процесса восприятия, переработки информации и отработки управляющих воздействий: непрерывные или дискретные;

6) по числу каналов воспринимаемой информации и количеству органов управления: одноканальные и многоканальные; одноконтурные и многоконтурные.

7) моделями импульсной характеристики и корреляционной функции остатка – во временной области.

3. Антропоцентрический подход к ситуационному управлению. Ситуационное управление антропоцентрической системой «человек-оператор – технический объект» в критических ситуациях строится на основе алгоритмов приближенно-оптимального синтеза, реализуемых в нелинейной интегрированной системы автоматического управления (ИСАУ). При формировании алгоритмов ИСАУ используются методы декомпозиции, основанные на неявном разделении движений. Для синергетического подхода [9, 12, 13] характерна естественная декомпозиция процессов управления, которая состоит в поэтапном конструировании законов управления на основе вложенных частных критериев уровней, когда синтез следующего уровня осуществляется с учетом уже синтезированной по своему критерию подсистемы предыдущего этапа. При этом изменяются характеристики некоторых контуров управления.

В качестве примера рассматривается пространственное движение ЛА на основе нелинейной математической модели пространственного движения [14], которое сводится к его разделению на поступательное (траекторный уровень) и вращательное (пилотажный уровень) движения. Это позволяет выделить в пространственном движении ЛА медленные (линейные) и быстрые (угловые) составляющие и раздельно управлять этими составляющими на траекторном и пилотажном уровнях.

Специфика задачи управления здесь будет проявляться в том, что если в качестве управляющих воздействий на траекторном уровне выбрать перегрузки, то действующие возмущения ξ будут компенсироваться через обратную связь по управлению $u = u(t, x, \xi)$. Практическая значимость идеи учета разнотемповости составляющих движения ЛА состоит в разработке методики и алгоритмов последовательной оптимизации. Таким образом, алгоритмическое обеспечение ИСАУ должно быть стратифицированным (многоуровневым) [9, 13, 15].

Сущность стратификации в проблеме создания перспективной системы предупреждения столкновений (СПС) заключается в том, что по мере перехода на более высокие уровни управления и пилотирования должны использоваться более сложные системы принятия решений при менее определенных количественных характеристиках и даже качественных командах. Реализация подобной концепции означает разработку совершенной технологии конструирования высоконадежных иерархических антропоцентрических систем «летчик – ЛА», в которых на нижнем исполнительном уровне должна использоваться система управления пилотажными характеристиками ЛА, работу которой координирует размытый автомат более высокого траекторного (командного) уровня, в свою очередь управляемый лингвистическим автоматом принятия решений верхнего уровня (информационного уровня).

Структурная схема трехуровневой нелинейной ИСАУ приведена на рис. 4. Здесь фигурными стрелками обозначены функциональные связи, характеризующие логику принятия решения (переход на ручное, комбинированное или автоматическое управления). Управляющие воздействия в виде заданных перегрузок из траекторного контура $n_{j\,\text{оп}} = n_{j\,\text{зад}}$ поступают на пилотажный уровень. Заданные перегрузки имеют ограничения на их предельно допустимые значения, в которых интегрально учитываются неконтролируемые внешние возмущения и вклады ряда физиологических параметров. Нечетко заданные функции (функции значимости $\alpha \in [0,\ 1]$) характеризуют взаимосвязи информационного и траекторного уровней. С их помощью, например, в СПС ЛА в воздухе определяются границы предупреждения $\alpha(t_{\text{гр}\,i})$ и траектории прогнозного движения (α_i^*, α_{i+1}^*) на интервалах оптимизации $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. На рис. 4 δ – отклонения рулей ЛА, $t_{\text{гр}i}$ определяется на основе решения вероятностной задачи предупреждения столкновений.

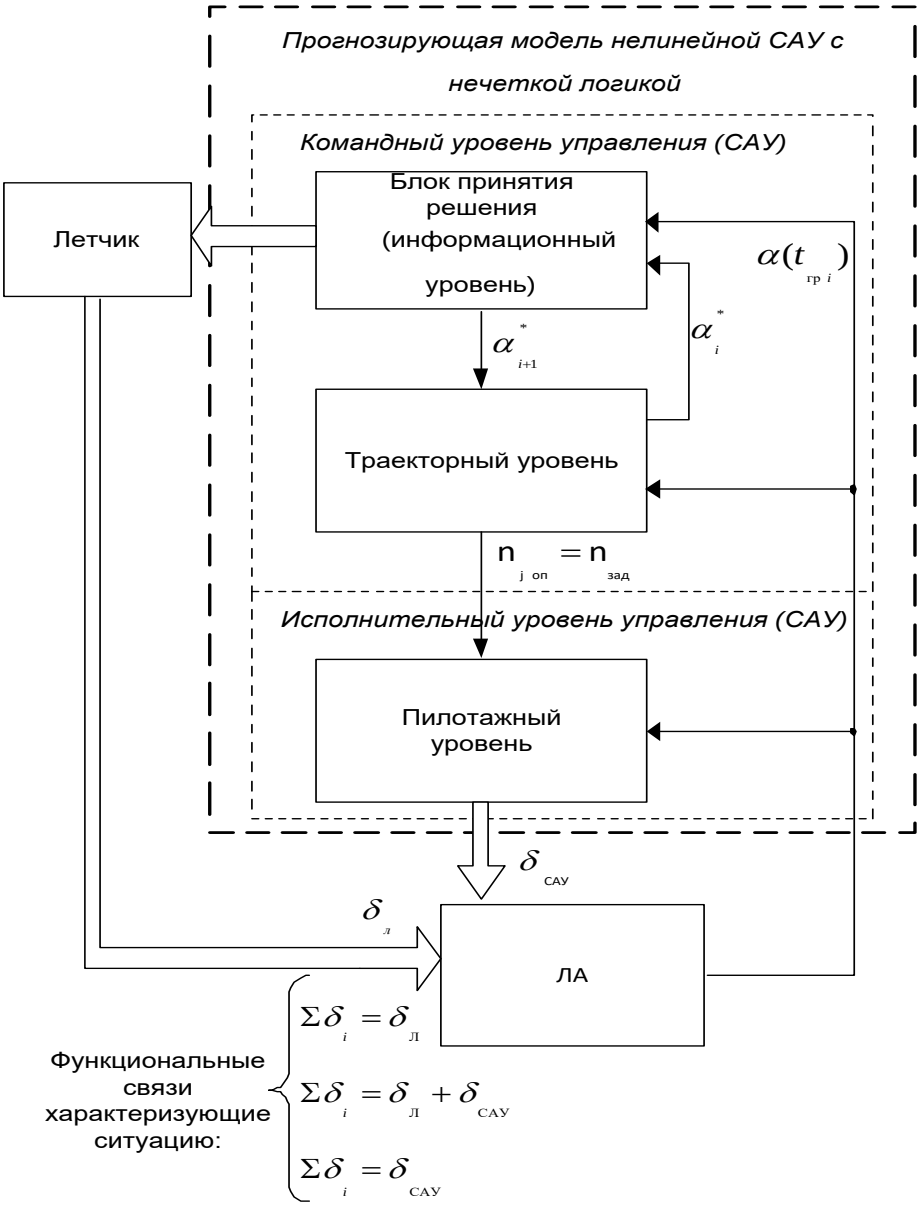


Рис. 4. Структурная схема нелинейной ИСАУ

Заключение. Таким образом, в работе рассмотрена на функциональном уровне задача совместного оценивания состояния человека-оператора и технической части системы. Такой подход может быть использован для исследования различных типов объектов: интегрированные системы бортовых комплексов летательных аппаратов, сложные энергетические системы, включая атомные электростанции и другие области организационно-технического применения. Основной результат работы заключается в том, что возможна реализация процедуры перераспределения функций между оператором и автоматикой по интегральному показателю безопасности прогнозируемого движения объекта [14]. Такой показатель определяет окончательный выбор режима ситуационного управления (ручной, комбинированный или автоматический режимы).

Список источников

1. Буков В.Н. Новое развитие человеко-машинных контуров управления применительно к задачам слежения / В.Н. Буков, В.С. Кулабухов, В.Н. Сизых // Состояние и новые пути решения проблемы астероидной опасности, 1997. – С. 68-79.
2. Nordwall B. Flight Tests Highlight New GPS Uses, Emphasize Need for GPS/GLONASS Systems. Aviation Week, 2/X11 1991, vol. 135, no. 22, pp. 71-74.
3. Красовский А.А. Определение относительных координат радиоизлучающих объектов в пространстве интерферационным методом / А.А. Красовский // Изв. РАН. Теория и системы управления, 1997. – № 3.

4. Красовский А.А. Интерферометрическая радиопеленгация как пассивная радиолокация / А.А. Красовский, А.И. Наумов // Изв. РАН. Теория и системы управления, 1997. – №6. – С. 5-14.
5. Красовский А.А. Пассивная макроволновая радиолокация, мониторинг, навигация и резервное управление воздушным движением / А.А. Красовский // Изв. РАН. Теория и системы управления, 1998. – №3. – С. 156-163.
6. Красовский А.А. Скрытный централизованный контроль транспортной системы страны, сокращение потерь от природных техногенных катастроф и безопасность / А.А. Красовский // Доклад на бюро отделения ПММПУ, 1999.
7. Красовский А.А. Алгоритмическое обеспечение пассивных интерферометрических комплексов радиолокации / А.А. Красовский, В.Н. Сизых // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2000. – №2. – С. 109-119.
8. Kuchar J.K. Methodology for Alerting-System Performance Evaluation. J. of Guidance, Control, and Dynamics, vol.19, no. 2, 1996.
9. Красовский А.А. Неклассические функционалы и проблемы теории оптимального управления / А.А. Красовский // Изв. РАН. Техническая кибернетика,1992. – №1. – С. 3-41.
10. Красовский А.А. Развитие концепции, аналитическая теория, алгоритмическое обеспечение двухконтурного самоорганизующегося регулятора / А.А. Красовский // Автоматика и телемеханика, 1999. – №7.
11. Буков В.Н. Оптимизация человеко-машинных систем на основе прогнозирования функционального состояния оператора / В.Н. Буков // Автоматика и телемеханика, 1995. - №12. - С.124-137.
12. Колесников А. А. Синергетическая теория управления / А. А. Колесников // Таганрог: ТРТУ. – М: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
13. Красовский А. А. Избранные труды. Теоретическая и прикладная теория управления / А.А. Красовский // М.: Мысль, 2001. – 389 с.
14. Данеев А.В., Сизых В.Н. Методология проектирования алгоритмического обеспечения интегрированных систем управления авиационными транспортными средствами на основе уравнений нелинейной динамики / А.В. Данеев, В.Н. Сизых // Новосибирск: Наука, 2020. – 182 с.
15. Красовский А.А. Иерархическая оптимизация управления полетом / А.А. Красовский, В.Н. Буков // Вопросы кибернетики. – М.: Наука, 1988. – вып. 139. – С. 4-18.

Данеев Алексей Васильевич. *Д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, AuthorID: 2472, SPIN: 9197-6529, ORCID: 0000-0003-4288-824X, daneev@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.*

Сизых Виктор Николаевич. *Д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, AutorID: 518372, SPIN: 9999-9271, ORCID: 0000-0002-5982-8983, sizykh_vn@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.*

UDC 681.5
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.006

Anthropocentric approach to situational control of symbiotic systems

Alexey V. Daneev, Victor N. Sizykh
Irkutsk State Transport University,
Russia, Irkutsk, *daneev@mail.ru*

Abstract. The article describes the joint assessment and prediction of the functional state of the human operator and the technical part of the system "operator-technical object". The technique is being developed in a generalized version with a human, and can be used for various types of technical systems, including aircraft (LA) and other transport systems, as an application to process control in symbiotic (man-machine) complexes. At the information level, the procedure for redistributing functions between the operator and automation is implemented according to the integral indicator of the safety of the predicted movement of the object, the value of which determines the final choice of the situational control mode (manual, combined or automatic modes).

Keywords: anthropocentric approach, situational management, symbiotic system

References

1. Bukov V.N., Kulabukhov V.S., Sizykh V.N. Novoye razvitiye cheloveko-mashinnykh kontu-rov upravleniya primenitel′no k zadacham slezheniya [New development of human-machine control loops in relation to tracking

tasks]. Sostoyaniye i novyye puti resheniya problemy asteroidnoy opasnosti [Status and new ways of solving the problem of asteroid hazard], 1997, pp. 68-79.
2. Nordwall B. Flight Tests Highlight New GPS Uses, Emphasize Need for GPS/GLONASS Systems. Aviation Week, 2/X11 1991, vol. 135, no. 22, pp. 71-74.
3. Krasovskiy A.A. Opredeleniye otnositel′nykh koordinat radioizluchayushchikh ob″yektov v prostranstve interferatsionnym metodom [Determination of the relative coordinates of radio-emitting objects in space by the interference method]. Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Izv. RAN. Theory and control systems], 1997, no. 3.
4. Krasovskiy A.A., Naumov A.I. Interferometricheskaya radiopelengatsiya kak passiv-naya radiolokatsiya [Interferometric direction finding as a passive radar]. Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Izv. RAN. Theory and control systems], 1997, no. 6, pp. 5-14.
5. Krasovskiy A.A. Passivnaya makrovolnovaya radiolokatsiya, monitoring, navigatsiya i rezervnoye upravleniye vozdushnym dvizheniyem [Passive macrowave radar, monitoring, navigation and backup air traffic control]. Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Izv. RAN. Theory and control systems], 1998, no. 3, pp. 156-163.
6. Krasovskiy A.A. Skrytnyy tsentralizovannyy kontrol′ transportnoy sistemy strany, sokrashcheniye poter′ ot prirodnykh tekhnogennykh katastrof i bezopasnost′ [Covert centralized control of the country's transport system, reduction of losses from natural man-made disasters and safety]. Doklad na byuro otdeleniya PMMPU, 1999.
7. Krasovskiy A.A., Sizykh V.N. Algoritmicheskoye obespecheniye passivnykh interfero-metricheskikh kompleksov radiolokatsii. Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya, 2000, no.2, pp. 109-119.
8. Kuchar J.K. Methodology for alerting-system performance evaluation. J. of guidance, control, and dynamics, vol. 19, no. 2, 1996.
9. Krasovskiy A.A. Neklassicheskiye funktsionaly i problemy teorii optimal′nogo upravleniya [Nonclassical functionals and problems of optimal control theory]. Izv. RAN. Tekhnicheskaya kibernetika [Izv. RAN. Technical cybernetics], 1992, no. 1, pp. 3-41.
10. Krasovskiy A.A. Razvitiye kontseptsii, analiticheskaya teoriya, algoritmicheskoye obespecheniye dvukhkonturnogo samoorganizuyushchegosya regulyatora [Development of the concept, analytical theory, algorithmic support for a two-loop self-organizing controller]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and Telemechanics], 1999, no. 7.
11. Bukov V.N. Optimizatsiya cheloveko-mashinnykh sistem na osnove prognozirovaniya funktsional′nogo sostoyaniya operatora [Optimization of human-machine systems based on forecasting the functional state of the operator] Avtomatika i telemekhanika [Automation and Telemechanics], 1995, no. 12, pp. 124-137.
12. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic theory of management], Taganrog, TRTU; M., Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1994, 344 p.
13. Krasovskiy A.A. Izbrannyye trudy. Teoreticheskaya i prikladnaya teoriya upravleniya [Selected Works. Theoretical and applied control theory], M., Mysl′ [Though], 2001, 389 p.
14. Daneyev A.V., Sizykh V.N. Metodologiya proyektirovaniya algoritmicheskogo obespe-cheniya integrirovannykh sistem upravleniya aviatsionnymi transportnymi sredstvami na osnove uravneniy nelineynoy dinamiki [Methodology for designing algorithmic support for integrated control systems for aviation vehicles based on equations of nonlinear dynamics], Novosibirsk, Nauka [Science], 2020, 182 p.
15. Krasovskiy A.A. Iyerarkhicheskaya optimizatsiya upravleniya poletom [Hierarchical optimization of flight control], Voprosy kibernetiki [Questions of Cybernetics], M., Nauka [Science], 1988, iss. 139, pp. 4-18.

Daneev Aleksey Vasilyevich. *Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Information Systems and Information Security", Irkutsk State Transport University, AuthorID: 2472, SPIN: 9197-6529, ORCID: 0000-0003-4288-824X, daneev@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.*

Sizykh Viktor Nikolaevich. *Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Automation of Production Processes", Irkutsk State Transport University, AutorID: 518372, SPIN: 9999-9271, ORCID: 0000-0002-5982-8983, sizykh_vn@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.*

Статья поступила в редакцию 14.08.2022; одобрена после рецензирования 27.10.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 08/14/2022; approved after reviewing 10/27/2022; accepted for publication 11/25/2022.

УДК 004.923
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.007

Проблемы бесконтактной регистрации потоков в гидродинамической трубе

Новиков Михаил Михайлович[1], Ипполитов Евгений Викторович[1], Камаев Сергей Валентинович[1], Марков Михаил Александрович[1], Князь Владимир Александрович[2], Степаньянц Дмитрий Георгиевич[2]

[1]Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, Россия, Шатура, *novikov@rambler.ru*

[2]Федеральное государственное унитарное предприятие «ГосНИИ авиационных систем», Россия, Москва

Аннотация. Гидродинамическая труба является одним из эффективных инструментов для изучения процесса обтекания крыла в аэродинамике и гидродинамике, позволяющих изучать характеристики потока в контролируемых условиях и моделировать условия, которые не могут быть изучены в реальном полете. Методы визуализации потока, такие, как цветные струи или мелкие частицы, позволяют получать качественные данные о поведении потока, являясь ценным средством для понимания особенностей течения. В то же время более интересно иметь количественные характеристики потока, позволяющие прогнозировать развитие процессов обтекания и разрабатывать рекомендации для повышения безопасности. Представленное исследование направлено на разработку системы бесконтактных трехмерных измерений в гидродинамической трубе на основе фотограмметрических методов. Предложена оригинальная модель визуализации, учитывающая эффекты преломления в случае нескольких оптических сред (воздух-стекло-жидкость), которая обеспечивает пространственную точность измерений. Эта модель реализована в экспериментальной фотограмметрической системе, оценка точности приводится как для калибровки системы, так и для измерения аэродинамической модели. Разработанная методика калибровки фотограмметрической системы продемонстрировала применимость ее для задачи трехмерных измерений в гидродинамической трубе.

Ключевые слова: трехмерные измерения, трехмерная калибровка, преломление, оптическая среда, фотограмметрия

Цитирование: Новиков М.М. Проблемы бесконтактной регистрации потоков в гидродинамической трубе / М.М. Новиков, Е.В. Ипполитов, С.В. Камаев, М.А. Марков, В.А. Князь, Д.Г. Степаньянц // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 95-107. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.007.

Введение. Безопасность полетов является одним из наиболее важных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации воздушного судна. Очень опасно и в большинстве случаев невозможно изучать характеристики самолета в реальных критических условиях полета, поэтому для анализа поведения потока обычно используется физическое моделирование в аэродинамических или гидродинамических трубах. Адекватность такого моделирования обеспечивается сходством моделируемого процесса с реальным. Концепция подобия позволяет распространить результаты модельных экспериментов на реальный процесс, если они оба имеют геометрическое, кинематическое и динамическое сходство. В аэродинамике набор безразмерных величин, таких, как число Маха, число Рейнольдса, число Прандтля, используется для установления сходства модели и реального процесса течения. Гидродинамическая труба является одним из эффективных средств для изучения процессов обтекания летательных аппаратов в аэродинамике [1]. Она позволяет моделировать особые условия и изучать характеристики потока обтекания, которые не могут быть исследованы в реальном полете (рис. 1).

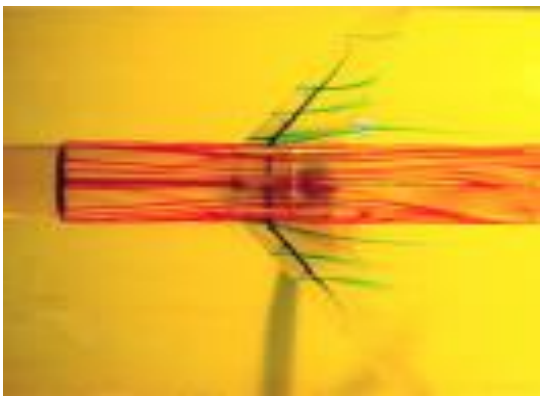


Рис. 1. Визуализация потока обтекания с помощью краски в гидродинамической трубе (стереолитографическая модель с внутренними каналами)

Для проведения бесконтактных трёхмерных измерений в гидродинамических трубах фотограмметрическими методами требуется уточнение стандартной модели формирования изображения в съёмочной камере, учитывающее эффект преломления лучей на границах оптических сред, а именно, на границе воздух – стекло и стекло – рабочая жидкость. В статье представлена модель формирования изображения для случая съёмки в рабочем пространстве, включающем различные оптические среды, и методика калибровки оптической системы для проведения трёхмерных измерений координат объектов сцены с учётом имеющихся границ оптических сред.

Оптические 3D-измерения, основанные на обработке изображений объекта, получают все большее распространение в связи с совершенствованием технических средств получения изображений и значительным прогрессом в методах их обработки. В то же время диапазон применений также расширяется, включая приложения, требующие измерений в рабочей области, включающей несколько оптических сред, что влияет на процесс формирования изображения измеряемого объекта [2].

Большинство применений, требующих учета эффектов преломления света при оптических измерениях, относятся к подводным исследованиям, таким, как мониторинг подводных объектов по производству энергии, подводный мониторинг корпусов судов [3], картирование рельефа морского дна и 3D-реконструкция сложных подводных сооружений [4, 5].

Необходимым условием обеспечения точности измерений фотограмметрическими методами является калибровка системы сбора данных, которая позволяет достоверно оценивать параметры, учитывающие геометрические искажения при формировании изображения. Методы калибровки фотограмметрических систем, как видимого [6, 7], так и теплового диапазонов, разработанные для трехмерных измерений в однородной оптической среде, сегодня позволяют обеспечивать высокую точность трехмерных измерений, достигающую 1/100000 измерительного рабочего пространства. Для обеспечения высокой точности оптических измерений в случае границ оптических сред разрабатываются различные методы и подходы для компенсации или учета влияния геометрических искажений, вызванных эффектами преломления [8, 9].

Ряд подходов для компенсации эффектов преломления используют тот факт, что они исчезают, если свет проходит через границу среды под углом 90°, и заключаются в использовании дополнительных оптических элементов для минимизации или устранения эффектов преломления. В случае анализа потока жидкости с использованием методов стереоскопических измерений скорости частиц (PIV – particle image velocimetry) применение призм является распространенным решением для предотвращения оптических аберраций [10]. При использовании призмы оптические лучи проходят через границу раздела под углом 90°, что практически исключает эффекты преломления.

Другим подходом, обеспечивающим необходимую точность оптических измерений, является калибровка оптической системы, которая позволяет учитывать влияние преломления и компенсировать вызванные им искажения.

Оценка погрешности, вносимой в оптические мультимедийные 3D-измерения без учета рефракции, позволила предложить методологию реализации в современном фотограмметрическом рабочем процессе, основанном на методах «структура по движению» и «стерео с несколькими видами» [11]. Предлагаемый подход к коррекции рефракции применяется на уровне фотографии, что позволяет реализовать его в рамках существующих технологий. Результаты, полученные для двух тестовых площадок по сравнению с эталонными данными, продемонстрировали, что предложенный алгоритм может уменьшить ошибки, вызванные рефракцией, в два раза, независимо от глубины.

Существенно распространенным методом является включение («поглощающих») эффектов преломления в физические калибровочные параметры камеры [12]. Этот метод обеспечивает довольно хорошее описание модели искажения для случая, когда оптическая ось камеры приблизительно перпендикулярна плоскости или куполообразному отверстию камеры, а основной эффект преломления через границу раздела радиально симметричен относительно основной точки. Недостатком этого метода «поглощения эффектов преломления» является то, что всегда существуют некоторые систематические ошибки, которые не учитываются в модели. Эффект преломления делает недействительным предположение об едином центре проекции для камеры [8, 13], которое является основой для этой модели.

Альтернативные подходы предлагают решения для геометрической коррекции путем введения виртуального проекционного центра [14] или двухэтапной коррекции [15], включающей первоначальную стандартную калибровку в воздухе с последующим введением дополнительных параметров, описывающих эффекты преломления на границах оптических сред.

1. Модели визуализации.

1.1. Стандартная модель формирования изображения (одна оптическая среда).

Для случая одиночных оптических сред моделью изображения являются уравнения нелинейности:

$$x_a - x_p = -\mu R \cdot (X_A - X_c) \tag{1}$$

которые выражают связь между точкой **A** объекта и соответствующей точкой **a** в плоскости изображения с предположением, что изображение формируется лучом, проходящим через центр проекции **C** (рис. 2).

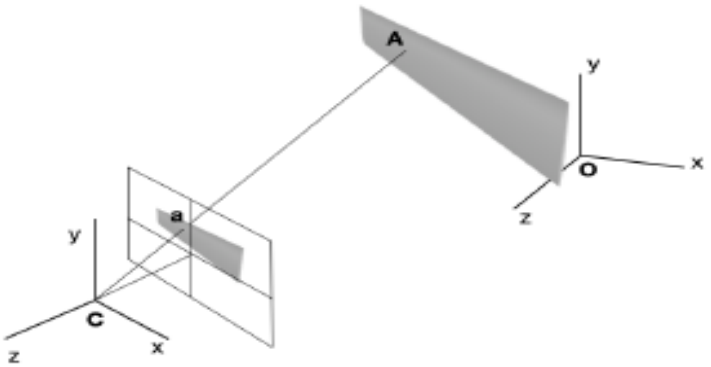


Рис. 2. Путь светового луча через одну оптическую среду (стандартный случай)

В уравнении 1 координаты $X_A = (X_A, Y_A, Z_A)^T$ точки сцены **A** и координаты $X_c = (X_C, Y_C, Z_C)^T$ центра проекции **C** заданы в объектной системе координат OXYZ. Координаты $x_a = (x_a, y_a, -c)^T$ точки изображения **a** и координаты $x_p = (x_p, y_p, -c)^T$ главной точки **p** заданы

в системе координат изображения $\mathbf{C_{xyz}}$ (рис. 2). Матрица **R** определяет преобразование координат из объектной системы координат OXYZ в систему координат изображения $\mathbf{C_{xyz}}$, и **μ** - масштабный коэффициент. Уравнение 1 представляет собой идеальную модель визуализации, основанную на геометрической оптике. Получение реального изображения подвержено искажениям, которые должны быть определены и компенсированы для точного 3D-измерения. Для моделирования геометрических искажений в уравнения коллинеарности добавляются дополнительные члены Δ**x** и Δ**y**. Затем действительные (искаженные) координаты $\tilde{x}, \tilde{y}$ точки на изображении определяются как:

$$\tilde{x} = x + \Delta x \tag{2}$$

$$\tilde{y} = y + \Delta y \tag{3}$$

Практика фотограмметрических измерений доказала, что хорошим описанием нелинейных искажений является модель Брауна-Конради [16]. Для текущего исследования используется в следующей форме [17]:

$$\Delta x = a_0 y + x(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6) + a_4(r^2 + 2x^2) + 2a_5 xy \tag{4}$$

$$\Delta y = a_0 x + y(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6) + a_5(r^2 + 2y^2) + 2a_4 xy \tag{5}$$

где $r^2 = x^2 + y^2$.

Здесь

x, y – координаты точки a на изображении,

a_0, ..., a_5 – параметры внутренней ориентации камеры:

a_0 – коэффициент аффинных искажений;

a_1, a_2, a_3 – коэффициенты радиальных искажений;

a_4, a_5 – коэффициенты тангенциальных искажений.

Параметры нелинейных искажений должны быть определены в результате процедуры калибровки.

Модель формирования изображения для двух и более оптических сред. Для оптических 3D-измерений объекта, расположенного в гидродинамической трубе, луч света из точки объекта **A** в соответствующую точку изображения **a** проходит через две границы разных оптических сред, которые изменяют направление луча, и уравнение 1 становится недействительным.

На рис. 3 представлен путь от точки объекта **A** до плоскости изображения для луча, который формирует точку изображения **a**. Преломление света на границе раздела жидкость-стекло и на границе раздела стекло-воздух разбивает луч на три вектора: $\mathbf{r^1}$ для воздуха, $\mathbf{r^2}$ для стекла и $\mathbf{r^3}$ для жидкости.

Для вектора $\mathbf{r^1}$ с координатами изображения $\mathbf{(x, y, -c)^T}$ его координаты в системе координат объекта $(X_1, Y_1, Z_1)^T$ определяются как:

$$r^1 = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = R^T \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} \tag{6}$$

Положение стеклянного окна гидродинамического туннеля определяется системой координат Ω $X_gY_gZ_g$, которая имеет начало координат в точке **Ω**. Оси $\mathbf{X_g}$ и $\mathbf{Y_g}$ находятся в плоскости поверхности стекла, а ось $\mathbf{Z_g}$ перпендикулярна. Положение системы координат стекла в системе координат объекта определяется координатами начальной точки **Ω** и матрицей вращения $\mathbf{R_g}$ (рис. 3).

Чтобы установить связь между точкой объекта **A** и его изображением **a**, необходимо определить векторы $\mathbf{r_1}$, $\mathbf{r_2}$, $\mathbf{r_3}$. Вектор $\mathbf{r_1}$ берет свое начало в центре проекции **C**. В системе координат Ω $X_gY_gZ_g$ вектор $\mathbf{r_1}$ определяется уравнениями (7), (8):

$$C_g = R_g \cdot (C - \Omega) \tag{7}$$

$$r_g^1 = R_g \cdot r^1 \tag{8}$$

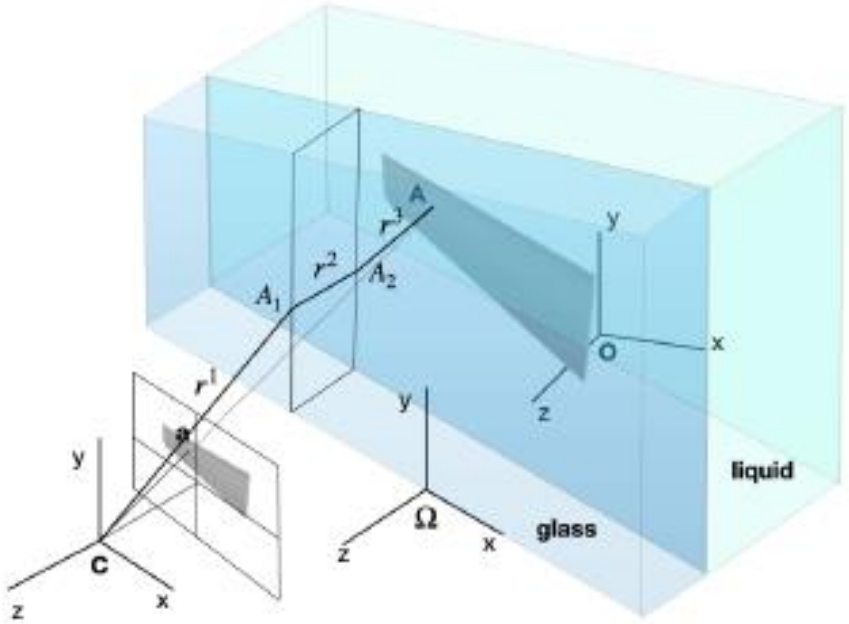


Рис. 3. Траектория светового луча для случая двух нескольких оптических сред

Местоположение точки **A₁** в системе координат Ω $X_gY_gZ_g$ определяется с использованием условия $\mathbf{Z_{gA1} = 0}$:

$$A_{1_g} = C_g - \frac{Z_{gC}}{Z_{ga}} \cdot r_g^1 \tag{9}$$

Направление вектора $\mathbf{r^2}$ определяется с использованием закона Снелла:

$$r^2 = \begin{pmatrix} r_x^2 \\ r_y^2 \\ r_z^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x^1 \cdot tg(\varphi_2) \\ r_y^1 \cdot tg(\varphi_2) \\ r_z^1 \end{pmatrix}, sin(\varphi_2) = \frac{1}{n_1} \cdot sin(\varphi_1) \tag{10}$$

где $\mathbf{n_1}$ - коэффициент преломления на границе раздела воздух-стекло, $\boldsymbol{\varphi_1}$ - угол наклона луча $\mathbf{r^1}$, $\boldsymbol{\varphi_2}$ -угол преломления.

Началом координат вектора $\mathbf{r^3}$ является точка $\mathbf{A_2}$, которую можно найти как:

$$A_{2_g} = A_{1_g} + r_g^2 \tag{11}$$

И направление вектора $\mathbf{r^3}$ определяется аналогичным образом:

$$r^3 = \begin{pmatrix} r_x^3 \\ r_y^3 \\ r_z^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x^2 \cdot tg(\varphi_3) \\ r_y^2 \cdot tg(\varphi_3) \\ r_z^2 \end{pmatrix}, sin(\varphi_3) = \frac{n_2}{n_1} \cdot sin(\varphi_2) \tag{12}$$

где $\mathbf{n_2}$ - коэффициент преломления на границе раздела стекло-жидкость, $\boldsymbol{\varphi_2}$ - угол наклона луча $\mathbf{r^2}$, $\boldsymbol{\varphi_3}$ -угол преломления.

Преобразование из системы координат Ω $X_gY_gZ_g$ в систему координат объекта задается формулой:

$$A_2 = R_g^T \times A_{g_2} \tag{13}$$

$$r^2 = R_g^T \times r_g^2 \tag{14}$$

Уравнения (6) – (14) дают соотношение между любой точкой изображения **a** и лучом света $\mathbf{r^2}$ в жидкости, который образует эту точку изображения. Являясь своего рода аналогом уравнения нелинейности (уравнение 1), они могут быть использованы для калибровки камеры и определения трехмерных координат объекта.

2. Экспериментальная установка.

2.1. Гидродинамическая труба. Разработанная методика и оптическая 3D-измерительная система предназначены для регистрации потока и 3D-измерений в гидродинамической трубе ГТД-400 Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). Гидродинамическая труба ГТД-400 имеет площадь поперечного сечения 400 × 400 мм и обеспечивает скорость потока от 20 мм/с до 100 мм/с. Большая емкость с рабочей жидкостью, расположенная над рабочей частью трубы, создает поток за счет силы тяжести. Для обеспечения заданных характеристик потока передача жидкости из контейнера в рабочую часть осуществляется через специальный конфузор (участок проточного канала (трубы) в виде усеченной пирамиды или усеченного конуса) и соты в начале рабочей части. Адекватность моделирования поведения потока обеспечивается поддержанием критериев подобия для моделируемых и реальных потоков. Возможность применения цветных струй для визуализации потока и низкие скорости потока являются заметными преимуществами гидродинамической трубы. Испытания в гидротрубе ГТД-400 ЦАГИ проводятся с целью выявления особенностей физики обтекания компоновки путем вывода красителя на поверхность модели в зонах вихреобразования (наплывы, изломы передней кромки, ПГО, концевая часть крыла) при обтекании модели потоком жидкости. При этом происходит визуализация областей образования вихревых жгутов и положения точки взрыва вихря при больших углах атаки, определяются области отрыва потока, оценивается возможность попадания вихревых жгутов в воздухозаборники двигателей. С учетом размеров рабочей части ГТД-400 разработанная оптическая 3D-измерительная система рассчитана на рабочее пространство
300 × 300 × 300 мм.

2.2. Лабораторная установка. Экспериментальная установка для оценки разработанных алгоритмов калибровки системы и 3D-измерений в разных оптических средах состоит из фотограмметрической системы ”Mosca”22 и резервуара для воды, размещенного в рабочем пространстве оптической измерительной системы.

Фотограмметрическая 3D-измерительная система включает в себя две камеры DMK 37BUX273 с КМОП-сенсором Sony IMX273LLR и проектор структурированного света, установленный на жесткой платформе, обеспечивающий стабильную ориентацию снаружи (рис. 4). Основные характеристики камеры DMK 37BUX273 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Спецификация камеры DMK 37BUX273

Parameter	Value
Sensor type	CMOS Pregius
Format	1/2.9”
Dynamic range	10 bit
Resolution	1440 X 1080
Pixel size	3.45 µm X 3.4 µm
Frame rat e	up to 238 fps
Shutter	1µs to 30 s
Lens	6 mm

Экспериментальная установка на этапе калибровки показана на рис. 4.

Для выполнения оценки точности измерений разработанные алгоритмы были внедрены в оригинальное программное обеспечение оптической измерительной системы «Mosca», служащее базовым программным обеспечением для задач 3D-сканирования и захвата движения [18, 19].

а б

Рис. 4. Экспериментальная установка: (а) получение изображения одна оптическая среда (б) получение изображения для нескольких оптических сред

2.3. Метод калибровки. Калибровка, как процесс определения неизвестных параметров модели изображения, является необходимой процедурой для обеспечения необходимой точности оптических измерений. Широко используемый подход к калибровке заключается в использовании набора изображений специального тестового поля с известными 3D-координатами некоторых опорных точек. Затем неизвестные параметры модели оцениваются с использованием координат изображения опорных точек в качестве наблюдений.

Оригинальная методика калибровки [20] была применена для определения параметров внутренней ориентации оптической 3D-измерительной системы. Методика основана на отображении плоского тестового поля, отмеченного специальными кодированными мишенями [21], что обеспечивает высокую степень автоматизации процесса калибровки.

Для калибровки был получен набор стереопар изображений для различного пространственного и углового положения тестового поля, так что каждая контрольная точка появилась в другом месте в рабочем пространстве.

Для калибровки одной среды вектор оценочных параметров $\boldsymbol{v^{sm}} = \{\boldsymbol{v_{io}^{sm}}, \boldsymbol{v_{eo}^{sm}}\}$ состоит из: параметров внутренней ориентации $v_{io}^{sm} = \left(m_x, m_y, b_x, b_y, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\right)^T$ и параметров внешней ориентации $v_{eo}^{sm} = (X_c, Y_c, Z_c, \alpha, \omega, k)^T$. Координаты опорных точек были приняты как известные, определенные предварительным независимым точным измерением.

Для мультимедийной калибровки вектор оценочных параметров

$$v^{mm} = \left\{v_{io}^{mm}, v_{eo}^{mm}, v_{gs}^{mm}\right\} \text{ включает:}$$

параметры внутренней ориентации $v_{io}^{mm} = \left(m_x, m_y, b_x, b_y, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\right)^T$,
параметры внешней ориентации $v_{eo}^{mm} = (X_c, Y_c, Z_c, \alpha, \omega, k)^T$ и параметры, определяющие положение стеклянной системы координат $v_{gs}^{mm} = (X_\Omega, Y_\Omega, Z_\Omega, \alpha_\Omega, \omega_\Omega, k_\Omega)^T$.

3. Результаты и обсуждение. Чтобы оценить точность разработанной методики калибровки, процедура калибровки была выполнена для одного оптического носителя и для мультимедийной оптической среды с использованием одного и того же тестового поля. Набор из 18 стереопар изображений был использован для калибровки как для случая с одним оптическим носителем, так и для случая с несколькими носителями. Предполагается, что показатели преломления стекла и жидкости известны.

Опорные точки на изображениях обнаруживаются и идентифицируются в автоматическом режиме, их координаты на изображении определяются с субпиксельной точностью с помощью алгоритма распознавания целей [21]. Эти координаты рассматриваются как наблюдения в процедуре оценки наименьших средних квадратов для определения неизвестных параметров в моделях визуализации. Результаты калибровки приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры калибровки

Параметр	Значение калибровки			
	Одна оптическая среда		Несколько оптических сред	
m_x, mm	0,00343605	0,00343856	0,00343504	0,00344048
m_y, mm	0,00343513	0,00343760	0,00343459	0,00343890
x_p , pix	746,36	763,32	731,47	739,15
y_p , pix	598,67	575,17	617,47	554,58
a_0	-0,0005603900	-0,0004854600	-0,0005578440	-0,0005089372
a_1	0,0111441600	0,0115739600	0,0112679379	0,0119275824
a_2	0,0004579200	0,0003412100	0,0004684494	0,0003360935
a_3	-0,0000340900	-0,0000382200	-0,0000329905	-0,0000400445
a_4	-0,0000169700	-0,0001148000	-0,0000164739	-0,0001193517
a_5	0,0001380500	-0,0001100600	0,0001425155	-0,0001049068

В качестве меры точности калибровки использовались два показателя: 1 – среднеквадратичная ошибка в положениях для контрольных точек испытательного поля; 2 – расстояние от «облака точек» до «облака точек» для поверхностей эталонного объекта [22]. Для иллюстрации в таблице 3 представлены результаты процедуры относительной ориентации для обоих случаев.

Таблица 3. Параметры относительной ориентации

Угол	Значение, град	
	Одна оптическая среда	Несколько оптических сред
α_0	10.42	10.95
κ_0	-0.34	-0.29
α_1	-14.76	-14.22
ω_1	0.88	0.91
κ_1	0.84	0.82

В таблице 3 показано хорошее соответствие параметров относительной ориентации при использовании алгоритмов калибровки для несколько оптических сред. После процедуры регулировки системы среднее остаточное значение в контрольных точках составило 0,033 мм для стандартного случая (одна оптическая среда – воздух) и 0,035 мм для случая размещения образца в стеклянном резервуаре с водой (нескольких оптических сред воздух-стекло-вода). Эта точность достаточна для решения задач исследования обледенения аэродинамических конструкций в гидродинамической трубе ГДТ-400.

В качестве эталонного образца для оценки точности оптических трехмерных измерений использовалась цифровая модель крыла, спроектированная средствами компьютерного моделирования (рис. 5а), предназначенная для изучения во время экспериментов в гидродинамической трубе ГТД-400. Эта цифровая модель использовалась для изготовления пластиковой копии (рис. 5б) методом лазерной стереолитографии на лазерном стереолитографе ЛС-400 (ИПЛИТ РАН). В результате трехмерного сканирования пластиковой копии с помощью фотограмметрической системы получается система трехмерных координат поверхности объекта, которая называется «облаком точек».

Рис. 5. Экспериментальная проверка калибровки а) цифровая модель крыла (б) пластиковая копия цифровой модели крыла для экспериментов

В дальнейшем проводилось программное сравнение поверхностей эталонного объекта с облаком точек. Для пространственного совмещения и оценки точности при сравнении цифровой модели и облака точек использовалось программное обеспечение CloudCompare 3D point cloud и mesh processing с открытым исходным кодом (https://www.cloudcompare.org). Размерная шкала отображает расхождение результатов измерений в мм.

На рис. 6 представлены результаты сравнения трехмерного сканирования крыла с эталонной цифровой моделью. Можно отметить наличие не полного совпадения облака точек трехмерного сканирования с цифровой моделью, что, скорее всего, связано с геометрическими искажениями от объемной усадки при изготовлении методом лазерной стереолитографии.

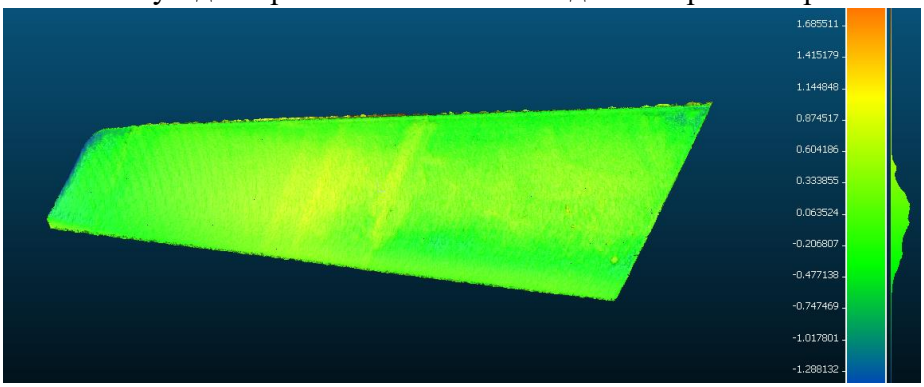


Рис. 6. Сравнение результатов 3D-сканирования пластиковой копии с цифровой моделью

На рис. 7 приведены результаты сравнения облаков точек для двух трехмерных сканирований пластиковой копии модели крыла: полученных в стандартном случае (одна оптическая среда) и в случае размещении образца в стеклянном резервуаре с водой. Показано, что трехмерная реконструкция поверхности в случае нескольких оптических сред с очень высокой степенью соответствует поверхности, полученной в стандартных условиях.

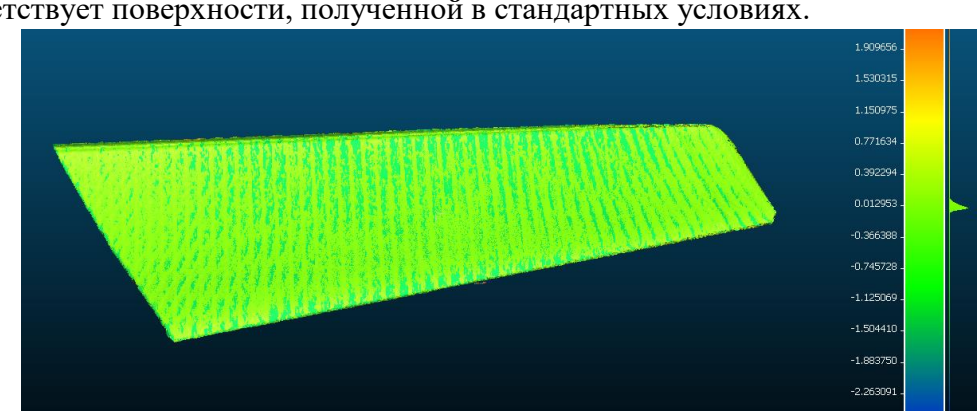


Рис. 7. Результаты сравнения двух трехмерных сканирований: одна оптическая среда и для случая нескольких оптических сред

Заключение. Разработана модель формирования изображения для случая нескольких оптических сред с разными показателями преломления. Модель непосредственно учитывает эффект преломления светового луча на границе раздела двух сред и использует модель искажения Брауна-Конради. Разработанные алгоритмы реализованы в фотограмметрической трехмерной измерительной системе и экспериментально оценены в лабораторных условиях. Проведенная экспериментальная оценка разработанной фотограмметрической системы доказала высокую точность калибровки системы и оптических трехмерных измерений в неоднородной оптической среде. После процедуры регулировки системы среднее остаточное значение в контрольных точках составило 0,033 мм для стандартного случая (одна оптическая среда – воздух) и 0,035 мм для случая размещения образца в стеклянном резервуаре с водой (нескольких оптических сред воздух-стекло-вода). Эта точность достаточна для решения задач исследования обледенения аэродинамических конструкций в гидродинамической трубе ГДТ-400. Разработанная методика калибровки фотограмметрической системы и трехмерных измерений продемонстрировала применимость ее для задачи трехмерного анализа потока в гидродинамической трубе.

Благодарности. Данная работа сделана при финансовой поддержке РФФИ (Грант мк №19-29-13040). Работа по лазерной стерелитографии выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (Государственное задание ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН).

Список источников

1. Головкин М.А. Визуализация структур течения в окрестности моделей летательных аппаратов в гидродинамической трубе малых скоростей (самолетные аэродинамические компоновки) / М.А.Головкин, Е.В. Головкина // Труды МАИ, 2016. – Выпуск № 90. – С. 1-17.
2. Knyaz V.A., Stepaniants D.G., Ippolitov E.V., Novikov M.M. Optical 3d measurements in hydrodynamic tunnel for aircraft icing study. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2020, XLIII-B2-2020, pp.963-968.
3. Shortis M. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems. Sensors, 2015, 15(12), pp. 30810-30826.
4. Drap P., Merad D., Hijazi B., Gaoua L., Nawaf M.M., Saccone M., Chemisky B., Seinturier J., Sourisseau J.-C., Gambin T., Castro F. Underwater photogrammetry and object modeling: A case study of xlendi wreck in malta, Sensors, 2015, 15(12), pp.30351-30384.
5. Nocerino E., Menna F. Photogrammetry: Linking the world across the water surface. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(128), pp.2-36.
6. Vo M.N., Wang Z., Luu L., Ma J. Advanced geometric camera calibration for machine vision. Optical Engineering, 2011, 50(11), pp.1-4.
7. Sedlazeck A., Koch R. Perspective and non-perspective camera models in underwater imaging –overview and error analysis. Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 212-242
8. Murase T., Tanaka M., Tani T., Miyashita Y., Ohkawa N., Ishiguro S., Suzuki Y., Kayanne H., Yamano H.A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2008, 74(9), pp. 1129-1136.
9. Gonzarlez-Vera A.S., Wilting T.J.S., Holten A.P.C., van Heijst G.J.F., Duran-Matute M. High-resolution single-camera photogrammetry: incorporation of refraction at a fluid interface. Exp Fluids, 2020, 61(1), pp. 1-19.
10. Skarlatos D., Agrafiotis P. A novel iterative water refraction correction algorithm for use in structure from motion photogrammetric pipeline. Journal of Marine Science and Engineering, 2018, 6(3).
11. Menna F., Nocerino E., Fassi F., Remondino F. Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry. Sensors, 2016, 16(1).
12. Chadebecq F., Vasconcelos F., Lacher R., Maneas E., Desjardins A., Ourselin S., Vercauteren T., Stoyanov D. Refractive two-view reconstruction for underwater 3d vision. International Journal of Computer Vision, 2019.
13. Telem G., Filin S. Photogrammetric modeling of underwater environments. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(5), pp. 433-444.

14. BraËuer-Burchardt C., KuËhmstedt P., Notni G. Combination of air- and water-calibration for a fringe projection based underwater 3d-scanner. Computer analysis of images and patterns, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp.49-60.
15. Agrafiotis P., Karantzalos K., Georgopoulos A., Skarlatos D. Correcting image refraction: Towards accurate aerial image-based bathymetry mapping in shallow waters. Remote Sensing, 2020, 12(2).
16. Brown D. Decentering distortion of lenses. Photogrammetric Engineering, 1966, 32(3), pp. 444-462.
17. Beyer H. Advances in characterization and calibration of digital imaging systems. Int. arch. photogramm. Remote sens. Spatial inf. sci, 1992, XXIX, pp.545-555.
18. Knyaz V.A. Scalable photogrammetric motion capture system “mosca”: Development and application. International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2015, XL-5/W6, pp.43-49.
19. Knyaz V.A., Zheltov S.Y., Vishnyakov B.V. Robust object tracking techniques for vision-based 3D motion analysis applications. Optics, photonics and digital technologies for imaging applications IV, International society for optics and photonics SPIE, 2016, 9896, pp. 334-342.
20. Князь В.А. Калибровка оптической системы для трёхмерных измерений в гидродинамической трубе / В.А. Князь, Д.Г. Степаньянц, О.Ю. Царева // Компьютерная оптика, 2021. – т. 45. – № 1. – С. 58-65.
21. Kniaz V.V., Grodzitskiy L., Knyaz V.A. Deep learning for coded target detection. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2021, XLIV-2/W1-2021, pp. 125-130.
22. Knyaz V., Zheltov S. Accuracy evaluation of structure from motion surface 3D reconstruction. Videometrics, range imaging, and applications XIV, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2017, 10332, pp. 200-209.

Новиков Михаил Михайлович. *Старший научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, SPIN: 3713-0429, AuthorID: 38807, ORCID: 0000-0003-0626-793X, novikov@rambler.ru, 140700, Россия, г.Шатура, МО, ул.Святоозерская, д.1.*

Ипполитов Евгений Викторович. *Научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, SPIN: 3694-9798, AuthorID: 1043880, ORCID: 0000−0002−0622−6727, ippevg@ya.ru, 140700, Россия, г. Шатура, МО, ул.Святоозерская, д.1.*

Камаев Сергей Валентинович. *Старший научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, SPIN: 1473-2930, AuthorID: 38809, ORCID: 0000-0001-7423-1264. ksv6@rambler.ru, 140700, Россия, г. Шатура, МО, ул.Святоозерская, д.1.*

Марков Михаил Александрович. *Старший научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, AuthorID: 3713-0429, ORCID: 0000-0003-1054-2615, markov@shatura.laser.ru, 140700, Россия, г. Шатура, МО, ул.Святоозерская, д.1.*

Князь Владимир Александрович. *Руководитель отделения, кандидат технических наук Федеральное государственное унитарное предприятие «ГосНИИ авиационных систем», SPIN: 8014-4229, AuthorID: 120975, ORCID: 0000-0002-4466-244, knyaz@gosniias.ru, 125319, Россия, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7.*

Степаньянц Дмитрий Георгиевич. *Кандидат технических наук, руководитель сектора в Федеральном государственном унитарном предприятии «ГосНИИ авиационных систем», SPIN: 4539-8453, AuthorID: 443238, robin8081@gmail.com, 125319, Россия, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7.*

UDC 004.923
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.007

Problems of non-contact registration of flows in a hydrodynamic tube

Mikhail M. Novikov[1], Evgene V. Ippolitov[1], Serge V. Kamaev[1], Mikhail A. Markov[1]
Vladimir A. Knyaz[2], Dmitriy G. Stepaniants[2]
[1]ILIT RAS – Branch of the FSRC Crystallography and Photonics of Russian Academy of Sciences, Russia, Shatura, *novikov@rambler.ru*
[2]State Research Institute of Aviation System (GosNIIAS), Russia, Moscow

Abstract. The hydrodynamic tube is one of the most effective tools for studying the process of wing flow in aerodynamics and hydrodynamics. This makes it possible to study the flow characteristics under controlled conditions and simulate conditions that could not be studied in real flight. Flow visualization methods, such as colored jets or fine particles, allow us to obtain qualitative data on the behavior of the flow, being a valuable tool for understanding the flow features. But it is more interesting to have quantitative flow characteristics that allow us to predict the development of flow processes and develop recommendations for improving safety. The presented research is aimed at developing a system of contactless three-dimensional measurements in a hydrotube based on photogrammetric methods. An original visualization model is proposed that takes into account the effects of refraction in the case of several optical media (air-glass-liquid), which provides spatial accuracy of measurements. This model is implemented in an experimental photogrammetric system, an accuracy estimate is given both for the calibration of the system and for the measurement of the aerodynamic model. The developed method of calibration of the photogrammetric system has demonstrated its applicability to the problem of three-dimensional measurements in a hydrodynamic tube.

Keywords: three-dimensional measurements, calibration, refraction, optical medium, photogrammetry

Acknowledgements: This work was done with the financial support of the RFBR (Grant mk No. 19-29-13040). The work on laser stereolithography was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education (the State task of the Federal Research Institute "Crystallography and Photonics" of the Russian Academy of Sciences).

References

1. Golovkin M.A., Golovkina E.V. Vizualizacija struktur techenija v okrestnosti modelej letatel'nyh apparatov v gidrodinamicheskoj trube malyh skorostej (samoletnye ajerodinamicheskie komponovki) [Visualization of the flow structure in the vicinity of aircraft models in a low-speed hydrodynamic tube (aeroplane aerodynamic layouts)]. Trudy MAI [Proceedings of MAI], 2016, Issue no. 90, pp. 1-17.
2. Knyaz V.A., Stepaniants D.G., Ippolitov E.V., Novikov M.M. Optical 3d measurements in hydrodynamic tunnel for aircraft icing study. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2020, XLIII-B2-2020, pp.963-968.
3. Shortis M. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems. Sensors, 2015, 15(12), pp. 30810-30826.
4. Drap P., Merad D., Hijazi B., Gaoua L., Nawaf M.M., Saccone M., Chemisky B., Seinturier J., Sourisseau J.-C., Gambin T., Castro F. Underwater photogrammetry and object modeling: A case study of xlendi wreck in malta, Sensors, 2015, 15(12), pp.30351-30384.
5. Nocerino E., Menna F. Photogrammetry: Linking the world across the water surface. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(128), pp.2-36.
6. Vo M.N., Wang Z., Luu L., Ma J. Advanced geometric camera calibration for machine vision. Optical Engineering, 2011, 50(11), pp.1-4.
7. Sedlazeck A., Koch R. Perspective and non-perspective camera models in underwater imaging –overview and error analysis. Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 212-242
8. Murase T., Tanaka M., Tani T., Miyashita Y., Ohkawa N., Ishiguro S., Suzuki Y., Kayanne H., Yamano H.A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2008, 74(9), pp.1129-1136.
9. Gonzarlez-Vera A.S., Wilting T.J.S., Holten A.P.C., van Heijst G.J.F., Duran-Matute M. High-resolution single-camera photogrammetry: incorporation of refraction at a fluid interface. Exp Fluids, 2020, 61(1), pp. 1-19.
10. Skarlatos D., Agrafiotis P. A novel iterative water refraction correction algorithm for use in structure from motion photogrammetric pipeline. Journal of Marine Science and Engineering, 2018, 6(3).

11. Menna F., Nocerino E., Fassi F., Remondino F. Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry. Sensors, 2016, 16(1).
12. Chadebecq F., Vasconcelos F., Lacher R., Maneas E., Desjardins A., Ourselin S., Vercauteren T., Stoyanov D. Refractive two-view reconstruction for underwater 3d vision. International Journal of Computer Vision, 2019.
13. Telem G., Filin S. Photogrammetric modeling of underwater environments. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(5), pp. 433-444.
14. BraËuer-Burchardt C., KuËhmstedt P., Notni G. Combination of air- and water-calibration for a fringe projection based underwater 3d-scanner. Computer analysis of images and patterns, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp.49-60.
15. Agrafiotis P., Karantzalos K., Georgopoulos A., Skarlatos D. Correcting image refraction: Towards accurate aerial image-based bathymetry mapping in shallow waters. Remote Sensing, 2020, 12(2).
16. Brown D. Decentering distortion of lenses. Photogrammetric Engineering, 1966, 32(3), pp. 444-462.
17. Beyer H. Advances in characterization and calibration of digital imaging systems. Int. arch. photogramm. Remote sens. Spatial inf. sci, 1992, XXIX, pp.545-555.
18. Knyaz V.A. Scalable photogrammetric motion capture system “mosca”: Development and application. International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2015, XL-5/W6, pp.43-49.
19. Knyaz V.A., Zheltov S.Y., Vishnyakov B.V. Robust object tracking techniques for vision-based 3D motion analysis applications. Optics, photonics and digital technologies for imaging applications IV, International society for optics and photonics SPIE, 2016, 9896, pp. 334-342.
20. Knyaz, V.A., Stepanyants D.G., Tsareva O.Yu. Kalibrovka opticheskoy sistemy dlya trokhmernykh izmereniy v gidrodinamicheskoy trube [Calibration of an optical system for three-dimensional measurements in a hydrodynamic tube]. Komp'yuternaya optika [Computer Optics], 2021, vol.45, no. 1, pp. 58-65.
21. Kniaz V.V., Grodzitskiy L., Knyaz V.A. Deep learning for coded target detection. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2021, XLIV-2/W1-2021, pp. 125-130.
22. Knyaz V., Zheltov S. Accuracy evaluation of structure from motion surface 3D reconstruction. Videometrics, range imaging, and applications XIV, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2017, 10332, pp. 200-209.

Mikhail Mikhailovich Novikov. *Senior Research Fellow, Institute for Problems of Laser and Information Technologies RAS - branch of the Federal State Institution Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, SPIN: 3713-0429, AuthorID: 38807, ORCID: 0000-0003-0626-793X, novikov@rambler.ru, 140700, Russia, Shatura, Moscow region, Svyatoozerskaya st., 1.*

Evgeny Viktorovich Ippolitov. *Research Fellow, Institute for Problems of Laser and Information Technologies RAS - branch of the Federal State Institution Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, SPIN: 3694-9798, AuthorID: 1043880, ORCID: 0000−0002−0622−6727, ippevg@ya.ru, 140700, Russia, Shatura, Moscow region, Svyatoozerskaya st., 1.*

Sergey Valentinovich Kamaev. *Senior Research Fellow, Institute for Problems of Laser and Information Technologies RAS - branch of the Federal State Institution Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, SPIN: 1473-2930, AuthorID: 38809, ORCID: 0000-0001-7423-1264, ksv6@rambler.ru, 140700, Russia, Shatura, Moscow Region, Svyatoozerskaya st., 1.*

Mikhail Alexandrovich Markov. *Senior Research Fellow, Institute for Problems of Laser and Information Technologies RAS - branch of the Federal State Institution Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, AuthorID: 3713-0429, ORCID: 0000-0003-1054-2615, markov@shatura.laser.ru, 140700, Russia, Shatura, Moscow Region, Svyatoozerskaya st., 1.*

Vladimir Alexandrovich Knyaz. *Head of Department, Candidate of Technical Sciences Federal State Unitary Enterprise "GosNII of Aviation Systems", SPIN: 8014-4229, AuthorID: 120975, ORCID: 0000-0002-4466-244, knyaz@gosniias.ru, 125319, Russia, Moscow, st. Viktorenko, d. 7.*

Dmitry Georgievich Stepanyants. *Candidate of Technical Sciences, Head of Sector at the Federal State Unitary Enterprise "GosNII of Aviation Systems", SPIN: 4539-8453, AuthorID: 443238, robin8081@gmail.com, 125319, Russia, Moscow, st. Viktorenko, d.* 7.

Статья поступила в редакцию 13.07.2022; одобрена после рецензирования 03.10.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 07/13/2022; approved after reviewing 10/03/2022; accepted for publication 11/25/2022.

УДК 54.01, 519.1, 51-7

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.008

Построение графа химических реакций для анализа реагирующих систем

Козлова Мария Александровна, Шаманский Виталий Алексеевич

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

Россия, Иркутск, *kma95@isem.irk.ru*

Аннотация. В материале изложена методика построения ориентированного гиперграфа химических реакций для реагирующей системы. Анализ такого графа дает возможность оценивать влияние тех или иных реакций и реакционных путей (брутто-реакций) на химический состав конечных продуктов. В данной работе был выполнен перебор всех возможных комбинаций элементарных реакций горения водорода в кислороде, при этом критерием связности соответствующего графа выступало образование всех веществ из заданного заранее списка и была рассчитана вероятность обрыва.

Ключевые слова: граф химических реакций, химическая кинетика, математическое моделирование, процессы горения

Цитирование: Козлова М.А. Построение графа химических реакций для анализа реагирующих систем / М.А. Козлова, В.А. Шаманский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 108-118. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.008.

Введение. О способах применения теории графов в химии дают представление такие обзорные работы, как [1, 2]. В работе [2] проводят обзор по реакционным сетям и математическим теоремам, связанные с ними. В [3, 4] предлагается теоретико-графовый метод оценки различия реакционных сетей, обладающих способностью к множественным равновесиям, и сетей, не обладающих такой способностью. В обзоре [5] рассматриваются различные аспекты теории химических графов, в частности, формулировка химической кинетики на химическом графе. В [6] предложен метод решения однородных и неоднородных систем дифференциальных уравнений, используемых в химической кинетике и фармакокинетике, на основе принципов потокового графа. В работе [7] приведена интерпретация химических соединений и химических реакций с помощью графов для создания алгоритмов определения базиса маршрутов.

В работе [8] был проведён анализ циклов графа сложной химической реакции. Использование графов реакций (термодинамические химические цепи) для термодинамического исследования химических систем было детально описано в [9]. Там каждая дуга соответствовала потоку одного или нескольких веществ, как вступающих в какую-либо реакцию, так и не реагирующих, и в результате получали изменение количества веществ в той или иной реакции (дуге) в процессе достижения системой равновесия. Проблемой в этом случае, как отмечают сами авторы, является некоторый произвол в построении графа, связанный с выбором механизма химических превращений.

В целом работ по моделированию горения газовых топлив достаточно много, однако большая часть таких работ имеет частный характер с эмпирическим содержанием, привязанным к конкретным топливам и конструкциям реакторов. Главная проблема таких подходов – это предсказание оптимальных параметров ведения процесса и конструкции камеры сгорания. Поиск ведется «наощупь», интуитивно, перебором. При этом основную сложность в моделирование горения реагирующих систем вносят химические реакции, которые развиваются в пространстве и во времени с выделением или поглощением тепла и изменением состава системы. Даже простые в химической области системы приводят к довольно громоздким моделям. Например, при горении водорода в чистом воздухе (только два исходных вещества – O_2 и H_2,) кинетических компонентов в реакционной смеси будет восемь: H_2, O_2, H_2O, H_2O_2, OH, HO_2, H, O [10]. Обратимых всех возможных бимолекулярных реакций – тридцать. В литературе по моделированию процессов горения и химической кинетики с помощью

графов часто встречается постановка задачи оптимизации расчёта, поскольку число реакций велико. Например, в [11-14] предложены алгоритмы глобального выбора пути для сокращения количества подробных кинетических механизмов.

Предлагаемый в данной работе подход с применением ориентированных гиперграфов потоков реакций позволяет включить в модели промежуточные реакции, более детально учитывать химический механизм целевых превращений. Анализ связности гиперграфа химических реакций позволяет исследовать механизм развития химического превращения системы, выделить пути формирования конечных продуктов и способы воздействия на систему, направленные на их целевое формирование.

1. Понятие идеальной реакции. Для реакций в газовой фазе будем опираться на следующие положения:

– Взаимодействия происходят только между двумя частицами. Многочастичные взаимодействия, которые обычно принято записывать в работах по химической кинетике в общем виде $\nu_1 A_1 + \nu_2 A_2 + ... + \nu_i A_i$, где A_1, $A_2 \ldots A_i$ – реагирующие вещества, ν_1, $\nu_2 \ldots \nu_i$ – соответствующие стехиометрические коэффициенты, являются суммирующими и удобны скорее для краткой записи суммы процессов, чем для моделирования и исследования реальной химической системы. Необходимо отметить, что одновременное столкновение в газовой фазе более двух частиц при умеренных давлениях крайне маловероятно, а если учесть принципы квантовой механики, в частности, принцип неопределенности Гейзенберга, то и невозможно. Любое условное трехчастичное столкновение A+B+C частиц A, B и C можно представить как двухэтапный процесс: A+B=AB, AB+C. При этом к списку веществ следует добавить малоустойчивое соединение AB. Условное трехчастичное столкновение реализуется в случае, когда время жизни AB больше обратной частоты столкновений.

– Если не оговаривается особо, используется уравнение состояния идеального газа и соответствующее выражение для химического потенциала: $\mu_i = \mu_i^0 + RT\ln\left(px_i\right)$, где μ_i^0 – стандартный химический потенциал *i*-го вещества, Дж·моль$^{-1}$; *R* – универсальная газовая постоянная; *T* – температура, К; p – отношение давления в системе к нормальному давлению; x_i – мольная доля *i*-го вещества. При этом для каждой элементарной реакции выполняется условие: $\Delta G_r = \sum \nu_{ir}\mu_i \le 0$, где $r = 1 \ldots K$, *K* - число элементарных реакций в системе; ΔG_r – локальное изменение энергии Гиббса в процессе реакции; ν_{ir} – стехиометрические коэффициенты *i*-го вещества в *r*-й реакции, имеющие отрицательные значения для продуктов реакции. Знаки коэффициентов выбираются так, чтобы выполнялось условие $\Delta G_r \le 0$, т.е. для каждой реакции устанавливается: какие вещества являются исходными компонентами, а какие продуктами реакции.

– Всякая элементарная реакция имеет противоположную, т.е. все элементарные реакции полагаются обратимыми. Фактически, это необходимое свойство для определения понятия элементарной реакции. Все реакции, трактуемые как необратимые, например, горение метана или, нагляднее, разложение (взрыв) нитроглицерина, являются сложными, состоящими из сотен и тысяч обратимых элементарных стадий. Обратимость реакции можно представить как следствие изменения условий её протекания.

Реакции, отвечающие вышеперечисленным условиям, и будем называть «идеальными».

2. Матрица стехиометрических индексов. Рассмотрим простейшую систему с горением – реакцию горения водорода в кислороде с образованием воды:

$$2\,H_2 + O_2 = 2\,H_2O\,. \qquad (1)$$

Модель химического процесса начинается с задания списка веществ, участвующих в нем. В этот список входят исходные вещества, продукты реакций, промежуточные малоустойчивые вещества, содержание которых может быть много меньше исходных и конечных продуктов, но без которых кинетический граф химического процесса может оказаться несвязным, а также вещества, не участвующие в химических реакциях, но влияющие на их характеристики. Правильно заданный список веществ – важное условие правильности самой модели. В первую очередь это касается промежуточных компонентов, список которых не всегда очевиден, и, даже при выполнении связности графа элементарных реакций, неполное его представление может сильно исказить динамику системы и привести к неверным результатам вычислений. В нашем случае для реакции (1) на основе [10] список компонентов *s* будет следующим: $s = \{ H_2,\ O_2,\ H_2O,\ H_2O_2,\ OH,\ HO_2,\ H \}$. При температуре в зоне горения меньше 2000 С диссоциацией молекул O_2 можно пренебречь, одновременно полагая, что частица атомарного кислорода в реакциях не образуется и не участвует.

Каждому списку компонентов *s* с вектором их исходных количеств *x* (для рассматриваемого примера: $\mathbf{x} = [1,1,0,0,0,0,0]$) соответствует матрица **A** стехиометрических индексов составляющих их химических элементов {H, O}:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \tag{2}$$

Поскольку система предполагается замкнутой, т.е. не происходит массообмена с внешней средой, данная матрица (2) такая, что в процессе всех химических превращений выполняется баланс $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, где **b** – количества элементов {H, O}. Таким образом, размерность матрицы **A**: $m \times n$, где m – число элементов, n – число веществ. Из условия двухчастичности взаимодействий следует, что любые три столбца или линейно связанные две пары столбцов матрицы **A**, образующие нулевые линейные комбинации, будут соответствовать возможной химической реакции. Полный перебор таких линейных комбинаций даст исчерпывающий список элементарных стадий в системе. Очевидно, что при такой операции материальный баланс выполняется автоматически. В кинетической модели начальные и конечные продукты должны быть связаны системой реакций, содержащих промежуточные химические вещества.

3. Построение графа химических реакций. На основании вышесказанного составляется список всех возможных идеальных реакций. В системе с исходными веществами H_2 и O_2 для указанного выше списка *s* таких реакций будет 17 (таблица 1).

Таблица 1. Все возможные реакции

1. $H_2 \leftrightarrow H + H$	7. $H_2 + O_2 \leftrightarrow OH + OH$	13. $H_2O + O_2 \leftrightarrow HO_2 + OH$
2. $H_2O \leftrightarrow H + OH$	8. $H_2 + O_2 \leftrightarrow H + HO_2$	14. $H_2O_2 + O_2 \leftrightarrow HO_2 + HO_2$
3. $H_2O_2 \leftrightarrow H_2 + O_2$	9. $H_2 + H_2O_2 \leftrightarrow H_2O + H_2O$	15. $H_2O + OH \leftrightarrow H + H_2O_2$
4. $H_2O_2 \leftrightarrow OH + OH$	10. $H_2 + OH \leftrightarrow H + H_2O$	16. $H_2O + HO_2 \leftrightarrow H_2O_2 + OH$
5. $H_2O_2 \leftrightarrow H + HO_2$	11. $H_2 + HO_2 \leftrightarrow H_2O + OH$	17. $OH + OH \leftrightarrow H + HO_2$.
6. $HO_2 \leftrightarrow H + O_2$	12. $H_2 + HO_2 \leftrightarrow H + H_2O_2$	

Полученному списку реакций соответствует матрица инцидентности **R**, где, как принято, строки соответствуют веществам, столбцы – реакциям, а элементами являются коэффициенты соответствующих веществ в соответствующих реакциях. Матрица **R** для системы реакций 1-17 с исходным вектором количеств веществ **x** выглядит следующим образом:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -2 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -2 & 0 & 1 & -1 \\ -2 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Номер столбца матрицы (3) соответствует номеру реакции из списка 1-17, а номер строки – номеру вещества в списке *s*. Дуга такого графа может связать более двух вершин, поэтому элементы матрицы инцидентности могут быть больше единицы по модулю, и мы имеем дело с гиперграфом. При этом выполняется условие материального баланса: $\mathbf{A} \cdot \mathbf{R} = \mathbf{0}$, т. е. матрицы (2) и (3) ортогональны.

Вектор начальных количеств веществ определяет последовательность протекания элементарных реакций. Очевидно, что начальными реакциями могут быть только те, у которых в системе присутствуют исходные вещества. Из списка 1-17 такими реакциями являются 1, 3, 7 и 8. Эти реакции производят все вещества из списка *s*, кроме H_2O, которые, в свою очередь инициируют остальные реакции. По очередности протекания, таким образом, реакции 1-17 можно распределить по 2-м этапам, причём часть реакций протекает преимущественно в одну сторону.

Такой анализ был выполнен на базе матрицы инцидентности **R**. На рис. 1 представлен граф G, построенный на основе матрицы **R** с учётом последовательности протекания элементарных стадий.

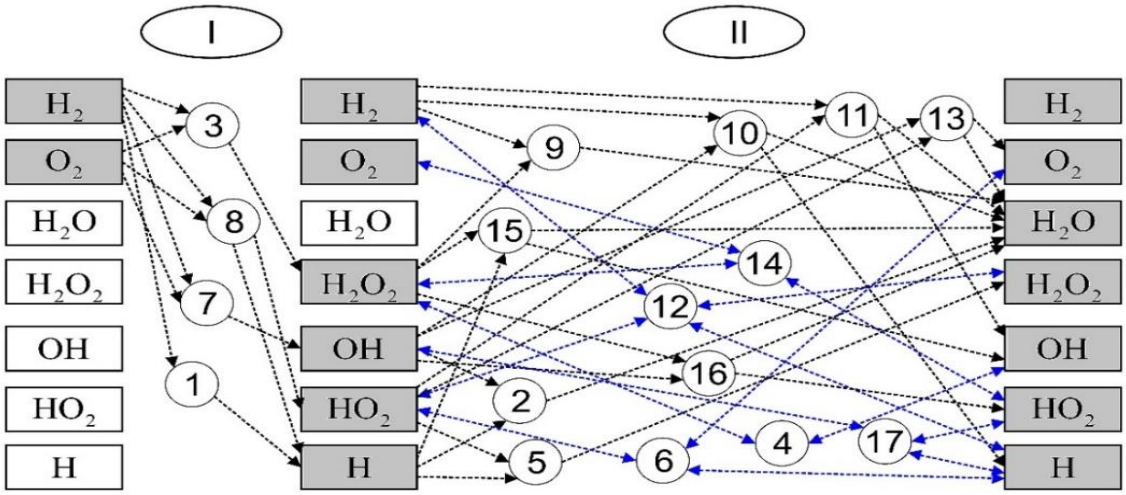


Рис. 1. Поэтапный гиперграф G элементарных реакций 1-17 взаимодействия водорода и кислорода

Для наглядности одно и то же вещество удобно на этом графе представлять несколькими вершинами, поскольку состояние вещества после каждого этапа может измениться. Такое состояние будем считать промежуточным. На рис. 1 серыми прямоугольниками обозначены вещества, присутствующие в реагирующей системе на данном этапе.

С помощью представленного на рис. 1 графа можно проанализировать, насколько важно правильно задавать список веществ, участвующих в реакции, и список самих реакций. При этом надо различать два типа связности:

1. Связность, нарушение которой приводит к разрыву пути от исходных веществ к какому-либо конечному или промежуточному компоненту. Будем называть такую связность «прямой».
2. Связность, нарушение которой приводит к разбиению гиперграфа на несколько подграфов, совокупность которых сохраняет прямую связность исходного графа. Такую связность будем называть «латеральной».

Данный гиперграф на рис. 1 ориентирован в соответствии с термодинамическими условиями протекания реакций. Такие графы можно назвать термодинамически ориентированными. На начальном этапе, когда есть нулевые содержания компонентов, ориентация потоков осуществляется на основе матрицы инцидентности, просто исходя из очередности появления веществ.

Если водород сжигать в воздухе (три исходных веществах – O_2, H_2 и N_2), компонентов становится 21: O_2, H_2, N_2, H_2O, H_2O_2, NH, N_2H_2, N_2H_4, NH_3, NO, NO_2, N_2O, N_2O_3, N_2O_4, HN_2, HO_2, NH_2, OH, O, H, N. Теоретически возможных обратимых реакций – 189. Если вместо водорода мы возьмем метан и будем сжигать его в воздухе, число компонентов станет – 30, число реакций – 412. Конечно, само по себе большое количество реакций в химико-кинетическом блоке модели еще не предвещает особой сложности в организации численного решения на современных компьютерах. Так, например, в работе [15] был сформирован детальный механизм горения керосина и n-декана (со сложной стадией их пиролиза), состоящей из 193 веществ и 1085 реакций.

4. Анализ связности графа химических реакций. Полученный список 1-17 из таблицы 1 промежуточных реакций является избыточным. Его можно сократить, опираясь на предварительную информацию о специфике протекания каждого химического взаимодействия. Такое сокращение наиболее эффективно, если удается сократить список веществ на основании слабого влияния некоторых компонентов на результат расчетов. Это можно сделать, исследуя граф химических реакций. В системах с относительно невысоким температурным уровнем в зоне горения можно исключить реакции с высокой энергией активации, такие, как $H_2 + O_2 \to H_2O_2$, $H_2 + O_2 \to OH + OH$ или $H_2O + O_2 \to HO_2 + OH$. Для каждой химической системы такой анализ индивидуален и зависит от условий и задач исследования.

Посмотрим, как удаление того или иного набора реакций влияет на связность химического графа, т. е. на образование отдельных веществ из списка *s*. Под удалением (обрывом) реакции понимается установление таких параметров состояния системы, когда скорость этой реакции значительно замедляется или изменяется ее направление.

Введём понятие «вероятность обрыва реакции (4) в зависимости от числа удалённых реакций k»:

$$P_k = \frac{\left(N_n^k\right)^{break}}{N_n^k} \tag{4}$$

где $\left(N_n^k\right)^{break}$ – число вариантов несвязного графа из N_n^k; $N_n^k = \dfrac{n!}{k!(n-k)!}$ – число всех вариантов для k удалённых реакций; n – число всех возможных реакций из списка 1-17.

На рис. 2 представлена зависимость вероятности обрыва от числа удаляемых реакций.

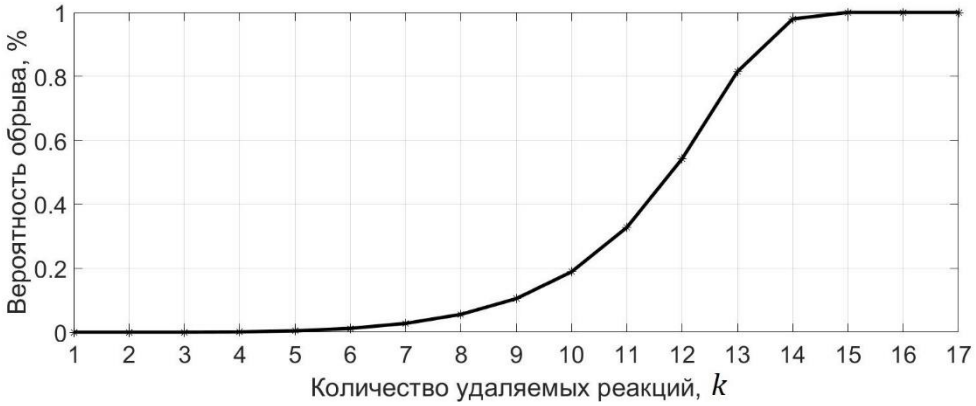


Рис. 2. Вероятность обрыва в зависимости от числа удаляемых реакций

В таблице 2 представлены числа всевозможных вариантов в зависимости от числа удаляемых из списка 1-17 реакций.

Таблица 2. Число вариантов

Число удаляемых из списка реакций, k	Число вариантов, при которых связность не нарушается, $N_n^k - \left(N_n^k\right)^{break}$	Число всех удаляемых вариантов, N_n^k
1	17	17
2	136	136
3	680	680
4	2378	2380
5	6163	6188
6	12230	12376
7	18917	19448
8	22960	24310
9	21764	24310
10	15781	19448
11	8324	12376
12	2832	6188
13	441	2380
14	14	680
15	0	136
16	0	17
17	0	1
Всего	112637	131071

Из приведенных данных видно, что, несмотря на удаление 14 реакций из 17 возможных, всё-таки возможно образование всех веществ из списка: 14 комбинаций из 680 возможных сочетаний привели к образованию всех веществ из списка s (то, что число удалённых реакций 14 и число успешно завершённых механизмов тоже 14, – совпадение). В таблице 3 представлены все эти 14 вариантов, при этом все реакции протекают только в одну сторону.

Таблица 3. Варианты, при которых связность сохраняется для трёх реакций

№	I этап	II этап	III этап
1	$H_2 + O_2 \rightarrow H + HO_2$	$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$	$H + H_2O_2 \rightarrow H_2O + OH$
2	$H_2 + O_2 \rightarrow H + HO_2$	$H_2 + HO_2 \rightarrow H + H_2O_2$	$H + H_2O_2 \rightarrow H_2O + OH$
3	$H_2 + O_2 \rightarrow H + HO_2$	$H_2 + HO_2 \rightarrow H_2O + OH$	$H_2O + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + OH$

№	I этап	II этап	III этап
4	$H_2 + O_2 \to H + HO_2$	$H_2 + HO_2 \to H_2O + OH$	$H_2O + OH \to H + H_2O_2$
5	$H_2 + O_2 \to H + HO_2$	$H_2 + HO_2 \to H_2O + OH$	$H_2O + H_2O \to H_2 + H_2O_2$
6	$H_2 + O_2 \to H + HO_2$	$H + HO_2 \to H_2O_2$	$H + H_2O_2 \to H_2O + OH$
7	$H_2 + O_2 \to H + HO_2$	$H_2 + HO_2 \to H_2O + OH$	$OH + OH \to H_2O_2$
8	$H_2 + O_2 \to H_2O_2$	$H_2O_2 \to H + HO_2$	$H + H_2O_2 \to H_2O + OH$
9	$H_2 + O_2 \to H_2O_2$	$H_2O_2 \to H + HO_2$	$H_2 + HO_2 \to H_2O + OH$
10	$H_2 + O_2 \to H + HO_2$	$H_2 + HO_2 \to H_2O + OH$ $HO_2 + HO_2 \to H_2O_2 + O_2$	
11	$H_2 + O_2 \to H + HO_2$	$H_2 + HO_2 \to H_2O + OH$ $H_2 + HO_2 \to H + H_2O_2$	
12	$H_2 + O_2 \to H + HO_2$	$H + HO_2 \to H_2O_2$ $H_2 + HO_2 \to H_2O + OH$	
13	$H_2 + O_2 \to H_2O_2$ $H_2 + O_2 \to H + HO_2$	$H + H_2O_2 \to H_2O + OH$	
14	$H_2 + O_2 \to H_2O_2$ $H_2 + O_2 \to H + HO_2$	$H_2 + HO_2 \to H_2O + OH$	

На рис. 3 представлен граф для 3-го механизма.

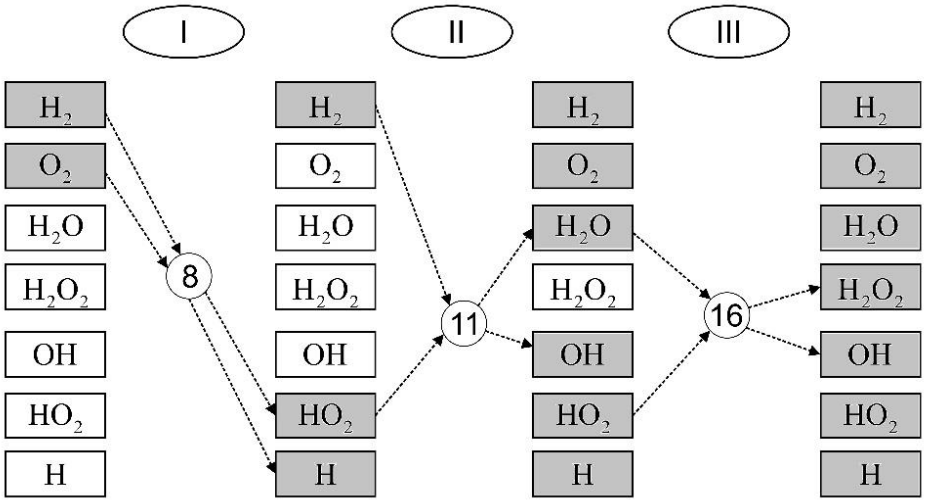


Рис. 3. Этапы для 3-го варианта из таблицы 3

Например, при третьем механизме для образования H_2O достаточно двух реакций из списка 1-17: 8-й и 11-й. В реальности такое, однако, невозможно, поскольку данные реакции требуют высокой энергии активации.

На рис. 4 для примера представлен граф, соответствующий одному из 8324 вариантов реакций, сохраняющих связность графа, при этом удалены 11 реакций.

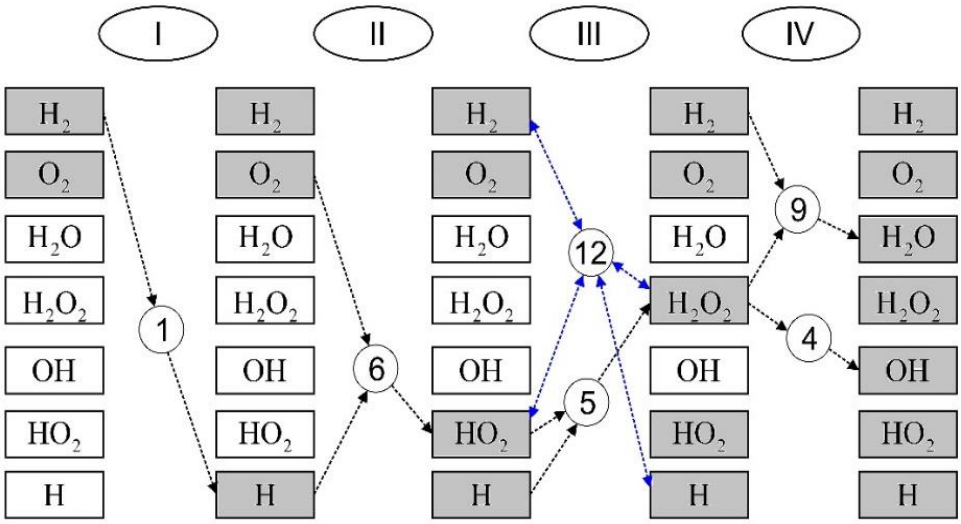


Рис. 4. Вариант этапов для 11 удалённых реакций

Если оставить реакции 1, 3, 5, 6 и 12, то не образуются гидроксил OH и вода H_2O, вследствие чего нарушается связность графа (рис. 5).

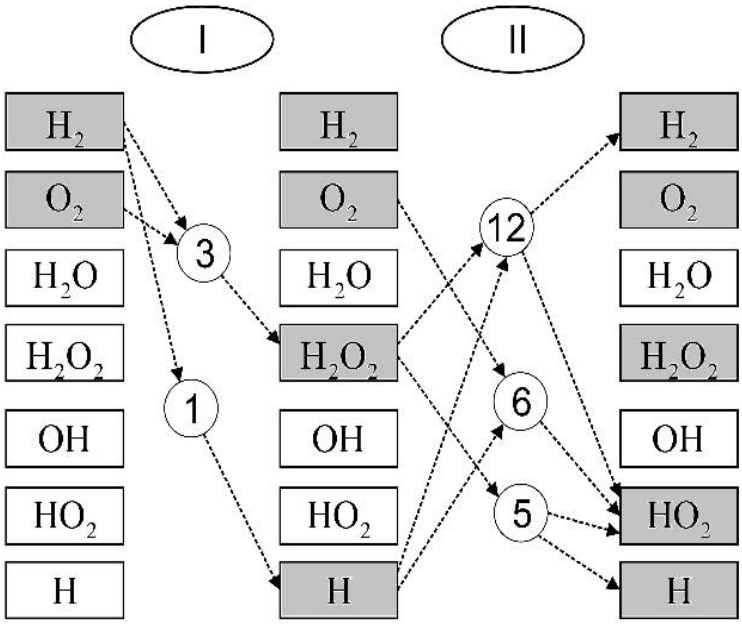


Рис. 5. Пример несвязного графа химических реакций

В то же время удаление комбинации, например, из 3-й, 5-й, 7-й, 8-й, 16-й и 17-й реакций приводит к тому, что в системе оказываются только O_2, H_2 и H. К такому же результату приводит и удаление 4-й, 7-й, 9-й, 11-й, 15-й и 17-й реакций (реакций, в которых участвует вода H_2O).

Заключение. На основе графа химических реакций можно исследовать устойчивость реакционного механизма, например, стабильность факельного горения, в зависимости от внешних факторов, таких, как температура, давление, концентрация реагирующих веществ, а также выявлять возможности подавления образования нежелательных продуктов, таких, например, как оксиды азота или сажа. Ориентация графа, отвечающая направлению химических реакций, проводится на каждом шаге расчета с учетом текущих термодинамических параметров реакционной среды. На основе ориентации реакционных потоков и структуры графа реакций выделяются равновесные реакции и лимитирующие потоки. При этом любое хи-

мическое превращение системы может быть представлено в виде линейной комбинации обратимых базисных реакций. Полнота базиса определяется принятым списком химических компонентов реагирующей системы. В данной статье были рассмотрены принципы построения такого графа и на примере горения водорода в кислороде показана процедура анализа устойчивости реакционного процесса. При этом 86% вариантов приводят к сохранению связности графа, т. е. образованию всех веществ из исходного списка *s*. Анализ был проведен без учета значений кинетических коэффициентов для тех или иных внешних условий.

Конечно, для такой простой системы, как горение водорода в кислороде список веществ достаточно очевиден, однако для более сложных систем, какие обычно свойственны химическим реакторам в энергетических установках, такой список должен быть тщательно выверен. Лучше всего взять избыточный набор и далее на основании связности графа и с учетом незначительности скоростей реакций с рассматриваемыми веществами (когда для получения конечных продуктов есть другие пути) отсеять лишние вещества. Разумеется, скорости реакций надо рассмотреть во всем диапазоне возможных температур и давлений изменяющейся системы. Также для составления списка веществ можно задать элементный состав и на его основе выбрать из имеющейся базы термодинамических данных вещества.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00406) с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Список источников

1. Антипина Е.В. Применение теории графов при решении задач моделирования химических реакций / Е.В. Антипина // НоваИнфо, 2022. – № 130. – С. 4-5.
2. Feinberg M. Foundations of Chemical Reaction Network Theory, Applied Mathematical Sciences. New York, Springer International Publishing, 2019, vol. 202, p. 454.
3. Craciun G., Feinberg M. Multiple Equilibria in Complex Chemical Reaction Networks: I. The Injectivity Property. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005, vol. 65, no. 5, pp. 1526-1546, DOI:10.1137/S0036139904440278.
4. Craciun G., Feinberg M. Multiple Equilibria in Complex Chemical Reaction Networks: I. The Species-Reaction Graph. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006, vol. 66, no. 4, pp. 1321-1338, DOI:10.1137/050634177.
5. García-Domenech R., Galvez J., de Julian-Ortiz J.V. Some New Trends in Chemical Graph Theory. Chemical Reviews, 2008, vol. 108, no. 3, pp. 1127-1169, DOI: 10.1021/cr0780006.
6. Socol M., Baldea I. A New Approach of Flow Graph Theory Applied in Physical Chemistry. Journal of the Chinese Chemical Society, 2006, vol. 53, no. 4, pp. 773-781.
7. Исмагилова А.С. Теоретико-графовая интерпретация химических соединений и химических реакций / А.С. Исмагилова, А.И. Ахметьянова, С.И. Спивак // Доклады Башкирского университета, 2016. – т. 1. – № 1. – С. 36-39.
8. Спивак С.И. Теоретико-графовая интерпретация суммарных уравнений химических реакций / С.И. Спивак, А.С. Исмагилова, И.А. Стройкина // Вестник Башкирского университета, 2013. – т. 18. – № 2. – С. 300-302.
9. Каганович Б.М. Моделирование термодинамических процессов / Б.М. Каганович, С.П. Филиппов, Е.Г. Анциферов. – Новосибирск: Наука, 1993. – 101 с.
10. Гельфанд Б.Е. Водород. Параметры горения и взрыва / Б.Е. Гельфанд, О.Е. Попов, Б.Б. Чайванов // М.: Физматлит, 2008. – 288 с.
11. Chen Y., Chen J.-Y. Towards improved automatic chemical kinetic model reduction regarding ignition delays and flame speeds. Combustion and Flame, 2018, vol. 190, pp. 293-301, DOI:10.1016/j.combustflame.2017.11.024.
12. Gao X., Yang S., Sun W. A global pathway selection algorithm for the reduction of detailed chemical kinetic mechanisms. Combustion and Flame, 2016, vol. 167, pp. 238-247, DOI:10.1016/j.combustflame.2016.02.007.
13. Lu T., Law C.K. A directed relation graph method for mechanism reduction, Proceedings of the Combustion Institute, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 1333-1341, DOI: 10.1016/j.proci.2004.08.145.
14. Lu T., Law C.K. On the applicability of directed relation graphs to the reduction of reaction mechanisms. Combustion and Flame, 2006, vol. 146, no. 3, pp. 472-483, DOI: doi:10.1016/j.combustflame.2006.04.017.

15. Lindstedt R.P., Maurice L.Q. Detailed Chemical-Kinetic Model for Aviation Fuels. Journal of Propulsion and Power, 2000, vol. 16, no. 2, pp. 187-195.

Козлова Мария Александровна. *Аспирант, инженер-исследователь отдела теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, РИНЦ AuthorID: 1157720, SPIN: 3200-4313, ORCID: 0000-0001-8860-6768, kma95@isem.irk.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.*

Шаманский Виталий Алексеевич. *К.х.н., с.н.с. отдела теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, РИНЦ AuthorID: 151206, SPIN: 4061-6797, ORCID: 0000-0002-4515-3444, vita@isem.irk.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.*

UDC 54.01, 519.1, 51-7
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.008

Application of graphs for the analysis of the mechanism of chemical kinetics

Mariia A. Kozlova, Vitaly A. Shamansky

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, *kma95@isem.irk.ru*

Abstract. The article describes a technique for constructing an oriented hypergraph of chemical reactions for a reacting system. The analysis of such a graph makes it possible to evaluate the influence of certain reactions and reaction paths (total reactions) on the chemical composition of the final products. In this work, all possible combinations of elementary reactions of hydrogen combustion in oxygen were enumerated, while the criterion for the connectivity of the corresponding graph was the formation of all substances from a pre-specified list, while the probability of termination was calculated.

Keywords: graph of chemical reactions, chemical kinetics, mathematical modeling, combustion processes

Acknowledgements: The research was funded by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-29-00406 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.CKP.21.0038).

References

1. Antipina E.V. Primenenie teorii grafov pri reshenii zadach modelirovaniya himicheskih reakcii [Application of graph theory in solving problems of modeling chemical reactions]. NovaInfo [NovaInfo], 2022, no. 130, pp. 4-5.
2. Feinberg M. Foundations of Chemical Reaction Network Theory, Applied Mathematical Sciences. New York, Springer International Publishing, 2019, vol. 202, pp. 454.
3. Craciun G., Feinberg M. Multiple Equilibria in Complex Chemical Reaction Networks: I. The Injectivity Property. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005, vol. 65, no. 5, pp. 1526-1546, DOI:10.1137/S0036139904440278.
4. Craciun G., Feinberg M. Multiple Equilibria in Complex Chemical Reaction Networks: I. The Species-Reaction Graph. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006, vol. 66, no. 4, pp. 1321-1338, DOI:10.1137/050634177.
5. García-Domenech R., Galvez J., de Julian-Ortiz J.V. Some New Trends in Chemical Graph Theory. Chemical Reviews, 2008, vol. 108, no. 3, pp. 1127-1169, DOI: 10.1021/cr0780006.
6. Socol M., Baldea I. A New Approach of Flow Graph Theory Applied in Physical Chemistry. Journal of the Chinese Chemical Society, 2006, vol. 53, no. 4, pp. 773-781.
7. Ismagilova A.S., Ahmetyanova A.I., Spivak S.I. teoretiko-grafovaya interpretaciya himicheskih soedinenii I himicheskih reakcii [Graph-theoretic interpretation of chemical compounds and chemical reactions]. Reports of the Bashkir State University. 2016. vol. 1. no. 1. pp. 36-39.
8. Spivak S.I., Ismagilova A.S., Stroikina I.A. Graphovo-theoreticheskaya interpretacia summarhih uravnenii himicheskih reaccii [Graph-theoretic interpretation of the total equations of chemical reactions]. Vestnik of the Bashkir State University [Reports of the Bashkir University], 2013, vol. 18, no. 2, pp. 300-302.
9. Kaganovich B.M., Filippof S.P., Anciferov E.G. Modelirovanie termodinamicheskih processof [Modeling of thermodynamic processes]. Novosibirsk: Nauka [Science], 1993, 101 p.
10. Gelfand B.E., Popov O.E., Chaivanov B.B. Vodorod: Parametri goreniya i vzriva [Hydrogen: Combustion and Explosion Parameters]. Moscow: Phismatlit [Fizmatlit], 2008, 288 p.
11. Chen Y., Chen J.-Y. Towards improved automatic chemical kinetic model reduction regarding ignition delays and flame speeds. Combustion and Flame, 2018, vol. 190, pp. 293-301, DOI:10.1016/j.combustflame.2017.11.024.

12. Gao X., Yang S., Sun W. A global pathway selection algorithm for the reduction of detailed chemical kinetic mechanisms. Combustion and Flame, 2016, vol. 167, pp. 238-247, DOI:10.1016/j.combustflame.2016.02.007.
13. Lu T., Law C.K. A directed relation graph method for mechanism reduction, Proceedings of the Combustion Institute, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 1333-1341, DOI: 10.1016/j.proci.2004.08.145.
14. Lu T., Law C.K. On the applicability of directed relation graphs to the reduction of reaction mechanisms. Combustion and Flame, 2006, vol. 146, no. 3, pp. 472-483, DOI: doi:10.1016/j.combustflame.2006.04.017.
15. Lindstedt R.P., Maurice L.Q. Detailed Chemical-Kinetic Model for Aviation Fuels. Journal of Propulsion and Power, 2000, vol. 16, no. 2, pp. 187-195.

Mariia Aleksandrovna Kozlova. *Postgraduate, research engineer in the Department of Thermal Power Systems, Institute of Energy Systems. L. A. Melentieva SB RAS, RSCI AuthorID: 1157720, SPIN: 3200-4313, ORCID: 0000-0001-8860-6768, kma95@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, st. Lermontova, 130.*

Vitaly Alekseevich Shamansky. *PhD in Chemistry, Senior Researcher in the Department of Thermal Power Systems, Institute of Energy Systems. L. A. Melentieva SB RAS, RSCI AuthorID: 151206, SPIN: 4061-6797, ORCID: 0000-0002-4515-3444, vita@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, st. Lermontova, 130.*

Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 19.09.2022; принята к публикации 01.11.2022.
The article was submitted 07/15/2022; approved after reviewing 09/19/2022; accepted for publication 11/01/2022.

УДК 629.12
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.009

Анализ параметров пространственного движения подводного глайдера дискообразной формы

Сухоруков Андрей Львович, Титов Максим Александрович
Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин»,
Россия, Санкт-Петербург, *su_andr@yahoo.com*

Аннотация. В работе построена математическая модель и определены параметры пространственного движения дискообразного глайдера модифицированной формы при маневрировании по глубине и курсу. Модификация заключалась в создании на корпусе глайдера профилированной кольцеобразной «проточки». Введение данного конструктивного элемента уменьшает значение опрокидывающего момента и увеличивает демпфирующий момент, что, в свою очередь, улучшает параметры устойчивости глайдера в вертикальной плоскости. Маневрирование осуществлялось за счет работы механизма изменения плавучести и механизма тонкой дифферентовки глайдера. Показано, что введение в конструкцию механизма тонкой дифферентовки позволяет оптимизировать угол атаки глайдера. Определены схемы работы механизмов изменения плавучести и тонкой дифферентовки, обеспечивающие устойчивое маневрирование глайдера дискообразной формы по глубине и курсу.

Ключевые слова: подводный планер, глайдер, пространственное маневрирование, дискообразная форма, избыточная плавучесть, устойчивость движения, гидродинамическое качество, угол атаки

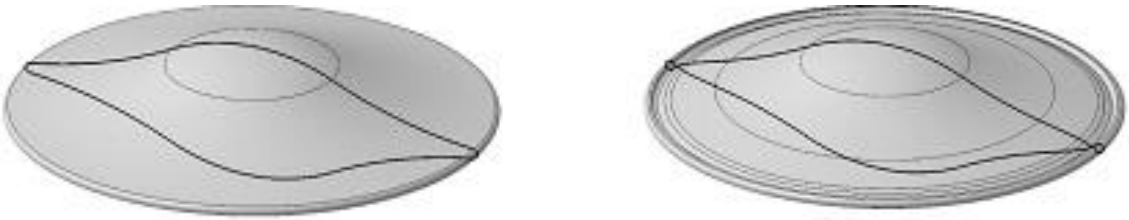
Цитирование: Сухоруков А.Л. Анализ параметров пространственного движения подводного глайдера дискообразной формы / А.Л. Сухоруков, М.А. Титов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 119-135. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.009.

Введение. Сегодня возрос интерес к проектированию автономных необитаемых подводных аппаратов с нетрадиционными принципами движения. Среди таких аппаратов выделяют подводные планеры (глайдеры). Важным достоинством этого типа аппаратов по сравнению с другими типами является существенная экономия энергии, затрачиваемой на движение, а также пониженное значение шумности. Движение подводных планеров осуществляется за счет многократного создания знакопеременной избыточной плавучести. Особое место среди таких аппаратов занимают глайдеры дискообразной формы, предложенные японскими специалистами [1]. Выбор данной формы аппарата определяется его «всенаправленностью», то есть способностью выполнять управляемое движение при погружении и всплытии в любом направлении.

При дискообразной форме корпуса встает вопрос об обеспечении устойчивости движения подводного аппарата в вертикальной плоскости вследствие большого значения позиционного опрокидывающего момента. В работе на основе численных методов динамики вязкой жидкости [2-4] проведен сопоставительный анализ гидродинамических характеристик глайдера с исходной дискообразной формой корпуса [1] и глайдера с модифицированной формой корпуса, предложенной авторами настоящей статьи. Определение коэффициентов позиционных и вращательных гидродинамических сил и моментов подводного аппарата осуществлялось на основе численного решения уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу [5-10]. Модификация заключалась в создании профилированной кольцеобразной «проточки» вблизи внешнего периметра аппарата симметрично на верхней и нижней частях корпуса. При этом радиус кривизны «проточки» выбирался близким к радиусу кривизны внешнего обвода дискообразного глайдера. Как показали результаты расчетов гидродинамических характеристик и последующее математическое моделирование параметров движения аппарата в вертикальной плоскости, создание «проточки» на корпусе подводного аппарата приводит к уменьшению опрокидывающего момента, увеличению коэффициента подъемной силы и улучшению параметров устойчивости глайдера при движении в вертикальной плоскости.

Построена математическая модель и определены параметры пространственного движения дискообразного глайдера модифицированной формы при маневрировании по глубине и курсу. Маневрирование осуществлялось за счет работы механизма изменения плавучести и механизма тонкой дифферентовки глайдера. Показана принципиальная возможность осуществления пространственных маневров глайдером дискообразной формы за счет работы указанных выше механизмов.

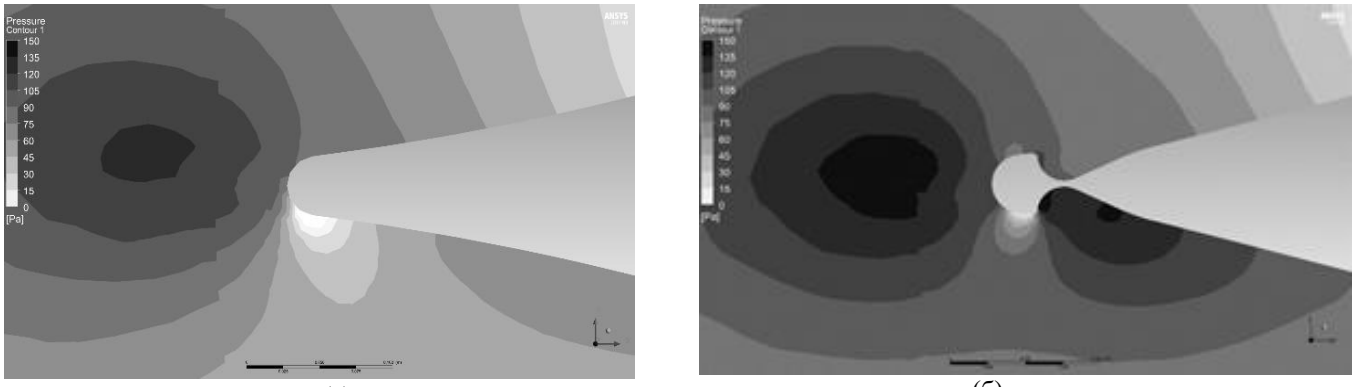
1. Конструктивные параметры подводного глайдера модифицированной формы. Подводный глайдер дискообразной формы, предложенный японскими специалистами, имеет диаметр корпуса 1,9 м, что позволило достаточно легко проводить операции по его сборке и техническому обслуживанию (рис.1). Высота корпуса аппарата 0,55 м, полное подводное водоизмещение аппарата составляет 0,535 м^3. Предполагается, что глайдер в исходном состоянии обладает нулевой плавучестью. Центр тяжести расположен на вертикальной оси симметрии аппарата, возвышение точки приложения архимедовой силы над центром тяжести (метацетрическая высота) составляет h=0,24 м. Момент инерции аппарата относительно горизонтальных осей симметрии составляет $J_{ox1} = J_{oz1} = 76{,}64$ кг·м^2, а относительно вертикальной оси симметрии $J_{oy1} =$ 143,08 кг·м^2.



(а) (б)

Рис. 1. Подводный глайдер исходной (а) и модифицированной (б) формы

Предложенная исходная форма аппарата [1] приводит к значительному опрокидывающему моменту при заданном угле атаки. Для уменьшения этого момента предложена модификация формы корпуса аппарата с созданием профилированной кольцеобразной «проточки» вблизи внешнего периметра аппарата симметрично на верхней и нижней частях корпуса. Такая профилировка приводит к значительному повышению статического давления потока в нижней кормовой части аппарата при положительных углах атаки за счет того, что в этом случае поток натекает на боковую стенку «проточки» (рис. 2). Кроме того, при положительных углах атаки с наличием «проточки» наблюдается уменьшение длины зоны разряжения в верхней носовой части глайдера (рис.3). Это, в свою очередь, приводит к уменьшению опрокидывающего момента, что улучшает параметры устойчивости подводного аппарата.



(а) (б)

Рис. 2. Распределение статического давления потока в районе кормовой части глайдера при угле атаки 15 градусов: (а) – исходная форма; (б) – модифицированная форма

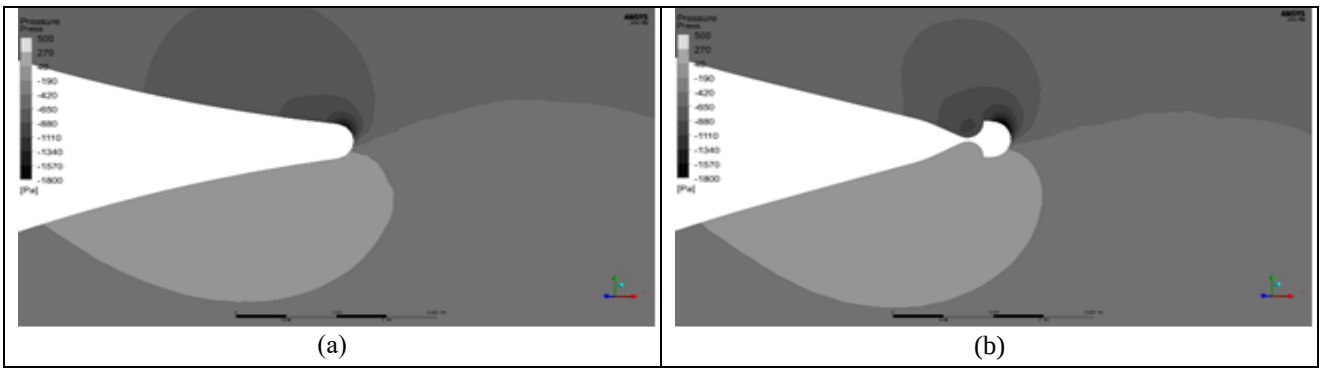


Рис. 3. Распределение статического давления потока в районе носовой части глайдера при угле атаки 15 градусов: (а) – исходная форма; (б) – модифицированная форма

Для управления маневрированием в корпусе глайдера установлен механизм изменения плавучести, состоящий из четырех гидроцилиндров 1-4 с поршнями и приводами. Схема механизма изменения плавучести и характерные размеры приведены на рисунке 4.

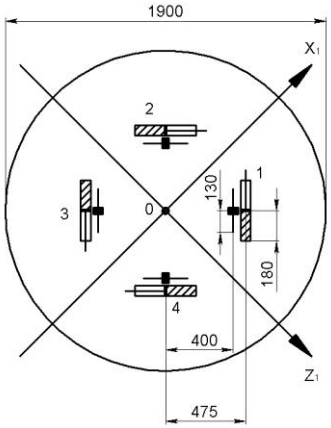


Рис. 4. Схема механизмов изменения плавучести и тонкой дифферентовки

Прием или удаление забортной воды из гидроцилиндров приводит к изменению плавучести глайдера относительно удифферентованного состояния. Также за счет работы механизма изменения плавучести возможно изменять точку приложения равнодействующей силы избыточной плавучести относительно вертикальной оси симметрии глайдера. Характеристики гидроцилиндров принимались в соответствии с данными работы [1]. Так удаляемый или принимаемый объем воды в каждом гидроцилиндре составляет 0,001 м^3, при этом ход поршня на удаление или прием равен 180 мм.

Кроме того, в корпусе глайдера установлен механизм тонкой дифферентовки состоящий из четырех дифферентовочных грузов массой 7,64 кг каждый, перемещающихся по направляющим стержням (рис. 4). Ход каждого дифферентовочного груза составляет 260 мм. Задействование данного механизма позволяет изменять угол дифферента и угол атаки глайдера без изменения избыточной плавучести.

Маневрирование глайдера по глубине осуществляется за счет смещения точки приложения равнодействующей силы избыточной плавучести относительно оси вертикальной оси OY_1. При этом для маневрирования лишь в вертикальной плоскости точка приложения равнодействующей силы избыточной плавучести должна находиться в плоскости X_1OY_1. Для маневрирования глайдера по курсу необходимо смещение точки приложения равнодействующей силы избыточной плавучести относительно плоскости X_1OY_1. Далее при моделировании параметров движения глайдера будут рассмотрены различные режимы работы механизма изменения плавучести и механизма тонкой дифферентовки.

2. Численное определение гидродинамических характеристик глайдера модифицированной формы. Гидродинамические характеристики глайдера определялись с исполь-

зованием программного комплекса ANSYS/Fluent, вычислительные процедуры которого базируются на численном решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Для обеспечения требуемой точности расчета, связанной с корректным разрешением турбулентного пограничного слоя, задавалось сгущение узлов вычислительной сетки у поверхности глайдера. Расчет проводился на основе $k-\omega\ SST$ модели турбулентности. На входных границах расчетной области задавалась скорость набегающего потока, на выходных задавалось статическое давление в потоке на бесконечности, на поверхности объекта ставились условия прилипания и непротекания. Расчет проводился для разных углов атаки и дрейфа при скоростях набегающего потока 1 м/с и 2 м/с. Определялись гидродинамические силы и моменты, действующие на глайдер. Коэффициенты позиционных гидродинамических сил и моментов определялись на основе соотношений:

– в поточной системе координат:

$$F_x = c_x(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3};\quad F_y = c_y(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3};\quad M_z = m_z(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V, \tag{1}$$

где ρ_w – плотность набегающего потока; v_0 – скорость набегающего потока; V – водоизмещение аппарата;

– в связанной с глайдером системе координат:

$$F_{x1} = c_{x1}(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3};\quad F_{y1} = c_{y1}(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3};\quad M_{z1} = m_{z1}(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V;$$

$$F_{z1} = c_{z1}(\beta)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3}, \tag{2}$$

где ρ_w – плотность набегающего потока; v_0 – скорость набегающего потока; V – водоизмещение глайдера; α – угол атаки; β – угол дрейфа.

Затем полученные зависимости коэффициентов позиционных гидродинамических сил и моментов аппроксимировались степенными полиномами от угла атаки α.

На рисунках ниже (рис.5-9) представлены графики зависимостей коэффициентов позиционных гидродинамических сил и моментов для глайдеров исходной и модифицированной формы.

Приведенные зависимости аппроксимировались полиномами следующего вида:

$$c_x(\alpha) = c_x^0 + c_x^{\alpha^2}\alpha^2 + c_x^{\alpha^4}\alpha^4; \tag{3}$$

$$c_y(\alpha) = c_y^{\alpha}\alpha + c_y^{\alpha|\alpha|}\alpha|\alpha| + c_y^{\alpha^3}\alpha^3 + c_y^{\alpha^3|\alpha|}\alpha^3|\alpha| \tag{4}$$

Соответствующие значения коэффициентов полиномов для глайдера модифицированной формы в поточной системе координат приведены в таблице 1.

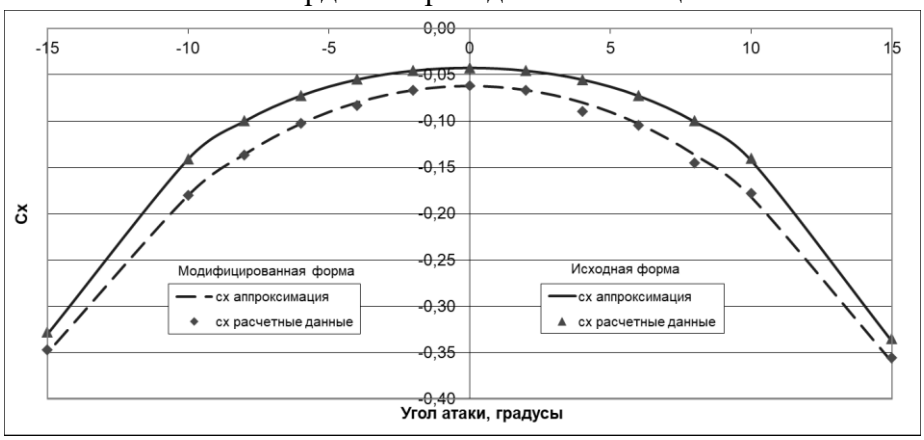


Рис. 5. График изменения коэффициента силы сопротивления $c_x(\alpha)$

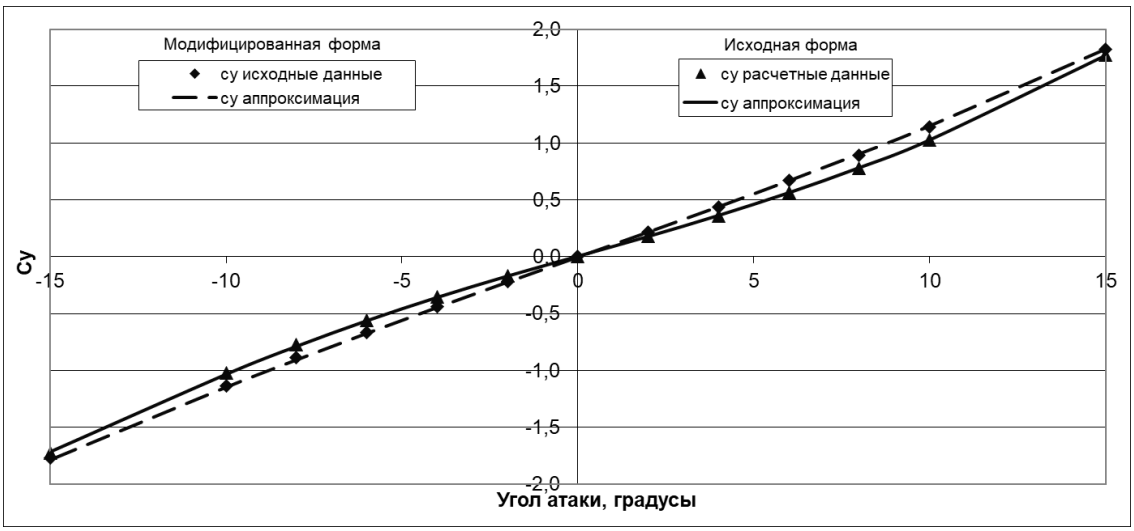


Рис. 6. График изменения коэффициента подъемной силы $c_y(\alpha)$

Таблица 1. Значения коэффициентов полиномов

№ п/п	Коэффициент	Значение
1		
1.1	C_x^0	-0,062
1.2	$C_x^{\alpha^2}$	-3,611
1.3	$C_x^{\alpha^4}$	-10,777
2		
2.1	C_y^{α}	6,271
2.2	$C_y^{\alpha\|\alpha\|}$	0,328
2.3	$C_y^{\alpha^3}$	9,405
2.4	$C_y^{\alpha^3\|\alpha\|}$	-1,078

Далее приведены соответствующие графики зависимостей в связанной с глайдером системе координат.

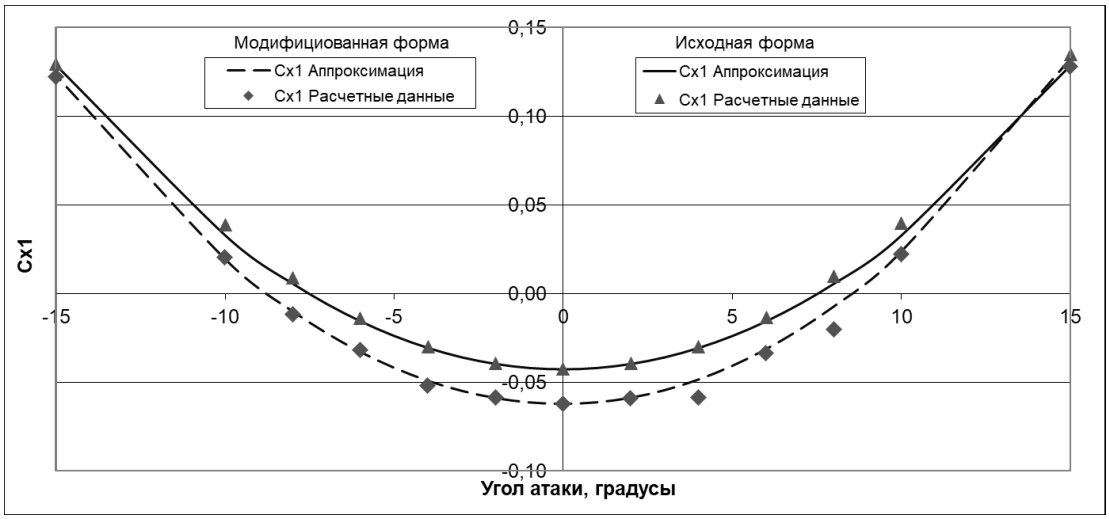


Рис. 7. График изменения коэффициента продольной силы $c_{x1}(\alpha)$

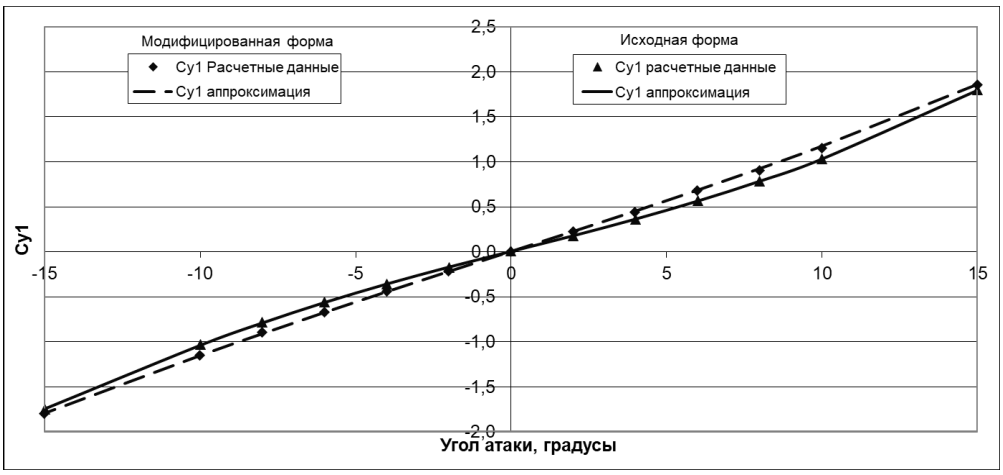


Рис. 8. График изменения коэффициента нормальной силы $c_{y1}(\alpha)$

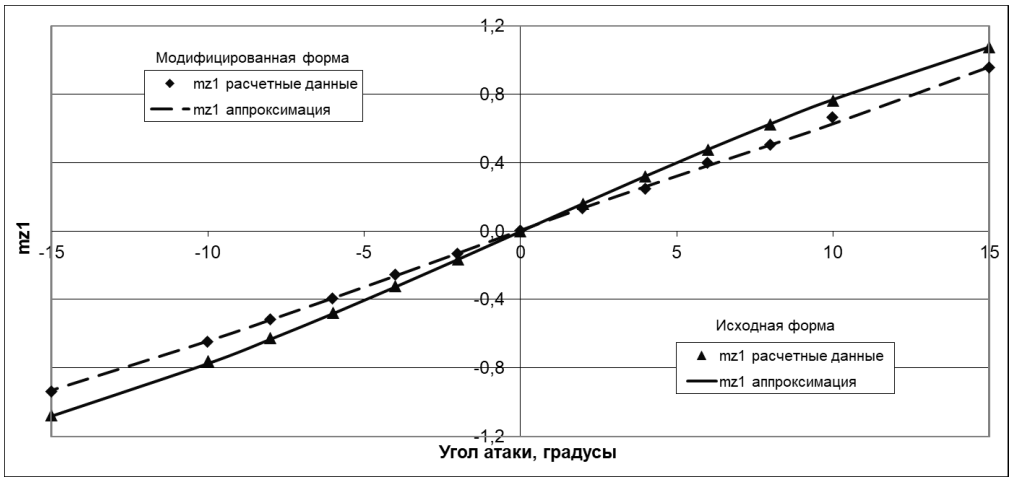


Рис. 9. График изменения коэффициента продольного момента $m_{z1}(\alpha)$

Приведенные выше зависимости аппроксимировались полиномами следующего вида:

$$c_{x_1}(\alpha) = c_{x_1}^{0} + c_{x_1}^{\alpha^2}\alpha^2 + c_{x_1}^{\alpha^4}\alpha^4 \tag{5}$$

$$c_{y_1}(\alpha) = c_{y_1}^{\alpha}\alpha + c_{y_1}^{\alpha|\alpha|}\alpha|\alpha| + c_{y_1}^{\alpha^3}\alpha^3 + c_{y_1}^{\alpha^3|\alpha|}\alpha^3|\alpha| \tag{6}$$

$$m_{z_1}(\alpha) = m_{z_1}^{\alpha}\alpha + m_{z_1}^{\alpha|\alpha|}\alpha|\alpha| + m_{z_1}^{\alpha^3}\alpha^3 \tag{7}$$

$$c_{z_1}(\beta) = c_{z_1}^{\beta}\beta \tag{8}$$

Соответствующие значения коэффициентов полиномов приведены в таблице 2:

Таблица 2. Значения коэффициентов полиномов

№ п/п	Коэффициент	Значение
1		
1.1	$C_{x_1}^{0}$	-0,062
1.2	$C_{x_1}^{\alpha^2}$	2,790
1.3	$C_{x_1}^{\alpha^4}$	0,539
2		

№ п/п	Коэффициент	Значение
2.1	$C_{y_1}^{\alpha}$	6,334
2.2	$C_{y_1}^{\alpha\lvert\alpha\rvert}$	0,657
2.3	$C_{y_1}^{\alpha^3}$	8,464
2.4	$C_{y_1}^{\alpha^3\lvert\alpha\rvert}$	-0,11
3		
3.1	$C_{z_1}^{\beta}$	-0,050
4		
4.1	$m_{z_1}^{\alpha}$	3,852
4.2	$m_{z_1}^{\alpha\lvert\alpha\rvert}$	-3,283
4.3	$m_{z_1}^{\alpha^3}$	9,593

Кроме того, с использованием методики задания вращательных колебаний объекта в потоке жидкости [3] численно определялись демпфирующие вращательные характеристики глайдера с модифицированной формой корпуса: $c_{y_1}^{\omega_{z_1}} = -16,25$; $m_{x_1}^{\omega_{x1}} = -0,55$; $m_{z_1}^{\omega_{z1}} = -4,21$. Значение коэффициента $m_{y_1}^{\omega_{y1}}$, определяющего демпфирующий момент со стороны вязких сил при вращении глайдера относительно вертикальной оси, рассчитывалось на основе аналитических соотношений для вращающегося в жидкости диска по методике [11] и составило $m_{y_1}^{\omega_{y1}} = -0,075$

Коэффициенты присоединенных масс глайдера определялись на основе метода граничных интегральных уравнений для потенциала скорости. Расчетные значения коэффициентов присоединенных масс составили: $k_{11} = k_{33} = 0,168$; $k_{22} = 3,787$; $k_{44} = k_{66} = 3,276$. Наличие «проточки» слабо влияет на приведенные расчетные значения коэффициентов присоединенных масс. Отметим, что возможна приближенная аналитическая оценка этих коэффициентов по методике [12], в рамках которой корпус объекта схематизируется эллипсоидом. При этом было получено хорошее согласование значений коэффициентов присоединенных масс, полученных двумя методами.

3. Математическая модель пространственного движения глайдера. Уравнения пространственного движения подводного глайдера в проекциях на оси связанной системы $OX_1Y_1Z_1$ (рис. 10) получены на основе соотношений, приведенных в [13, 14]:

$$m(1+k_{11})\frac{dv_{x1}}{dt} = c_{x1}(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3} + m(1+k_{22})v_{y1}\omega_{z1} - m(1+k_{33})v_{z1}\omega_{y1} + p\sin\psi \quad ;$$

$$m(1+k_{22})\frac{dv_{y1}}{dt} = c_{y1}(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3} + c_{y1}^{\omega z1}\frac{\rho_w v_0}{2}\omega_{z1}V -$$
$$-m(1+k_{11})v_{x1}\omega_{z1} + m(1+k_{33})v_{z1}\omega_{x1} + p\cos\psi\cos\theta \quad ; \qquad (9)$$

$$m(1+k_{33})\frac{dv_{z1}}{dt}=c_{z1}^{\beta}\frac{\rho_w v_0}{2}V^{2/3}v_{z1}-m(1+k_{22})v_{y1}\omega_{x1}+m(1+k_{11})v_{x1}\omega_{y1}-p\cos\psi\sin\theta;$$

$$J_{ox1}(1+k_{44})\frac{d\omega_{x1}}{dt}=m_{x1}^{\omega x1}\frac{\rho_w v_0}{2}\omega_{x1}V^{4/3}-\left[J_{oz1}(1+k_{66})-J_{oy1}(1+k_{55})\right]\omega_{z1}\omega_{y1}-$$
$$-\rho_w Vgh\sin\theta\cos\psi-p(z_p\cos\theta+y_p\sin\theta)\cos\psi-\tilde{p}(z_n\cos\theta+y_n\sin\theta)\cos\psi;$$

$$J_{oy1}(1+k_{55})\frac{d\omega_{y1}}{dt}=m_{y1}^{\omega y1}\frac{\rho_w v_0}{2}\omega_{y1}V^{4/3}-\left[J_{ox1}(1+k_{44})-J_{oz1}(1+k_{66})\right]\omega_{x1}\omega_{z1}+$$
$$+p(x_p\cos\psi\sin\theta+z_p\sin\psi)+\tilde{p}(x_n\cos\psi\sin\theta+z_n\sin\psi);$$

$$J_{oz1}(1+k_{66})\frac{d\omega_{z1}}{dt}=m_{z1}(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V+m_{z1}^{\omega z1}\frac{\rho_w v_0}{2}\omega_{z1}V^{4/3}-J_{oy1}(1+k_{55})\omega_{x1}\omega_{y1}+$$
$$+J_{ox1}(1+k_{44})\omega_{x1}\omega_{y1}-\rho_w Vgh\sin\psi+p(x_p\cos\psi\cos\theta-y_p\sin\psi)+$$
$$+\tilde{p}(x_n\cos\psi\cos\theta-y_n\sin\psi);$$

$$\frac{d\psi}{dt}=\frac{\omega_{z1}}{\cos\theta};$$

$$\frac{d\theta}{dt}=\omega_{x1}-tg\psi\left[\omega_{y1}-\omega_{z1}\theta\right];$$

$$\frac{d\varphi}{dt}=\frac{1}{\cos\psi}\left[\omega_{y1}-\omega_{z1}\theta\right];$$

$$\alpha=-arctg\frac{v_{y1}}{v_{x1}},$$

где ρ_w – плотность воды; V – водоизмещение глайдера; v_{x1}, v_{y1}, v_{z1} – проекции вектора скорости грайдера на оси OX_1, OY_1, OZ_1; v_0 – абсолютная величина вектора скорости грайдера; m – масса глайдера; $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$ – угловые скорости вращения глайдера относительно осей OX_1, OY_1, OZ_1; $J_{ox1}, J_{oy1}, J_{oz1}$ – моменты инерции корпуса глайдера относительно осей OX_1, OY_1, OZ_1; $k_{11}, k_{22}, k_{44}, k_{66}$ – коэффициенты присоединенных масс глайдера; $c_{x1}, c_{y1}, c_{z1}^{\beta}, m_{z1}$ – коэффициенты позиционных гидродинамических сил и моментов; $c_{y1}^{\omega z1}, m_{x1}^{\omega x1}, m_{y1}^{\omega y1}, m_{z1}^{\omega z1}$ – коэффициенты вращательных гидродинамических сил и моментов; h – метацентрическая высота; p – избыточная плавучесть; x_p, y_p, z_p – плечи равнодействующей силы избыточной плавучести в связанной системе координат; $\tilde{p}$ – суммарный вес дифферентовочных грузов; x_n, y_n, z_n – плечи дифферентовочного момента в связанной системе координат; ψ – угол дифферента; θ – угол крена; φ – курсовой угол; α – угол атаки глайдера.

Зная компоненты вектора скорости глайдера в связанной системе координат, с помощью матрицы направляющих косинусов [13] могут быть получены компоненты вектора скорости глайдера в неподвижной системе координат:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\psi & \sin\theta\sin\varphi-\cos\theta\cos\varphi\sin\psi & \cos\theta\sin\varphi+\sin\theta\cos\varphi\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\theta\cos\psi & -\sin\theta\cos\psi \\ -\cos\psi\sin\varphi & \sin\theta\cos\varphi+\cos\theta\sin\varphi\sin\psi & \cos\varphi\cos\theta-\sin\varphi\sin\theta\sin\psi \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Тогда могут быть определены параметры траектории глайдера:

$$x(t)=\int_0^t v_x(t)dt \quad ; \quad y(t)=\int_0^t v_y(t)dt \quad ; \quad z(t)=\int_0^t v_z(t)dt \quad . \tag{11}$$

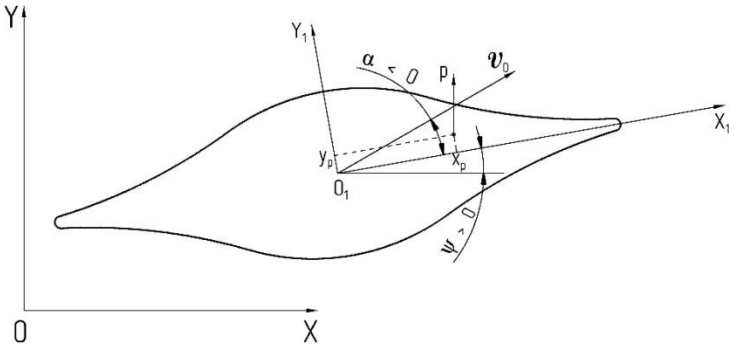


Рис. 10. Используемые системы координат

В работе [15] были получены соотношения для оценки оптимальных параметров движения глайдера с заданной формой корпуса. Следуя классической теории несущей поверхности, запишем формулу для гидродинамического качества в виде:

$$K=\frac{c_y^{\alpha}\alpha}{c_x^0+c_x^{\alpha^2}\alpha^2}, \tag{12}$$

Дифференцируя (12) по углу атаки и приравнивая эту производную нулю, нетрудно найти оптимальный угол атаки α_{opt}, обеспечивающий максимальное гидродинамическое качество и максимальную дальность планирования. А также соответствующие этому углу значения коэффициента подъемной силы c_{yopt} и максимального гидродинамического качества $K_{\max}$. Имеем:

$$\alpha_{opt}=\sqrt{\frac{c_x^0}{c_x^{\alpha^2}}} \quad ; \quad c_{yopt}=c_y^{\alpha}\sqrt{\frac{c_x^0}{c_x^{\alpha^2}}} \quad ; \quad K_{\max}=\frac{c_y^{\alpha}}{2\sqrt{c_x^{\alpha^2}c_x^0}} \quad . \tag{13}$$

Если оптимальный режим планирования реализуется, то соответствующая ему скорость на траектории равна:

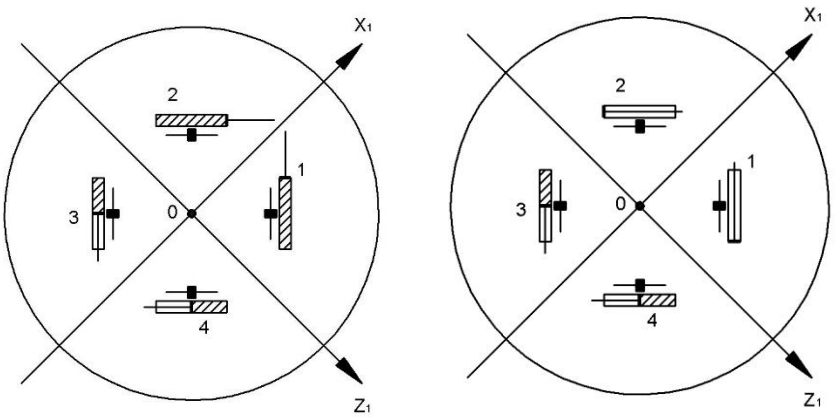
$$v_{opt}=\sqrt{\frac{2p}{\rho_w V^{2/3}\sqrt{\frac{\left(c_y^{\alpha}\right)^2}{c_x^{\alpha^2}}c_x^0+4\left(c_x^0\right)^2}}} \quad . \tag{14}$$

Для глайдера модифицированной формы оптимальное значение угла атаки α_{opt} при котором реализуется максимальное гидродинамическое качество составляет: $\alpha_{opt}=7{,}51^{\circ}$, $K_{\max}=6{,}62$.

4. Результаты моделирования движения глайдера. Как отмечалось выше, движение глайдера осуществляется за счет работы механизмов изменения плавучести и тонкой дифферентовки. Вначале рассмотрим режим маневрирования глайдера в вертикальной плоскости XOY. Режим погружения осуществляется за счет смещения штоков поршней гидроцилиндров 1 и 2 на прием забортной воды (рис. 11а).

При этом глайдер получает отрицательною плавучесть соответствующую 0,002 м^3. Из простейших геометрических соображений могут быть определены координаты равнодействующей точки приложения отрицательной избыточной плавучести:

$$x_p = 475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} = 400мм; \quad y_p = 0; \quad z_p = 0. \tag{15}$$



(а) (б)

Рис. 11. Схемы работы механизма изменения плавучести в режиме погружения (а) и всплытия (б) глайдера в вертикальной плоскости без задействования механизма тонкой дифферентовки

Всплытие осуществляется за счет удаления воды из гидроцилиндров 1 и 2 (рис. 11б), тогда:

$$x_p = 475\sqrt{2} - \frac{475 + \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} = 272мм; \quad y_p = 0; \quad z_p = 0. \tag{16}$$

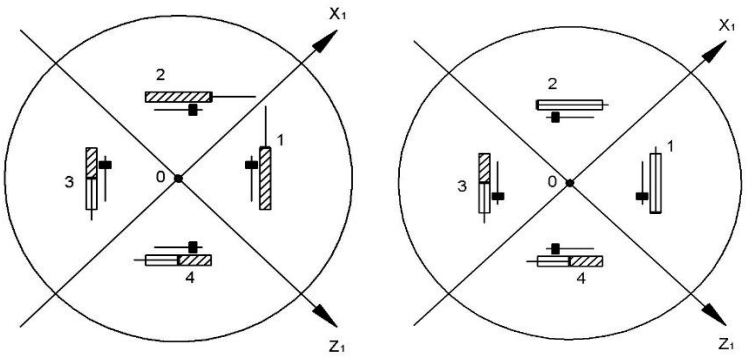
Для выхода на оптимальный угол атаки при погружении – всплытии глайдера возможно задействование механизма тонкой дифферентовки. При погружении все дифферентующие грузы смещаются в направлении оси OX_1 (рис. 12а), а при всплытии – в обратном направлении (рис. 12б).

Плечи дифферентующего момента от смещения грузов при погружении:

$$\tilde{x}_p = \frac{1}{4}\left[2\left(400\sqrt{2} - \frac{400-130}{\sqrt{2}}\right) - 2\left(400\sqrt{2} - \frac{400+130}{\sqrt{2}}\right)\right] = 92мм; \quad \tilde{y}_p = 0; \; \tilde{z}_p = 0. \tag{17}$$

Значения плеч дифферентующего момента при всплытии (см рис. 12б) равны:

$$\tilde{x}_p = -92мм; \quad \tilde{y}_p = 0; \quad \tilde{z}_p = 0. \tag{18}$$

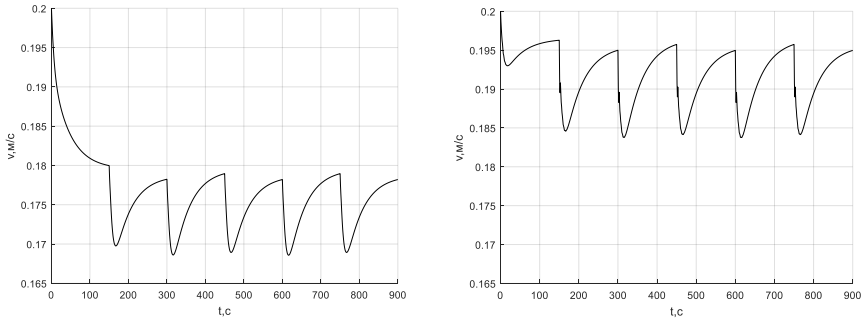


(а) (б)

Рис. 12. Схемы работы механизма изменения плавучести в режиме погружения (а) и всплытия (б) глайдера в вертикальной плоскости с задействованием механизма тонкой дифферентовки

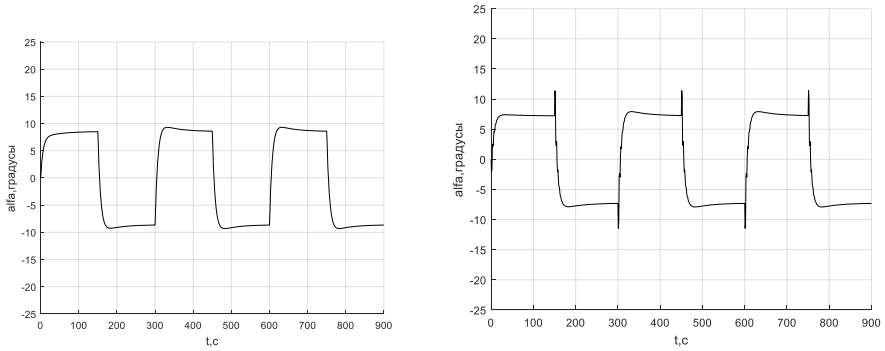
На приведенных ниже рисунках (рис.13-15) приведены параметры движения глайдера с модифицированной формой корпуса при действии знакопеременной избыточной плавучести с периодом 300 секунд. Отметим, что такое резкое изменение плавучести является модельным, в практических расчетах при определении изменения плавучести следует учитывать расходные характеристики насоса. В качестве начальных условий задавалась скорость движения глайдера 0,2 м/с с нулевым дифферентом. Слева приведены графики параметров движения глайдера без задействования механизма тонкой дифферентовки, справа с задействованием механизма тонкой дифферентовки.

Как показывают результаты моделирования, задействование механизма тонкой дифферентовки немного уменьшает угол атаки глайдера в установившемся движении и приближает его к оптимальному значению. При этом увеличиваются скорость движения глайдера и, соответственно, пройденный им путь.



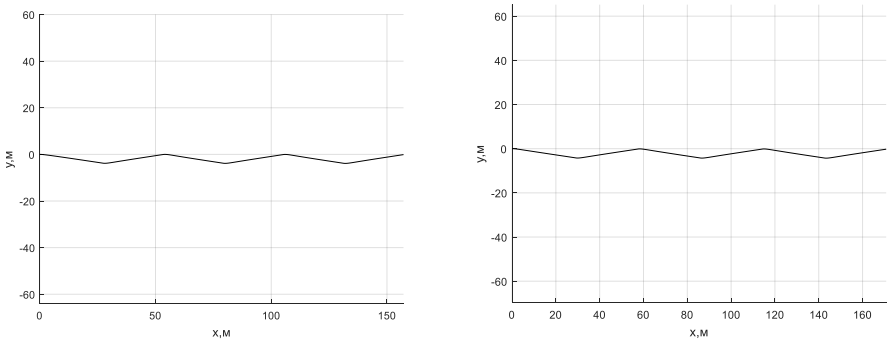
(а) (б)

Рис. 13. Зависимость скорости движения глайдера от времени: (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки; (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки



(а) (б)

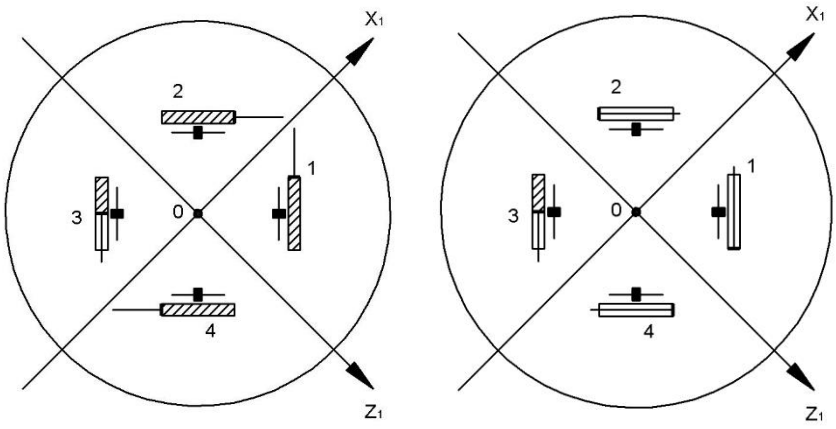
Рис. 14. Зависимость угла атаки глайдера от времени: (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки;(б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки



(а) (б)

Рис. 15. Траектория движения глайдера: (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки; (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки

Пространственное маневрирование глайдера по курсу осуществляется за счет смещения точки приложения равнодействующей силы избыточной плавучести относительно оси OX_1 на плечо z_p. Схема работы механизма избыточной плавучести при погружении глайдера с креном на правый борт приведена на рис.16а.



(а) (б)

Рис. 16. Схемы работы механизма изменения плавучести при маневрировании по курсу в режиме погружения (а) и всплытия (б) глайдера без задействования механизма тонкой дифферентовки

При этом забортная вода принимается в гидроцилиндры 1, 2 и 4. Значения плеч, соответствующие приему в гидроцилиндр 4 объема воды 0,001м^3, равны:

$$x_{p4} = -\left(475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}}\right) = -400мм; \quad y_{p4} = 0; \quad z_{p4} = \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} = 272мм. \tag{19}$$

Тогда плечи точки приложения равнодействующей силы отрицательной плавучести, соответствующей приему забортной воды 0,003м^3 равны:

$$x_p = \frac{1}{3}\left[2\left(475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}}\right) - \left(475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}}\right)\right] = 133мм; \quad y_p = 0;$$

$$z_p = \frac{1}{3}\frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} = 91мм. \tag{20}$$

Всплытие с креном на левый борт осуществляется за счет удаления воды из гидроцилиндров 1,2 и 4 (рис.16б). Значения плеч положительной избыточной плавучести, соответствующие удалению из гидроцилиндра 4 объема воды 0,001м^3, равны:

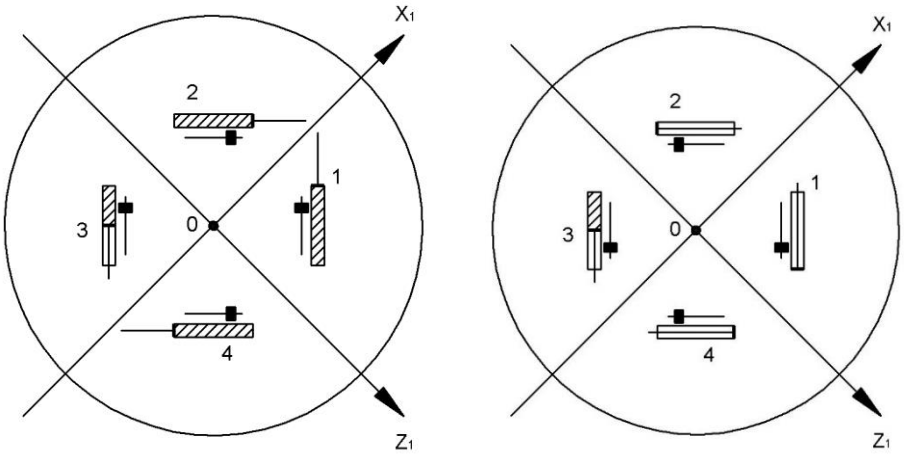
$$x_{p4} = -\left(\frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}}\right) = -272мм; \quad y_{p4} = 0; \quad z_{p4} = 475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} = 400мм. \tag{21}$$

Тогда плечи точки приложения равнодействующей силы положительной плавучести, соответствующей удалению воды 0,003м^3, равны:

$$x_p = \frac{1}{3}\left[2\left(475\sqrt{2} - \frac{475 + \frac{180}{2}}{\sqrt{2}}\right) - \left(\frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}}\right)\right] = 91мм \quad ; \quad y_p = 0;$$

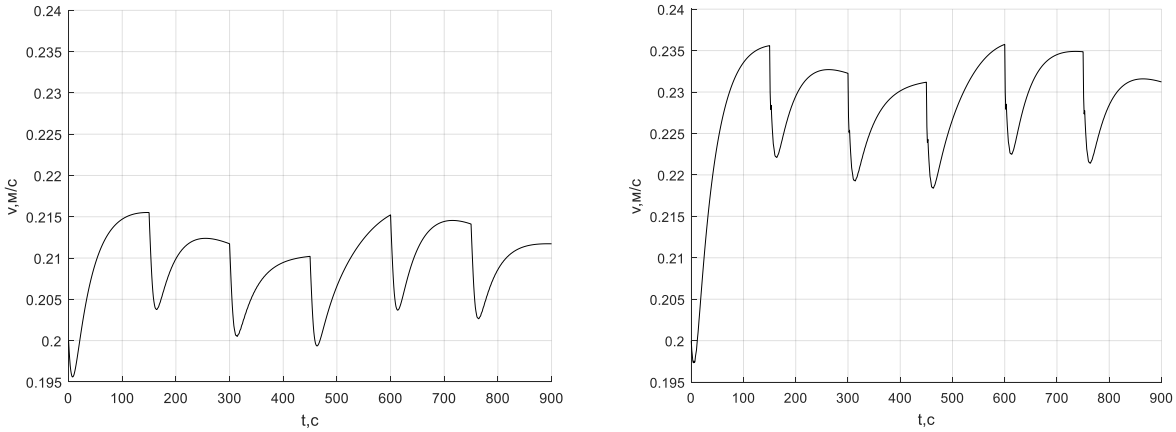
$$z_p = \frac{1}{3}\left(475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}}\right) = 133мм. \tag{22}$$

Маневрирование в противоположную по курсу сторону осуществляется аналогичным образом за счет задействования гидроцилиндра 3. На приведенных ниже рисунках (рис. 17-19) приведены параметры движения глайдера с модифицированной формой корпуса при действии знакопеременной избыточной плавучести с периодом 300 секунд. После 450 секунд осуществлялась смена курса на противоположный. Слева приведены графики параметров движения глайдера без задействования механизма тонкой дифферентовки, справа с задействованием механизма тонкой дифферентовки (рис.17).



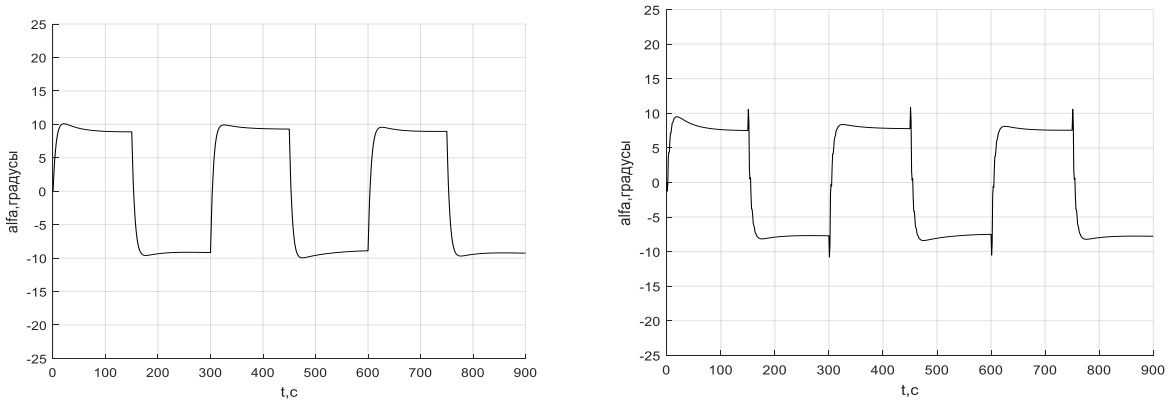
(а) (б)

Рис. 17. Схемы работы механизма изменения плавучести при маневрировании по курсу в режиме погружения (а) и всплытия (б) глайдера с задействованием механизма тонкой дифферентовки



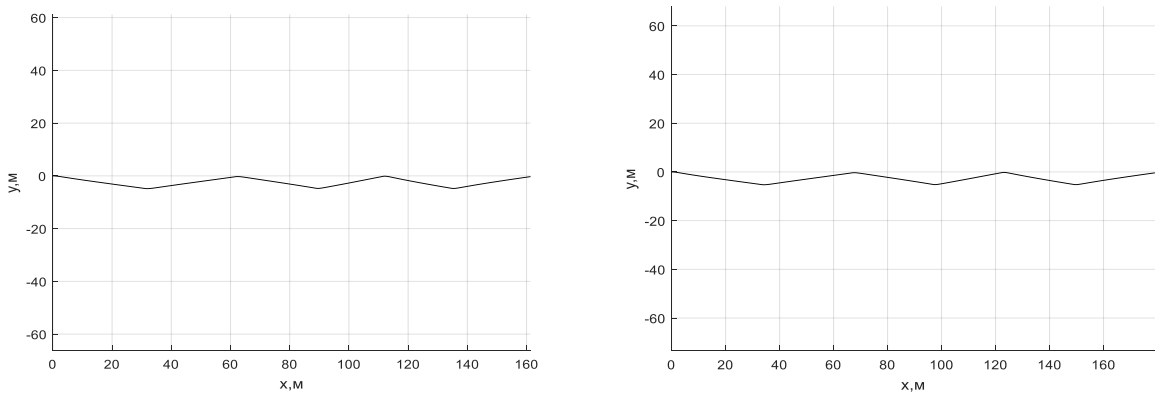
(а) (б)

Рис. 18. Зависимость скорости движения глайдера от времени при маневрировании по курсу:
(а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки;
(б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки



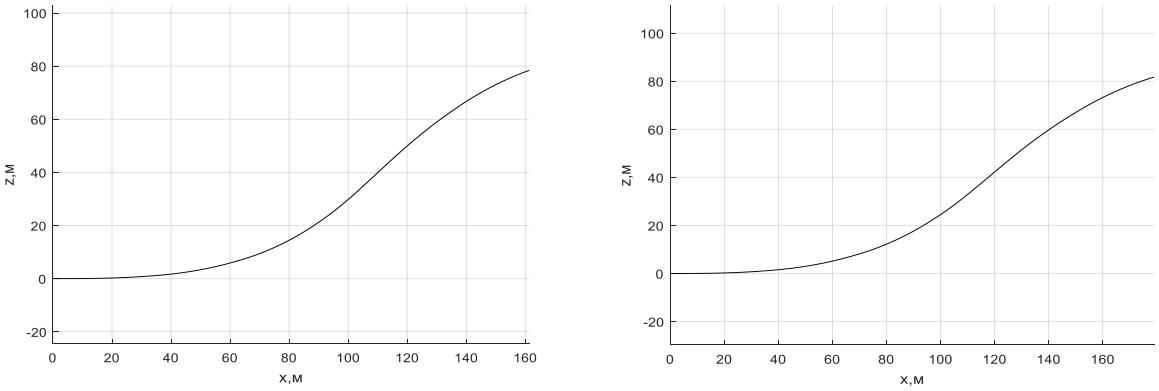
(а) (б)

Рис. 19. Зависимость угла атаки глайдера от времени при маневрировании по курсу:
(а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки;
(б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки



(а) (б)

Рис. 20. Траектория движения глайдера в плоскости XOY:
(а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки;
(б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки



(а) (б)

Рис. 21. Траектория движения глайдера в плоскости XOZ: (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки; (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки

Результаты моделирования показывают, что скорость движения глайдера при маневрировании по глубине и курсу увеличивается по сравнению со случаем движения лишь в вертикальной плоскости за счет увеличения абсолютного значения избыточной плавучести (0,003м^3). Как и ранее, задействование механизма тонкой дифферентовки немного уменьшает угол атаки глайдера в установившемся движении и приближает его к оптимальному значению. При этом увеличиваются скорость движения глайдера и, соответственно, пройден-

ный им путь. Маневрирование глайдера по курсу происходит достаточно эффективно как с задействованием, так и без задействования механизма тонкой дифферентовки.

Заключение. В работе проведен анализ параметров движения подводного глайдера модифицированной дискообразной формы как при маневрировании в вертикальной плоскости, так и в пространстве. Показано, что введение в конструкцию механизма тонкой дифферентовки позволяет оптимизировать угол атаки глайдера. Определены схемы работы механизмов изменения плавучести и тонкой дифферентовки, обеспечивающие устойчивое маневрирование глайдера дискообразной формы по глубине и курсу. Отметим, что представленный подход позволяет рассматривать и иные схемы размещения гидроцилиндров, направляющих стержней и дифферентовочных грузов в корпусе глайдера.

Таким образом, показана принципиальная возможность осуществления пространственного устойчивого маневрирования подводного глайдера дискообразной формы за счет работы механизма изменения плавучести.

Список источников

1. Koterayama W., Nakamura M., Ito Y., Yoshimura H. Autonomous underwater vehicle for practical use in ocean observations. Proceedings of the tenth (2012) ISOPE pacific/Asia offshore mechanics symposium. Vladivostok, Russia, October 3-5, 2012, pp. 170-175.
2. Сухоруков А.Л. Об устойчивости подводного планера – глайдера на балансировочных режимах движения / А.Л. Сухоруков, М.А. Титов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2016. – № 3. – С. 66-79.
3. Сухоруков А.Л. Об использовании численных методов динамики вязкой жидкости для определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов / А.Л. Сухоруков, М.А. Титов, И.А. Чернышев // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2016. – № 2. – С. 52-61.
4. Сухоруков А.Л. Теория подводных тросовых систем и ее инженерные приложения / А.Л. Сухоруков // М.: Физматлит, 2017. – 272 с.
5. Патент № 2731817 Российская Федерация, МПК B63B 71/00 (2020.01), B63H 25/00 (2006.01), G06F 30/15 (2020.01). Способ определения демпфирующих гидродинамических характеристик подводного объекта: №2020108419: заявл. 26.02.2020: опубл. 08.09.2020 / Сухоруков А.Л., Чернышев И.А.; заявитель ЦКБ МТ «Рубин». – 12 с.
6. Патент № 2746488 Российская Федерация, МПК B63H 25/00 (2006.01), G05D 11/00 (2006.01), B63G 8/00 (2006.01). Способ определения позиционных гидродинамических характеристик подводного объекта: №2020125700: заявл. 27.07.2020: опубл. 14.04.2021 / Сухоруков А.Л., Титов М.А.: заявитель ЦКБ МТ «Рубин». – 14 с.
7. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. // М.: Мир, 1990. – т .2. – 384 с.
8. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер // М.:Мир, 1991. – т. 2 – 552 с.
9. Рихтмайер Р. Численное решение задач гидромеханики / Р. Рихтмайер // М.: Мир, 1977. – 208 с.
10. Олдер Б. Вычислительные методы в гидродинамике / Б. Олдер, С. Фернбах, М. Ротенберг // М.: Мир, 1967. – 384 с.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг // М.: Наука, 1974. – 712 с.
12. Короткин А.И. Присоединенные массы судостроительных конструкций / А.И. Короткин // СПб.: Морвест, 2007. – 448 с.
13. Пантов Е.Н. Основы теории движения подводных аппаратов / Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов // Л.: Судостроение, 1973. – 216 с.
14. Рождественский В.В. Динамика подводной лодки / В.В. Рождественский // Л.: Судостроение, 1970. – т. 1. – 352 с.
15. Рождественский К.В. Параметрический анализ установившегося движения подводного глайдера в вертикальной плоскости / К.В. Рождественский // Морские интеллектуальные технологии, 2016. – т. 2. – № 3(33). – С. 7-14.

Сухоруков Андрей Львович. *Доктор технических наук, заместитель начальника проектного отдела АО «Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин», AuthorID: 446484, SPIN: 5811-3828, su_andr@yahoo.com, 191119, Санкт-Петербург, ул. Марата, 90.*

Титов Максим Александрович. *Инженер 1 категории высшей квалификации проектного отдела АО «Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин», 191119, Санкт-Петербург, ул. Марата, 90.*

UDC 629.12
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.009

Analysis of the spatial motion parameters of an underwater disk-shaped glider

Andrey L. Sukhorukov, Maxim A. Titov
Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin»,
Russia, Saint-Petersburg, *su_andr@yahoo.com*

Abstract. In this work, a mathematical model is built and the parameters of the spatial movement of a modified disk-shaped glider are determined when maneuvering in depth and course. The modification consisted in creating a profiled annular "groove" on the body of the glider. The introduction of this structural element reduces the value of the overturning moment and increases the damping moment, which, in turn, improves the stability parameters of the glider in the vertical plane. Maneuvering was carried out due to the operation of the mechanism for changing the buoyancy and the mechanism for fine trimming the glider. It is shown that the introduction of a fine trim mechanism into the design makes it possible to optimize the angle of attack of the glider. The schemes of operation of the mechanisms for changing buoyancy and fine trim were determined, which ensure stable maneuvering of a disk-shaped glider in depth and course.

Keywords: underwater glider, glider, three-dimensional maneuvering, disk-like shape, excessive buoyancy, motion stability, hydrodynamic quality, angle of attack

References

1. Koterayama W., Nakamura M., Ito Y., Yoshimura H. Autonomous underwater vehicle for practical use in ocean observations. Proceedings of the tenth (2012) ISOPE pacific/Asia offshore mechanics symposium. Vladivostok, Russia, October 3-5, 2012, pp. 170-175.
2. Sukhorukov A.L., Titov M.A. Ob ustoychivosti podvodnogo planera – glaydera na balansirovochnykh rezhimakh dvizheniy [On the stability of an underwater glider on balancing modes of motion]. Fundamental and applied hydrophysics, 2016, no. 3, pp. 66-79.
3. Sukhorukov A.L., Titov M.A., Chernishev I.A. On the use of numerical methods of viscous fluid dynamics to determine the coefficients of rotational derivatives of hydrodynamic forces and moments [Ob ispolʹzovanii chislennykh metodov dinamiki vyazkoy zhidkosti dlya opredeleniya koeffitsiyentov vrashchatelʹnykh proizvodnykh gidrodinamicheskikh sil i momentov]. Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika [Fundamental and Applied Hydrophysics], 2016, no. 2, pp. 52-61.
4. Sukhorukov A.L. Teoriya podvodnykh trosovykh sistem i yeye inzhenernyye prilozheniya [The theory of underwater cable systems and its engineering applications]. Moscow, Fizmatlit, 2017, 272 p.
5. Sukhorukov A.L., Chernishev I.A. Sposob opredeleniya dempfiruyushchikh gidrodinamicheskikh kharakteristik podvodnogo obʺyekta [Method for determining the damping hydrodynamic characteristics of an underwater object]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2731817 (2020).
6. Sukhorukov A.L., Titov M.A. Sposob opredeleniya pozitsionnykh gidrodinamicheskikh kharakteristik podvodnogo obʺyekta [Method for determining the positional hydrodynamic characteristics of an underwater object]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2746488 (2021).
7. Anderson D., Tannekhill J., Pletcher R. Vychislitel'naya gidromekhanika i teploobmen [Computational fluid mechanics and heat transfer]. M.: Mir, 1987, vol. 2, 384 p.
8. Fletcher K. Vychislitel'nyye metody v dinamike zhidkosti [Computational techniques for fluid dynamics]. M.: Mir, 1991, vol. 2, 552 p.
9. Rikhtmayyer R. Chislennoye resheniye zadach gidromekhaniki [Numerical methods in fluid dynamics]. M.: Mir, 1977, 208 p.
10. Older B., Fernbakh S., Rotenberg M. Vychislitel'nyye metody v gidrodinamike [Fundamental methods in hydrodynamics]. M.: Mir, 1967, 384 p.
11. Shlikhting G. Teoriya pogranichnogo sloya [Theory of the boundary layer]. Moscow, Nauka [Science], 1974, 712 p.
12. Korotkin A.I. Prisoyedinennyye massy sudostroitelʹnykh konstruktsiy [Attached masses of shipbuilding structures]. Saint-Petersburg, Morvest, 2007, 448 p.
13. Pantov E.N., Makhin N.N., Sheremetov B.B. Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov [Fundamentals of the theory of movement of underwater vehicles]. Leningrad, Sudostroyeniye [Sudostroenie], 1973, 216 p.
14. Rozhdestvenskiy V.V. Dinamika podvodnoy lodki [Submarine dynamics]. Leningrad, Sudostroyeniye [Sudostroenie], 1970, vol. 1, 352 p.

15. Rozhdestvenskiy K.V. Parametricheskiy analiz ustanovivshegosya dvizheniya podvodnogo glaydera v vertikal′noy ploskosti [Parametric analysis of the steady motion of an underwater glider in the vertical plane]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies], 2016, vol. 2, no. 3(33), pp. 7-14.

Andrey L. Sukhorukov. *Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of Department, Naval Architecture Department Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin», AuthorID: 446484, SPIN: 5811-3828, su_andr@yahoo.com, 191119, Saint-Petersburg, Marata str., 90.*

Maxim A. Titov. *Engineer high-level qualification, Naval Architecture Department Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin», 191119, Saint-Petersburg, Marata str., 90.*

Статья поступила в редакцию 25.07.2022; одобрена после рецензирования 18.10.2022; принята к публикации 25.11.2022.
The article was submitted 07/25/2022; approved after reviewing 10/18/2022; accepted for publication 11/25/2022.

Интеллектуальные, информационные и программные системы

УДК 004.8: 504.3
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.010

Решение проблемы объединения прогнозов выделенных на изображении объектов дыма

Лаптев Никита Витальевич, Гергет Ольга Михайловна,
Кравченко Андрей Александрович, Лаптев Владислав Витальевич,
Колпащиков Дмитрий Юрьевич
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, Томск, *nikitalaptev77@gmail.com*

Аннотация. В работе представлен алгоритм кластеризации прогнозируемых областей, реализованный в системе раннего обнаружения лесных пожаров. В основе системы лежит модель нейронной сети для поиска объекта возгорания (технология «Object detection»). На выходе модели нейронной сети формируется массив ограничивающих рамок предполагаемого местоположения объектов данного класса, метки классов и оценки вероятности принадлежности к классу. Задача рассмотренного в статье алгоритма состоит в выделении ограничивающей рамкой искомых объектов и расчете среднего значения вероятности принадлежности классу, посредством объединения и усреднения координат углов ограничивающих рамок, которые имеют пересечения с искомым объектом. В статье приведен краткий обзор существующих алгоритмов для вывода результирующей ограничивающей рамки на изображении. Приведено обоснование выбора модели нейронной сети для системы раннего обнаружения пожаров (технология «Object detection»). Представлены результаты работы сравнения алгоритмов NMS, Soft-NMS и алгоритма кластеризации площадей, для решения задачи обнаружения дымового облака на изображении.

Ключевые слова: обнаружение объектов, ограничивающая рамка, алгоритм, классификация, локализация

Цитирование: Лаптев Н.В. Решение проблемы объединения прогнозов выделенных на изображении объектов дыма / Н.В. Лаптев, О.М. Гергет, А.А. Кравченко, В.В. Лаптев, Д.Ю. Колпащиков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 136-143. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.010.

Введение. Раннее обнаружение источника возгорания в лесном массиве, точная локализация и принятие своевременных мер имеют решающее значение для минимизации нанесенного окружающей среде ущерба и предотвращения экологических катастроф. Обнаружение дыма на видео – нетривиальная задача для нейронной сети из-за большого разнообразия форм, скорости, направления движения, цветовых тонов и плотности дымового облака, так как интенсивность истечения дыма зависит от длительности и количества вещества, подвергшегося горению. Может возникнуть ситуация, связанная с отсутствием дыма на изображениях в разные моменты времени. Для решения данной проблемы авторами была разработана система раннего обнаружения пожаров в лесном массиве [1], анализирующая не отдельно взятые кадры видеофрагмента, а последовательность изображений, содержащая информацию о динамике объектов. В основе данной системы лежит технология «Object detection» (Обнаружение объектов).

Обнаружение объектов – это задача обнаружения экземпляров семантических объектов определенного класса на изображениях и видео посредством технологий компьютерного зрения [2]. Обнаружение является важной задачей для ряда практических задач, таких как: обнаружение пожаров [3-5], автономное вождение [6, 7], медицинская визуализация [8, 9], робототехника и другие. Модели обнаружения объектов обычно возвращают предлагаемые местоположения объектов данного класса, метки классов и оценки достоверности. В нашем случае для анализа в систему подается серия изображений, охватывающая весь временной отрезок видеофрагмента. В результате работы система выдает несколько объектов детекти-

рования (прогнозов) с расчетом степени уверенности отношения класса к объекту возгорания и координаты углов ограничивающей рамки (границы детектируемых объектов). В итоге стоит задача объединить координаты углов, выявленных посредством работы нейронной сети, относящиеся к одному объекту, и получить среднее значение вероятности.

Как правило, прогнозируемые рамки выбираются с использованием метода не максимального подавления (NMS) [10]. Суть данного метода заключается в следующем: 1) осуществляется сортировка всех ограничивающих рамок по их показателям вероятности принадлежности к классу; 2) вычисляется ограничивающая рамка с максимальной оценкой вероятности принадлежности к классу; 3) все оставшиеся поля отфильтровываются. Алгоритм опирается на пороговую фильтрацию для отбрасывания избыточных блоков. В работе [11] использовалась дифференцируемая модель для изучения NMS и рассмотрена её модификация Soft-NMS для улучшения производительности фильтрации.

Алгоритмы NMS и Soft-NMS хорошо работают на одной модели нейронной сети, когда не требуется объединять обнаружения с ансамбля моделей нейронных сетей или серии изображений. Рассматриваемые алгоритмы фильтруют ограничивающие рамки и не производят расчет усреднения локализации прогнозов обнаруженных объектов, объединенных с серии изображений. Анализ последовательности изображений, а также ансамблирование моделей нейронных сетей используются в системах, не требующих логического вывода в реальном времени. Объединение прогнозов с последовательности изображений или нескольких моделей нейронных сетей и вывод результата на итоговом изображении обычно дают более точные прогнозы в сравнении с одной моделью нейронной сети [12].

В этой статье мы предлагаем метод для объединения (прогнозов) координат углов ограничивающих рамок (границы детектируемых объектов) и их уверенности отношения класса к объекту возгорания. В отличие от методов NMS и Soft-NMS, которые просто удаляют часть прогнозов, предлагаемый алгоритм использует все координаты углов ограничивающих рамок и их оценки уверенности, для расчета итоговой ограниваюший рамки.

1. Описание системы раннего обнаружения пожароопасных объектов в лесном массиве. Постановка задачи. Алгоритм кластеризации прогнозов является составляющей частью системы раннего обнаружения пожаров в лесном массиве, которая представлена в статье [1]. Суть данной системы заключается в следующем: 1) в систему на вход подается видеофрагмент продолжительностью 10 секунд; 2) видеофрагмент делится на кадры, из которых выбираются 7 изображений; 3) на выбранных кадрах выделяются динамические признаки объектов, в частности, присущие дымовому облаку; 4) каждый полученный кадр последовательно обрабатывается моделью распознавания объектов; 5) на выходе сеть выдает координаты углов прямоугольной рамки, включающие обнаруженные объекты и вероятность принадлежности объекта к классу. Таким образом, формируется массив ограничивающих рамок, описывающих один или несколько объектов. Предлагаемый алгоритм объединяет данный массив в одну или несколько ограничивающих рамок в зависимости от количества обнаруженных объектов.

В основе системы раннего обнаружения пожаров лежит модель нейронной сети (НС) EfficientDet-D1. Предложенная модель НС была выбрана на основе результатов, представленных в таблице 1, раздел «Результаты». Данные для обучения и тестирования системы получены из открытых источников, в частности, данные открытых онлайн ресурсов Nevada Seismological Laboratory (University of Nevada) [13, 14], Center for wildfire research (основанного при поддержке University of Split) [15], видеозаписи съемки лесных пожаров Пермского лесного хозяйства [16], видеозаписи базы данных Калифорнийского университета в Сан-Диего HPWREN [17]. С целью непосредственного обучения все данные были предварительно размечены с использованием средств web-сервиса «SuperVisely»[18]. Общее количество

собранных видеозаписей составило 550 единиц, из них содержащих очаги возгорания – 350 единиц и 200 видеозаписей без пожаров. Для обучения из каждой видеозаписи взята последовательность из 7 кадров, это количество кадров получено экспериментально.

2. Описание алгоритма кластеризации площадей. В основе алгоритма обобщения кластеров обнаруженных объектов лежит принцип работы алгоритма DBSCAN [19]. Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является использование расчета площади пересечения ограничивающих рамок вместо результатов расчета расстояния между точками. Если представить матрицу расстояний как матрицу смежности, то для алгоритма DBSCAN она будет выглядеть неориентированным графом, а для алгоритма кластеризации площадей будет соответствовать двунаправленному ориентированному графу.

Блок-схема работы алгоритма постобработки проиллюстрирована на рис. 1 и заключается в следующей последовательности действий. На вход нейронной сети поступают 5 кадров одного ракурса, но разнесенные во временном промежутке. Так как дым имеет весьма нестабильную структуру (плотность, изменчивость формы, направление движения), то на каждом кадре имеем отличную от других кадров уникальную форму дымового облака. Таким образом, алгоритм в большинстве случаев выделяет наиболее характерные участки дыма в данный момент времени, что отчетливо прослеживается на рис. 2, представленном в разделе 3.

При таком подходе возможны случаи, когда на результирующем кадре может быть до 25 ограничивающих рамок, которые с разной степенью уверенностью выделяют один и тот же объект. Эти боксы группируются в кластеры по признаку процента перекрытия при наличии в кластере 2-х и более боксов.

Алгоритм кластеризации прогнозов:

1. На вход алгоритма поступает список всех обнаруженных ограничивающих рамок (боксов) на кадре, а также их вероятности. Данный список фильтруется на предмет прохождения минимального порога по вероятности ограничивающей рамки. Итоговый список содержит в себе все детекции, отсортированные в порядке уменьшения степени уверенности.

2. Затем формируется матрица размерностью $n \times n$, где n – количество элементов списка. Ячейки матрицы заполняются по схеме, где каждая ячейка матрицы – это метрика пересечения каждого бокса с каждым боксом. Пересечение боксов рассчитывается по формуле.

$$I_{ij} = \frac{A_i \cap A_j}{A_i}$$

где I_{ij} – площадь пересечения i – го и -го боксов, A_iи A_j площади соответствующих боксов. Главная диагональ матрицы отводится под хранение номеров кластеров конкретного бокса. На данном этапе все боксы в кластере нумеруются, как не вошедшие в кластер.

3. Далее запускается цикл, операции в котором будут выполняться до тех пор, пока меняются значения в главной диагонали матрицы на новые номера кластеров.

4. Если находится минимальное необходимое количество ограничивающих рамок (MinSamples), то найденным ограничивающим рамкам присваивается номер кластера. Рекурсивно для каждой из найденных рамок запускается алгоритм формирования кластеров для нахождения цепочек связей внутри кластера.

5. После нахождения всех рамок в кластере номер кластера инкрементируется и запускается новый поиск по матрице.

6. После определения всех кластеров определяются центры масс координат, верхнего и нижнего углов ограничивающей рамки для по формуле:

$$x_c = \frac{\sum x_i S_i}{S_i}$$

где x_c – координата нового центра угла, x_i – координата угла обнаруженного объекта, S_i – вероятность обнаруженного объекта.

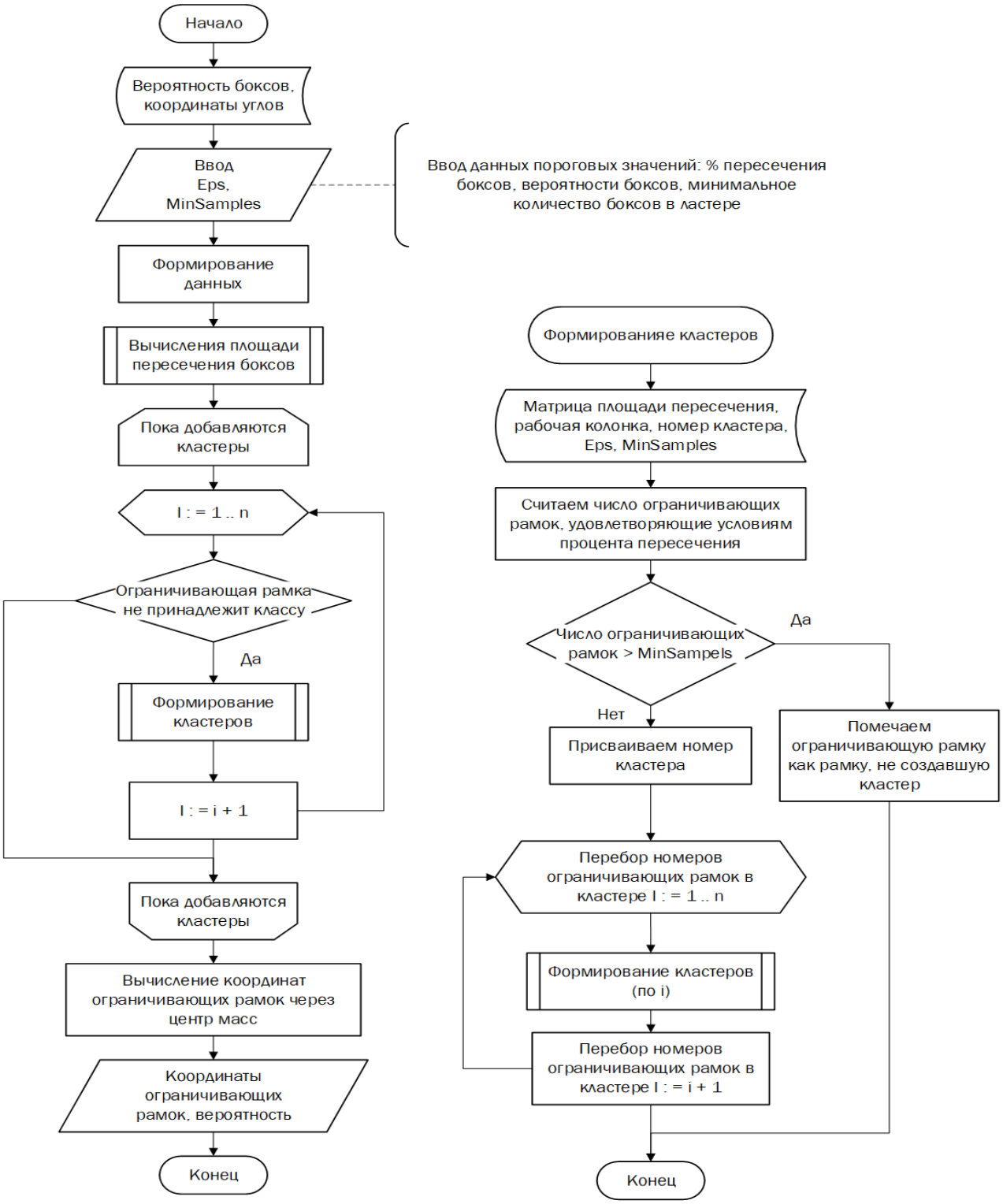


Рис. 1. Блок схема алгоритма кластеризации прогнозов

7. Вычисление новой вероятности прогнозируемой рамки или рамок в зависимости от количества обнаруженных кластеров.

$$S_c = \frac{\sum S_i^2}{S_i}$$

где S_c – вероятность целевого бокса, S_i – вероятность обнаруженного объекта.

3. Результаты. Для тестирования алгоритма была использована система раннего обнаружения пожаров в лесном массиве, описанная в статье [1]. В исследовании были рассмотрены модели обнаружения объектов: EfficientDet-D0, EfficientDet-D1, SSD ResNet50 v1, SSD MobileNet v2, Faster R-CNN ResNet50 V1, Faster R-CNN Inception ResNet. Все модели обучены в одинаковых условиях. Оценка качества работы нейросетевых моделей проведена по 3 метрикам: Mean average precision (mAP) при пороговом значение IoU в 50%, Accuracy (точность классификации) и Speed (время обработки одного кадра). По результатам тестирования различных моделей нейронных сетей наилучший результат продемонстрировала модель EfficientDet-D1, точность классификации которой составила 69% и средняя точность 51,4%.

Таблица 1. Оценка результативности моделей НС на тестовой выборке

Model name	Input size	Weight,mb	Accuracy	MAP	Speed, s
EfficientDet-D0	512x512	18,6	0,6	0,336	0,03
EfficientDet-D1	640x640	24.9	0,69	0,514	0,11
SSD ResNet50 v1	640x640	10,1	0,39	0,64	0.08
SSD MobileNet v2	640x640	7,215	0,64	0,46	0,04
Faster R-CNN ResNet50 V1	640x640	4,597	0.45	0,32	0,26
Faster R-CNN Inception ResNet V2	640x640	18,2	0.55	0,12	0.58

Оценка результативности алгоритмов кластеризации площадей оценивалась по следующим метрикам: Precision (Точность), Recall (Полнота), Mean Average Precision (средняя точность AP) при пороговом значении IoU в 25% (порог рассчитан эмпирическим путем), IOU (Площадь пересечения). Результаты тестирования алгоритма представлены в таблице 2. Тестирование алгоритма проходило для 2-5 кадров. Показатель точности (Precision) для разработанного алгоритма составил 89%, что на 17% выше, чем у алгоритма NMS и на 13% выше, чем у Soft-NMS. Данная метрика показывает, что разработанный алгоритм хорошо справляется с фильтрацией единично обнаруженных объектов. Показатель полноты отличается в пределах погрешности, что указывает на то, что алгоритм не отсекает истинно верные обнаруженные объекты. Средняя точность системы с использованием разработанного алгоритма выше на 6% относительно использования аналоговых алгоритмов. Точность локализации составила 56%, что также выше, чем у аналогов.

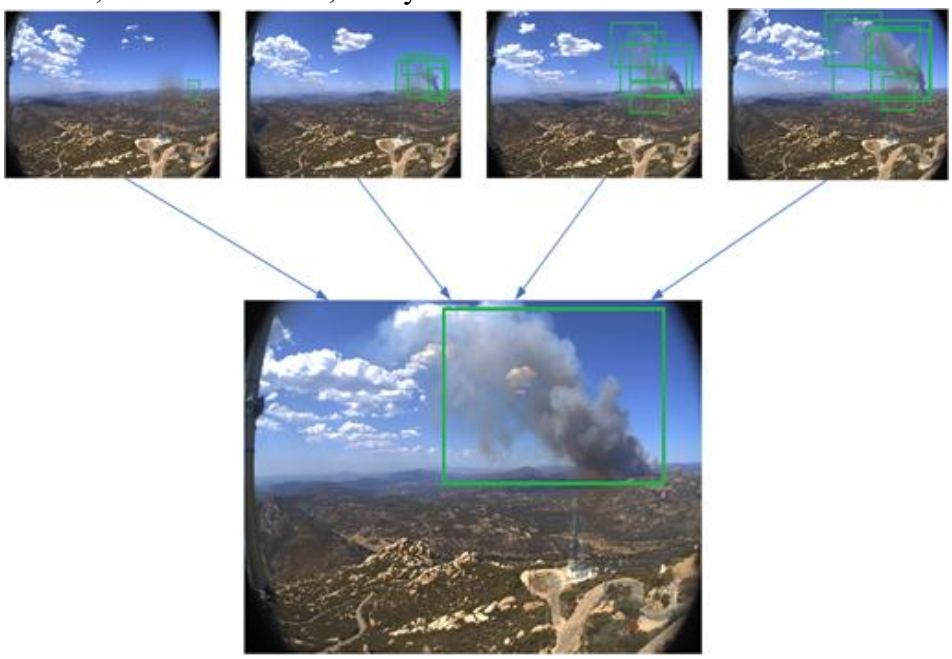


Рис. 2. Пример результата работы алгоритма кластеризации прогнозов

Таблица 2. Оценка результативности работы алгоритмов вывода прогнозов

	АКП				NMS				Soft-NMS			
№	Pr	Rc	mAP	IOU	Pr	Rc	mAP	IOU	Pr	Rc	mAP	IOU
2	0,92	0,79	0,84	0,59	0,82	0,9	0,86	0,52	0,76	0,9	0,84	0,25
3	0,9	0,9	0,86	0,56	0,74	0,92	0,85	0,53	0,75	0,9	0,86	0,24
4	0,89	0,91	0,89	0,56	0,72	0,92	0,83	0,52	0,76	0,87	0,83	0,23
5	0,84	0,91	0,88	0,58	0,69	0,93	0,83	0,53	0,72	0,9	0,83	0,23

Заключение. Рассмотренный в статье алгоритм входит в состав системы обнаружения пожароопасных объектов на видеоряде и позволяет объединить ограничивающие рамки предсказанных объектов с нескольких изображений на результирующем изображении с повышением точности локализации. В отличие от алгоритмов NMS и Soft-NMS, предлагаемый алгоритм использует все координаты углов ограничивающих рамок и их оценки уверенности, для расчета итоговой огранивающей рамки. Таким образом, анализ последовательности изображений и усреднение предсказаний позитивно влияют на точности детектирования и локализации. Применение алгоритма объединения предсказаний результатов работы нейронной сети повысило точность локализации на 4% и среднюю точность работы системы на 6%. В результате проведенного исследования можно сказать о высокой эффективности алгоритма.

Список источников

1. Laptev N. Visualization System for Fire Detection in the Video Sequences. Scientific Visualization, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 1-9.
2. Szeliski R. Computer vision: algorithms and applications. Springer Science & Business Media, 2010.
3. Jindal P. Real-time wildfire detection via image-based deep learning algorithm. Soft computing: theories and application. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 539-550.
4. Oh S.H. Early wildfire detection using convolutional neural network. Frontiers of computer visio. Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 18-30.
5. Gaur A. Video flame and smoke based fire detection algorithms: A literature review. Fire technol, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 1943-1980.
6. Geiger A. Vision meets robotics: The kitti dataset. Int. J. Rob. Res. Sage Publications Sage UK: London, England, 2013, vol. 32, no. 11, pp. 1231-1237.
7. Dollár P. Pedestrian detection: A benchmark. 200 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. IEEE, 2009, pp. 304-311
8. Danilov V. Comparative study of deep learning models for automatic coronary stenosis detection in x-ray angiography. CEUR Workshop Proc. CEUR-WS, 2020, vol. 2744.
9. Danilov V.V. Boosting segmentation accuracy of the deep learning models based on the synthetic data generation. Available at: http://noa.gwlb.de (accessed: 02.12.2022).
10. Neubeck A., Van Gool L. Efficient non-maximum suppression. 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). IEEE, 2006, vol. 3, pp. 850-855.
11. Bodla N. Soft-NMS--improving object detection with one line of code. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2017, pp. 5561-5569
12. Okun O., Valentini G., Re M. Ensembles in machine learning applications. Springer Science & Business Media, 2011, vol. 373.
13. Nevada Seismological Laboratory. Available at: https://www.youtube.com/user/ nvseismolab/about (accessed: 02.12.2022).
14. Nevada Seismological Laboratory,University of Nevada. Available at: http://www.seismo. unr.edu (accessed: 02.12.2022).
15. Wildfire Observers and Smoke Recognition Available at: http://wildfire.fesb.hr (accessed: 19.11.2022).
16. Perm forest fire center. Available at: https://www.youtube.com/channel/ UCsKn1hQgGh5n7NGoqLNoh_Q/videos (accessed: 19.11.2022).
17. Cameras from various HPWREN related sites. Available at: http://hpwren.ucsd.edu/ cameras/ (accessed: 16.04.2022).
18. Supervisely - Web platform for computer vision. Annotation, training and deploy. Available at: https://supervise.ly/ (accessed: 02.12.2022).

19. Ester M.A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, 1996.

Лаптев Никита Витальевич. *Аспирант ФГАОУ ВО НИ ТПУ, инженер лаборатории НОЛ ОАБД ИШИТР, AuthorID: 1084295, SPIN: 2735-2600, ORCID: 0000-0003-0709-9974, nikitalaptev77@gmail.com, Россия, Томск.*

Гергет Ольга Михайловна. *Д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО НИ ТПУ, профессор отделения информационных технологий, AuthorID: 115286, SPIN: 9352-4215, ORCID: 0000-0002-6242-9502, olgagerget@mail.ru, Россия, Томск.*

Кравченко Андрей Александрович. *Магистрант, ФГАОУ ВО НИ ТПУ, AuthorID: 1091199, SPIN: 9114-4226, ORCID: 0000-0001-6828-3279, aak224@tpu.ru, Россия, Томск.*

Лаптев Владислав Витальевич. *Аспирант, ФГАОУ ВО НИ ТПУ, AuthorID: 1091296, SPIN: 6814-2465, ORCID: 0000-0001-8639-8889, Lptwlad1@gmail.com, Россия, Томск.*

Колпащиков Дмитрий Юрьевич. *Аспирант, ФГАОУ ВО НИ ТПУ, Инженер лаборатории НОЛ ОАБД ИШИТР, AuthorID: 912859, SPIN: 8652-2223, ORCID: 0000-0001-8915-0918, Dyk1@tpu.ru, Россия, Томск.*

UDC 004.8:504.3
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.010

Solving the issue of combining predictions of smoke objects highlighted in images

Nikita V. Laptev, Olga M. Gerget, Andrey A. Kravchenko, Vladislav V. Laptev, Dmitry Yu. Kolpashchikov

National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia, Tomsk, *nikitalaptev77@gmail.com*

Abstract. The paper presents an algorithm for clustering the areas of predicted areas, implemented in a system for the early detection of forest fires. The system is based on a neural network model for searching for a fire object detection. At the output of the neural network model, an array of bounding boxes, the estimated location of objects of a given class, class labels, and estimates of the probability of belonging to a class are formed. The task of the algorithm considered in the article is to select the desired objects with a bounding box and calculate the average value of the probability of belonging to a class by combining and averaging the bounding boxes that have intersections with the desired object. The article provides a brief overview of existing algorithms for displaying the resulting bounding box on an image. The rationale for choosing a neural network model for an early fire detection system is given. The results of the comparison of the NMS, Soft-NMS algorithms and the area clustering algorithm for solving the problem of detecting a smoke cloud in an image are presented.

Keywords: object detection, bounding box, algorithm, classification, localization

References

1. Laptev N. Visualization System for Fire Detection in the Video Sequences. Scientific Visualization, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 1-9.
2. Szeliski R. Computer vision: algorithms and applications. Springer Science & Business Media, 2010.
3. Jindal P. Real-time wildfire detection via image-based deep learning algorithm. Soft computing: theories and application. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 539-550.
4. Oh S.H. Early wildfire detection using convolutional neural network. Frontiers of computer visio. Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 18-30.
5. Gaur A. Video flame and smoke based fire detection algorithms: A literature review. Fire technol, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 1943-1980.
6. Geiger A. Vision meets robotics: The kitti dataset. Int. J. Rob. Res. Sage Publications Sage UK: London, England, 2013, vol. 32, no. 11, pp. 1231-1237.
7. Dollár P. Pedestrian detection: A benchmark. 200 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. IEEE, 2009, pp. 304-311
8. Danilov V. Comparative study of deep learning models for automatic coronary stenosis detection in x-ray angiography. CEUR Workshop Proc. CEUR-WS, 2020, vol. 2744.
9. Danilov V.V. Boosting segmentation accuracy of the deep learning models based on the synthetic data generation. Available at: http://noa.gwlb.de (accessed: 02.12.2022).

10. Neubeck A., Van Gool L. Efficient non-maximum suppression. 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). IEEE, 2006, vol. 3, pp. 850-855.
11. Bodla N. Soft-NMS--improving object detection with one line of code. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2017, pp. 5561-5569
12. Okun O., Valentini G., Re M. Ensembles in machine learning applications. Springer Science & Business Media, 2011, vol. 373.
13. Nevada Seismological Laboratory. Available at: https://www.youtube.com/user/ nvseismolab/about (accessed: 02.12.2022).
14. Nevada Seismological Laboratory,University of Nevada. Available at: http://www.seismo. unr.edu (accessed: 02.12.2022).
15. Wildfire Observers and Smoke Recognition Available at: http://wildfire.fesb.hr (accessed: 19.11.2022).
16. Perm forest fire center. Available at: https://www.youtube.com/channel/ UCsKn1hQgGh5n7NGoqLNoh_Q/videos (accessed: 19.11.2022).
17. Cameras from various HPWREN related sites. Available at: http://hpwren.ucsd.edu/ cameras/ (accessed: 16.04.2022).
18. Supervisely - Web platform for computer vision. Annotation, training and deploy. Available at: https://supervise.ly/ (accessed: 02.12.2022).
19. Ester M.A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, 1996.

Nikita V. Laptev. *Postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University, Engineer of Research Laboratory for Processing and Analysis of Big Data, AuthorID: 1084295, SPIN: 2735-2600, ORCID: 0000-0003-0709-9974, nikitalaptev77@gmail.com, Russia, Tomsk.*

Olga M. Gerget. *Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Professor of Division for Information Technology, AuthorID: 115286, SPIN: 9352-4215, ORCID: 0000-0002-6242-9502, olgagerget@mail.ru, Russia, Tomsk.*

Andrey A. Kravchenko. *Undergraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University, AuthorID: 1091199, SPIN: 9114-4226, ORCID: 0000-0001-6828-3279, aak224@tpu.ru, Russia, Tomsk.*

Vladislav V. Laptev. *Postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University, AuthorID: 1091296, SPIN: 6814-2465, ORCID: 0000-0001-8639-8889, Lptwlad1@gmail.com, Russia, Tomsk.*

Dmitry Yu. Kolpashchikov. *Postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University, engineer of the laboratory of NOL OABD ISHITR, AuthorID: 912859, SPIN: 8652-2223, ORCID: 0000-0001-8915-0918, Dyk1@tpu.ru, Russia, Tomsk.*

Статья поступила в редакцию 26.09.2022; одобрена после рецензирования 21.11.2022; принята к публикации 25.11 2022.

The article was submitted 09/26/2022; approved after reviewing 11/21/2022; accepted for publication 11/25/2022.

УДК 004.421+004.4’2+004.771
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.011

Технология качественного исследования двоичных динамических систем в микросервисной инфраструктуре

Опарин Геннадий Анатольевич, Богданова Вера Геннадьевна,
Пашинин Антон Алексеевич
Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
Россия, Иркутск, *apcrol@gmail.com*

Аннотация. В основе предлагаемой технологии лежат методы, модели, программные средства и инструментарий автоматизации решения задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений в микросервисной вычислительной инфраструктуре. Суть метода состоит в сведении рассматриваемых задач к решению SAT или 2QBF задач путем построения булевой модели динамического свойства. Программное обеспечение включает средства построения булевых моделей и проверки их выполнимости. В рамках нашей технологии эти программные средства реализованы в виде пакета прикладных микросервисов. Запуском микросервиса управляют устанавливаемые в узлах вычислительной инфраструктуры программные агенты, создаваемые на основе разработанной ранее инструментальной платформы HPCSOMAS-MSC. Целью настоящего исследования является расширение HPCSOMAS-MSC средствами автоматизации подготовки вычислительных узлов распределенной среды для развертывания пакета прикладных микросервисов и специализированными агентами, ориентированными на структуру булевой модели, для обеспечения двухуровневого управления параллельными вычислениями при проверке ее выполнимости. На верхнем уровне подзадачи, полученные путем расщепления булевой модели, распределяются по узлам нижнего уровня, подвергаются углубленному расщеплению и решаются параллельно, как независимые. Вычислительные эксперименты для проведения качественного исследования двоичных динамических систем с большой размерностью вектора состояния показали эффективность предложенной технологии. Широта использования таких систем в качестве моделей объектов при проведении исследований в разнообразных предметных областях обусловливает практическую значимость предложенной технологии.

Ключевые слова: двоичные динамические системы, качественный анализ, метод булевых ограничений, микросервис

Цитирование: Опарин Г.А. Технология качественного исследования двоичных динамических систем в микросервисной инфраструктуре / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, А.А. Пашинин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 144-155. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.011.

Введение. Метод булевых ограничений (Boolean Constraints Method, BCM [1]) является достаточно общим методом качественного анализа и структурно-параметрического синтеза разнообразных классов двоичных динамических систем (ДДС): ДДС автоматного типа (классических) с функцией переходов, заданной в явном виде, что позволяет однозначно определить следующее состояние для любого текущего состояния; сингулярных ДДС, математическая модель которых наряду с уравнениями динамики автоматного типа включает уравнения статики, ограничивающие множество состояний и переходов между ними; неявных ДДС с функцией переходов, определенной неявным булевым уравнением относительно вектора переменных текущего состояния и векторов переменных последующих состояний. Суть BCM состоит в сведении задач качественного исследования синхронных ДДС, функционирующих на конечном промежутке времени, к решению SAT или 2QBF задач путем построения булевой модели динамического свойства. Решение задач качественного исследования ДДС на основе BCM обеспечивает, в отличие от других методов (например, [2-4]), возможность естественного параллелизма по данным при проведении распределенных вычислений.

В основе предлагаемой технологии лежат программные средства, методы, модели и инструментарий автоматизации решения задач качественного исследования ДДС в гибридной микросервисной вычислительной инфраструктуре (ГМВИ) (рис. 1). Программное

обеспечение (ПО) включает средства построения булевых моделей и проверки их выполнимости. В рамках нашего подхода ПО реализовано в виде пакета прикладных микросервисов (Applied Microservices Package, AMP [5]). Микросервисная архитектура поддерживает модульность, инкапсуляцию, частичное развертывание и децентрализованное управление, повышающее отказоустойчивость распределенной системы [6]. Такой дизайн ПО способствует также функциональной совместимости, изоляции и разделению задач, обеспечивая гибкий процесс автономной разработки и тестирования микросервисов [7]. Запуском микросервиса управляют агенты, создаваемые на основе инструментальной платформы HPCSOMAS-MSC [8] и устанавливаемые в узлах микросервисной инфраструктуры. Вычислительные узлы служат физической основой семантической сети агентов, управляющих запуском микросервисов, реализующих функциональность прикладных модулей. В локальных базах знаний агентов хранятся фрагменты отношений, отражающие взаимосвязь прикладных модулей с параметрами по входу и выходу.

Рис. 1. Программно-инструментальные средства технологии качественного анализа ДДС на основе метода булевых ограничений в микросервисной инфраструктуре

AMP предоставляет следующие средства для решения задач качественного анализа и структурно-параметрического синтеза ДДС:

- построение булевых моделей динамического свойства нелинейных автономных и управляемых ДДС;
- решение отдельной задачи качественного анализа ДДС (проверки выполнимости динамического свойства);
- решение комплексных задач качественного анализа ДДС, включающих выполнение ряда отдельных задач с чередованием построения булевых моделей и проверки их выполнимости;
- графическую и табличную визуализацию полученных результатов.

Перечисленные средства структурированы в виде отдельных процессоров пакета, доступ к которым выполняется с помощью агента пользователя UDA (User Dew Agent, [9]). Пользовательский UDA, установленный на локальном ресурсе, обеспечивает возможности совместной работы прикладных пакетов микросервисов с облачными сервисами в гибридной облачной среде.

Модель гибридных вычислений позволяет интегрировать в рамках одной инфраструктуры локальные и облачные вычислительные ресурсы для создания единой, автоматизированной и хорошо управляемой вычислительной среды [10]. Гибридные ресурсы публичного и приватного облаков расширяют локальную инфраструктуру пользователя при возникновении пиковых нагрузок [11]. Потребность в вычислительной мощности может сильно варьироваться в процессе проведения исследований, и большие ресурсы обычно требуются только при выполнении крупномасштабных вычислений ([12-13]). Облачные ресурсы представляют собой настраиваемую виртуальную инфраструктуру, которую можно выделять и освобождать по мере необходимости [14]. Однако такой способ получения ресурсов создает определенный уровень сложности, так как настройка виртуальных ресурсов требует значительных технических навыков [15]. Несмотря на гибкость и преимущества гибридных вычислений, возникают серьезные проблемы, связанные с управлением ресурсами, инфраструктурой и развертыванием приложений [16]. Таким образом, задача разработки средств автоматизации подготовки вычислительных узлов гибридной инфраструктуры является актуальной. Целью настоящего исследования являлось расширение HPCSOMAS-MSC средствами автоматизации подготовки вычислительных узлов гибридной распределенной среды для развертывания пакета прикладных микросервисов и специализированными агентами, ориентированными на структуру булевой модели, формируемой при исследовании некоторых динамических свойств неявной ДДС, для обеспечения двухуровневого управления параллельными вычислениями при проверке ее выполнимости.

1. **Математическая модель неявной ДДС**. Приведем модель неявной ДДС, представленную в работе авторов [17]. Рассматривается ДДС, поведение которой во времени задано неявным булевым уравнением *k*-ого порядка [18] вида

$$F(x^t, x^{t+1},..., x^{t+k}) = 0 \tag{1}$$

с выходной величиной y^t, определяемой соотношением

$$y^t = H(x^t, x^{t+1},..., x^{t+k}), \tag{2}$$

где $t = 0,1,2,...$ – дискретное время, $x^{t+\tau} = x(t+\tau) = (x_1(t+\tau), x_2(t+\tau),..., x_n(t+\tau))$ – двоичный вектор состояния в момент времени $t+\tau$, ($x^{t+\tau} \in B^n, B = \{0,1\}, \tau \in [0,k]$); k – порядок уравнения (1), $y^t = y(t)$ – состояние выхода ($y^t \in B$); F и H – скалярные функции алгебры логики, называемые неявной функцией переходов и целевой функцией ($F: B^{k(n+1)} \to B$, $H: B^{k(n+1)} \to B$). Предполагается, что функция F не обладает свойством однозначной разрешимости относительно переменных вектора состояния x^{t+k}, то есть поведение ДДС (1) носит типично недетерминированный характер. Уравнение (1) может выполняться для подходящих выбранных временных последовательностей $x^\tau = (x^0, x^1,..., x^k)$ длины $k+1$, начинающихся в момент времени $t = 0$. Такие последовательности называются локальными решениями уравнения (1) для $t = 0$ (или локальной траекторией).

С точки зрения динамики неявной булевой сети основным является свойство продолжаемости ее локальных решений. Локальное решение продолжаемо на один шаг, если его последние *p* состояний совпадают с первыми *p* состояниями хотя бы одного локального

решения из множества всех локальных решений уравнения (1). Все продолжаемые локальные решения удовлетворяют следующему уравнению одношаговых переходов неявной булевой сети для $t = 0$ и $t = 1$:

$$F(x^0, x^1,..., x^k) \vee F(x^1, x^2,..., x^{k+1}) = 0. \quad (3)$$

Для многих практических задач цель функционирования ДДС можно сформулировать в терминах только локального решения для $t = 0$. В этом случае соотношения (1, 2) для имеют вид:

$$F(x^0, x^1,..., x^k) = 0, \quad (4)$$

$$y^0 = H(x^0, x^1,..., x^k), \quad (5)$$

где F и H – локальные функции переходов и выхода системы (1, 2). Неявные ДДС k-ого порядка для $k > 1$ естественным образом возникают при булевом моделировании многих комбинаторных проблем. В [17] приведено исследование для таких ДДС свойства достижимости целевой функцией определенного значения, а именно: задано начальное состояние $x^0 = c^0$ $(c^0 \in B^n)$. Необходимо выяснить существование решения уравнения (4), которое обеспечивает достижение цели $y^0 = c^*$ $(c^* \in B^n)$ в уравнении (5). Доказательство этого свойства эквивалентно конструктивному доказательству разрешимости булева уравнения

$$F(x^0, x^1,..., x^k)\Big|_{x^0=c^0} \vee (c^* \oplus H(x^1, x^2,..., x^{k+1})) = 0. \quad (6)$$

Программная реализация качественного анализа перечисленных свойств неявных ДДС k-ого порядка для $k > 1$ выполнена на основе модифицированной версии платформы HPCSOMAS-MSC, дополненной средствами автоматизации подготовки узлов вычислительной инфраструктуры для развертывания микросервисов АМР и запускающими эти микросервисы агентами, управляющими параллельным выполнением проверки глубоко структурированных булевых моделей упомянутых выше свойств с помощью этих микросервисов.

2. HPCSOMAS-MSC. Платформа HPCSOMAS-MSC (рис. 2) предоставляет средства для создания агентов и микросервисов АМР, инструментальные средства автоматизации этого процесса и средства мультиагентного управления вычислениями в АМР. Обеспечиваются три схемы управления: децентрализованное управление группой распределенных вычислительных агентов (DCA), самоорганизующейся по непроцедурной постановке задачи (НПЗ) на вычислительной модели предметной области; иерархическое управление формируемой по процедурной постановке задачи (ПЗ) композицией микросервисов, осуществляемое вычислительными агентами, запускающими микросервисы (СМА); управление двухуровневыми параллельными вычислениями, выполняемое агентами верхнего и нижнего уровней (TLA и BLA) на основе контекстно-ориентированной постановки задачи (КПЗ). Последняя схема является новой и разработана для проверки таких динамических свойств, булева модель которых имеет структуру специального вида (бинарные и p-арные ограничения, $p >> 2$) и формируется с учетом контекста моделируемой с помощью неявной ДДС задачи, задаваемого матрицей смежности ее графического описания.

HPCSOMAS-MSC ориентирована на пользователей с разным уровнем необходимых знаний в разработке микросервисного программного обеспечения. Пользователь-разработчик, используя программный интерфейс, может создавать собственные микросервисы, работающие на платформе HPCSOMAS-MSC. Пользователь, которому не требуется погружение в программную реализацию, может воспользоваться мастером

создания микросервисов или библиотекой шаблонов, конфигурируемых микросервисов, если предполагается использовать (либо предоставлять другим пользователям) свое предметное ПО для решения задач на основе платформы. Автоматизация создания, конфигурирования, развертывания, тестирования и обновления микросервисов обеспечивается с помощью соответствующих мастеров подсистемы MSCDT (Micro-Services Creation Deployment Testing) (рис. 2).

Мастер развертывания устанавливает микросервисы как непосредственно на удаленный вычислительный ресурс при соответствующих правах пользователя, так и на локальный компьютер с настройкой автоматического подключения микросервисов к ресурсу. Пользователь имеет возможность либо использовать предоставляемые платформой образы виртуальных машин (или докер-контейнеров) с наборами микросервисов, либо самостоятельно создавать и настраивать образы при помощи специализированного ПО платформы. В случае реализации АМР с микросервисами в виде образа виртуальной машины обеспечивается быстрое развертывание на различных ресурсах под управлением любой ОС, поддерживающей виртуализацию. Виртуальные образы создаются на базе CentOS (URL: https://www.centos.org/) и содержат также установленные и настроенные Java SE и Apache Tomcat. Другой вариант предполагает запуск множества образов для докер-контейнера и их привязку к одному из HPCSOMAS-агентов на выделенном сервере или локальном компьютере пользователя для параллельного выполнения больших задач на высокопроизводительном распределенном ресурсе. Управляющие HPCSOMAS-агенты устанавливаются на узлы ГМВИ (персональный компьютер, виртуальную машину, выделенный сервер), а задания на вычисления ставятся в очередь вычислительного ресурса. Агенты автоматически связываются с ресурсом по SSH протоколу, пересылают необходимые файлы, запускают вычисления на СУПЗ ресурса, отслеживают процесс вычислений, забирают результаты.

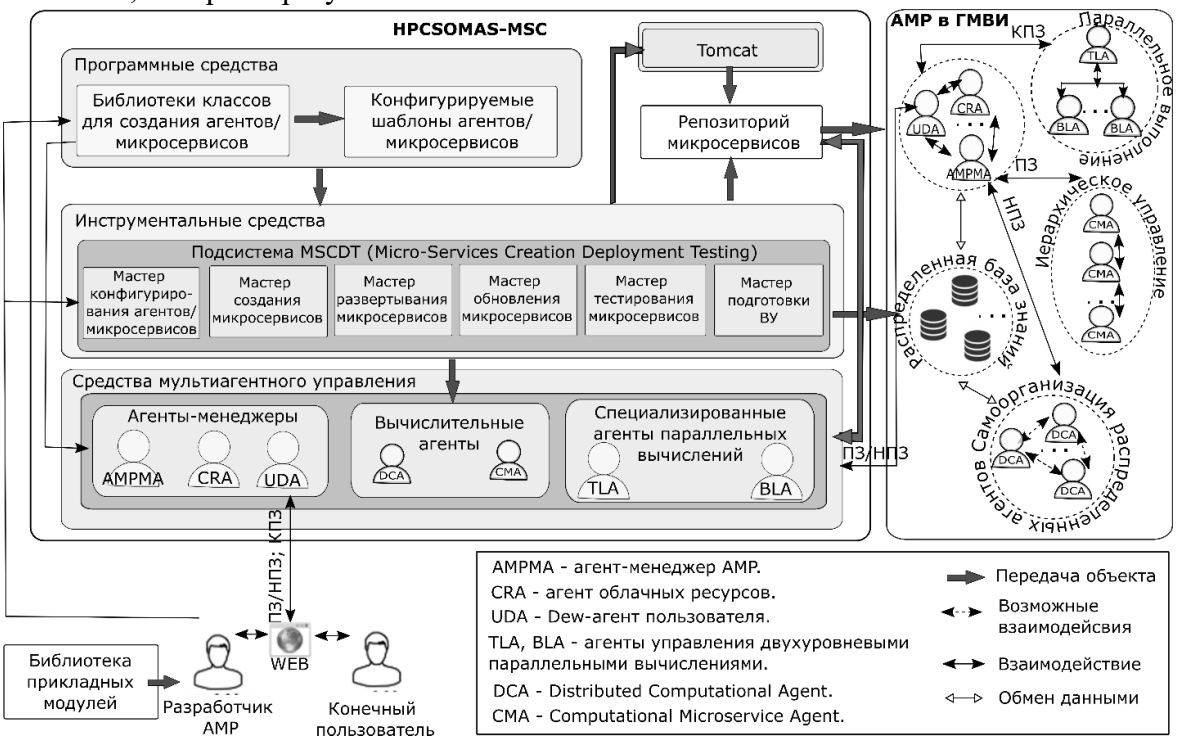


Рис. 2. Архитектура HPCSOMAS-MSC

HPCSOMAS-MSC использует виртуальную машину Java и сервер приложений Apache Tomcat. Репозиторий микросервисов сервера содержит лежащие в их основе программы на разных языках, возможно, требующие дополнительного специального программного обеспечения. Установка всего необходимого ПО становится сложной задачей, если в разных

версиях операционной системы (ОС) вычислительного узла (ВУ) могут быть уже установлены разные версии ПО, пакетные менеджеры, переменные среды, а для работы микросервисов необходимо настроить также пользовательские директории, права доступа к папкам и серверу приложений, загружать ПО из собственного репозитория. Разработчику может понадобиться установить HPCSOMAS-MSC и пакет микросервисов на устаревшую версию операционной системы, под которую будут необходимы специальные версии ПО, требующие решения возможных проблем его поиска, установки, обеспечения совместимости. Перечисленные проблемы привели к необходимости дополнить подсистему MSCDT мастером подготовки ВУ, предваряющим вызов мастера развертывания микросервисов.

3. Мастер автоматизации подготовки узла ГМВИ. Новый мастер утилиты MSCDT (рис. 2) разработан для автоматизации подготовки вычислительного ресурса ГМВИ к работе с системой HPCSOMAS-MSC и предназначен для решения следующих задач:

- подключение по SSH от имени администратора;
- определение менеджера пакетов ВУ и возможности скачивания пакетов из официальных репозиториев;
- установка Java (замена старой версии, настройка переменных среды);
- установка Apache Tomcat (замена старой версии, выбор предпочтительной версии, настройка автозапуска сервера, настройка внешнего доступа к серверу по IP с заданным портом, изменение настроек по умолчанию для ограничения внешнего доступа;
- установка агента-менеджера AMPMA (AMP Manager-Agent) и веб-интерфейса HPCSOMAS-MSC в Apache Tomcat;
- установка сервисов обмена файлами в HPCSOMAS-MSC и Apache Tomcat;
- установка в Apache Tomcat и HPCSOMAS-MSC микросервисов для работы с SageMath (URL: https://www.sagemath.org/);
- настройка всех микросервисов HPCSOMAS-MSC;
- подключение внешних AMPMA.

В качестве параметров для подключения к мастеру указываются логин и пароль администратора (или пользователя HPCSOMAS), папка для установки Apache Tomcat, папка для хранения вычислительных микросервисов, рабочая папка для сервисов HPCSOMAS-MSC. После подключения задаются задачи для анализа ВУ, пример перечня которых приведен на рис. 3. Результат анализа ВУ в соответствии с указанными на рис. 3 задачами приведен на рис. 4. По команде «Install» мастер подготавливает ВУ, устанавливая недостающее ПО с поддержкой совместимости с имеющимися версиями ОС и Java.

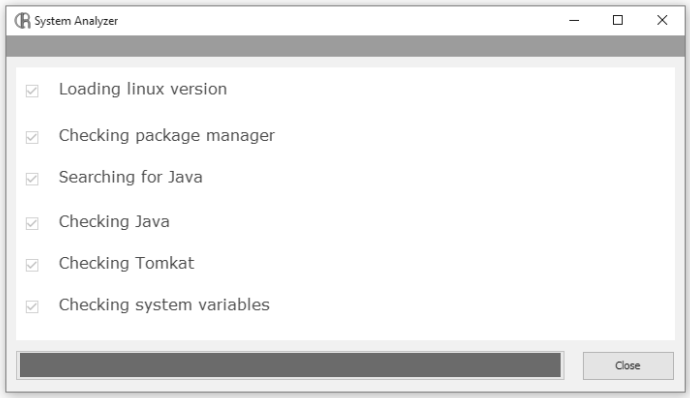


Рис. 3. Задачи мастеру для анализа ВУ

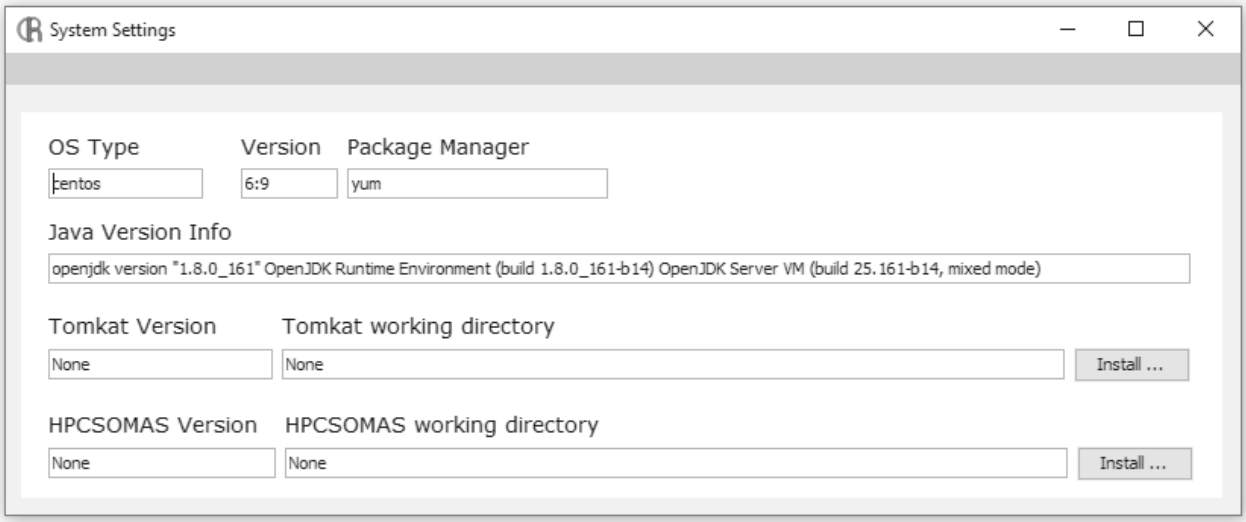


Рис. 4. Сводка данных опроса ВУ

Мастер позволяет автоматизировать многие типичные сценарии установки ПО, а при невозможности автоматического решения можно скорректировать процесс, вводя на консоль команды самостоятельно, по предлагаемым мастером подсказкам.

Разработанные средства были использованы при подготовке ресурсов к установке микросервисов AMP и агентов TLA и BLA в вычислительной инфраструктуре для решения задач качественного исследования неявных ДДС k-ого порядка.

4. Агенты TLA и BLA. В сформированной инфраструктуре выполняется двухуровневое распараллеливание булевой модели. Полученные на верхнем уровне расщепления подзадачи распределяются по узлам нижнего уровня, подвергаются углубленному расщеплению и решаются параллельно как независимые.

TLA и BLA являются специализированными агентами и предназначены для организации проверки выполнимости булевых моделей, структура которых включает бинарные (преимущественно) и p-арные (p много больше двух) ограничения.

TLA и BLA организуют вычисления на основе параллелизма по данным путем двухуровневого расщепления булевой модели динамического свойства ДДС (рис. 5). Расщепление означает выбор переменной из булевой модели и замену исходной модели подмоделями для двух истинностных значений выбранной переменной. Формируются очереди кортежей верхнего и нижнего уровней. Кортеж представляет собой набор истинностных значений булевых переменных, по которым производилось расщепление. На верхнем уровне генерируется частичная булева модель динамического свойства для глубины расщепления L (моментов дискретного времени t).

Агент TLA формирует L-кортежи, в которые входят L значений переменных. Агент BLA использует полученный от TLA L-кортеж для вставки унарных ограничений и углубляет расщепление модели на величину S для построения вспомогательной SAT задачи, сгенерированной по ограничениям, отражающим динамику моделирующей задачу ДДС для заданной глубины расщепления и контексту задачи (матрице смежности A графического описания, отражающего связи объектов задачи). При формировании очередей кортежей используется авторский решатель satall2p [19].

Предоставляемый HPCSOMAS-MSC сервис MSCSAT для контекстно-ориентированной постановки задачи имеет следующие параметры:

– Имя задания.

– Схема параллельного выполнения $TLA \times BLA \times CTH$ (количество TLA, количество BLA, запускаемых TLA, дочерних потоков (CTH), запускаемых BLA).
– Ограничение времени на выполнение подзадачи и приращение этого времени.
– Матрица *A* описания задачи.
– Булевы ограничения описания динамики ДДС и спецификации свойства в содержательных формулировках.

Поступающие из очереди подзадачи завершаются с сообщением «отложена по времени» (LT) при достижении заданного ненулевого ограничения времени. Повторный запуск этих подзадач выполняется с увеличением времени их выполнения на заданное в параметрах приращение, если при достижении конца очереди решение не найдено.

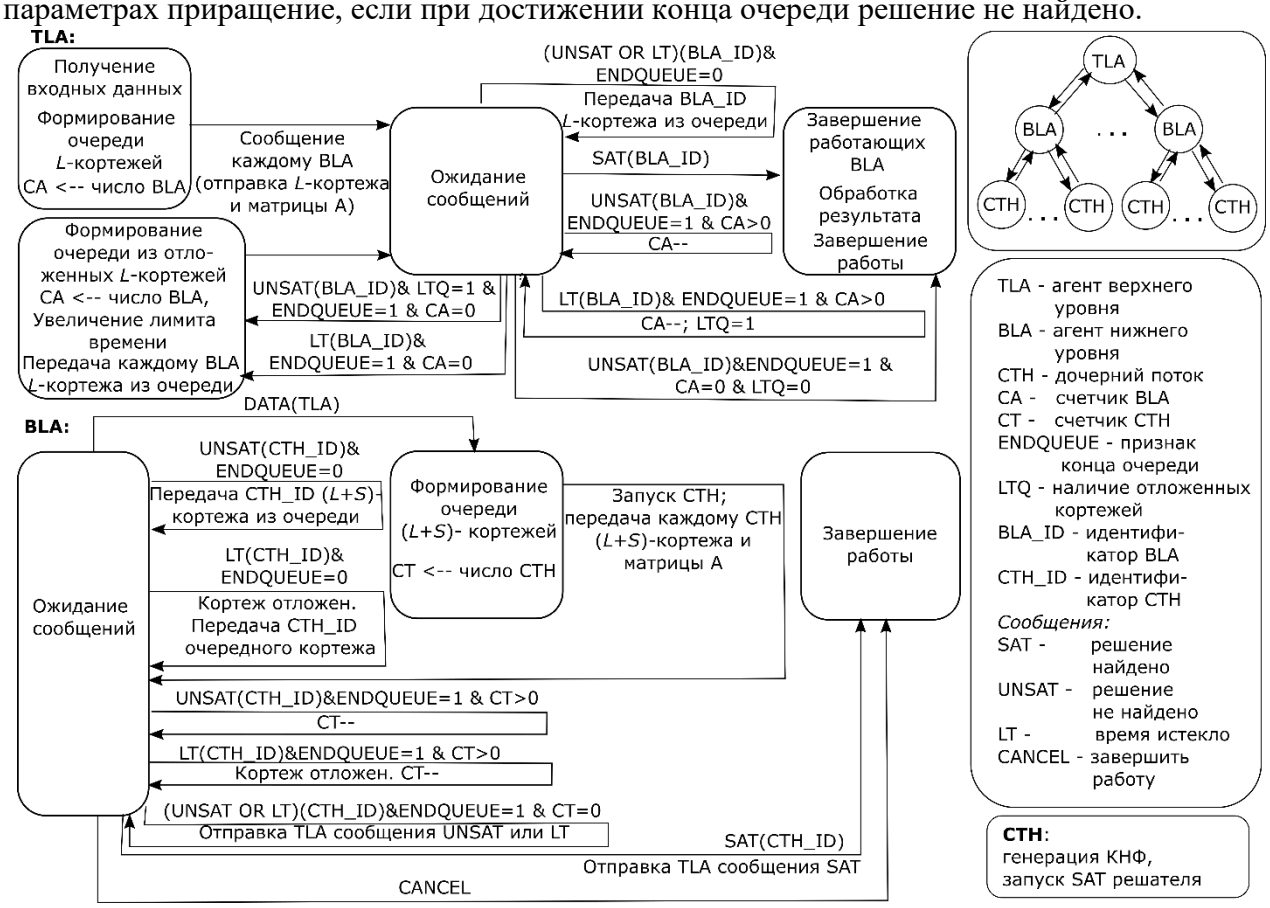


Рис. 5. Модели динамики поведения агентов TLA и BLA

5. Вычислительный эксперимент. Сервис MSCSAT, TLA, BLA и микросервисы AMP для качественного анализа рассматриваемых в первом разделе динамических свойств неявных ДДС были развернуты на следующих вычислительных ресурсах: узлах кластера «Академик В.М. Матросов» (http://hpc.icc.ru), локальном выделенном сервере ИДСТУ СО РАН и облачном выделенном сервере (https://firstvds.ru/).

В первом эксперименте проверка свойства достижимости целевой функцией определенного значения выполнялась для задачи о минимальном покрытии множества, постановка которой, описание динамики моделирующей ее ДДС и спецификация данного динамического свойства приведены в [17]. С помощью сервиса MSCSAT были решены тестовые «unicost» задачи о покрытии множества (set covering) E.1, E.2, E.3, E.4, E.5 из библиотеки OR-Library (http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html). Матрица A описания этих задач имеет размерность 50x500. Задача о покрытии множества решалась для покрытия длины 5.

Во втором эксперименте проверка свойства продолжаемости локального решения уравнения (3) выполнялась для неявной ДДС, моделирующей задачу нахождения Гамильтонова цикла в графе, частным случаем которой является задача Эйлера о замкнутом движении шахматного коня. Построение булевой модели для проверки этого свойства приведено в [19]. Для поиска замкнутого пути были решены задачи для шахматной доски 6x6, 8x8 и 10x10.

В модели динамики поведения TLA и BLA, в отличие от [19], добавлен механизм отложенных подзадач. Для наиболее сложных задач (в частности, 10x10) при выборе кортежей из очереди используется эвристика учета степени вершины графа. Детали проведения экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты выполнения задач сервисом MSCSAT

Данные тестирования задач	E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	6x6	8x8	10x10
Переменные	2500					1332	4160	10100
Ограничения	1127795					108379	625825	1927551
Количество TLA	1					1	1	8
Количество BLA, запускаемых TLA	6					4	16	8
Количество потоков, запускаемых BLA	6					4	4	8
Время последовательного решения (сек.)	-					33,47	3617,43	-
Время параллельного решения (сек.)	5,04	0,96	0,65	2,78	2,39	0,07	79,10	840,57
L	2					1	1	16
S	1					1	1	8
Ограничение времени	0					0	0	900
Приращение времени	0					0	0	300

Прочерк в графе таблицы означает, что задача не решилась последовательно SAT-решателем Minisat в пределах приемлемого времени. При параллельном выполнении Minisat запускался на потоках для проверки выполнимости подзадач.

Заключение. В статье представлены средства автоматизации подготовки ресурсов вычислительной инфраструктуры для развертывания пакета прикладных микросервисов и агенты, управляющие двухуровневыми параллельными вычислениями с использованием этого пакета при проведении качественного анализа неявных ДДС, динамика поведения которых ориентирована на структуру булевых моделей, формируемых в процессе исследования свойств достижимости целевой функцией определенного значения и продолжаемости локального решения. Широта применения ДДС в качестве моделей объектов при проведении исследований в разнообразных предметных областях обусловливает практическую значимость разработанных средств.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 121032400051-9 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах».

Список источников

1. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Qualitative analysis of autonomous synchronous binary dynamic systems. MESA, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 407-419.
2. Cheng D., H. Qi, Xue A. A survey on semi-tensor product of matrices. Jrl Syst Sci & Complexity, 2007, no. 20, pp. 304-322.

3. Dubrova E., Teslenko M. A SAT-based algorithm for finding short cycles in shift register based stream ciphers. IACR cryptology ePrint archive, 2016. Available at: https://eprint.iacr.org/2016/1068 (accessed: 21.07.2022).
4. Li R., Yang M., Chu T. Controllability and observability of Boolean networks arising from biology. Chaos, 2015, vol. 25, no. 2:023104, DOI:10.1063/1.4907708.
5. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Microservice approach to the qualitative study of attractors of binary dynamic systems based on the Boolean constraint method. 2020 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, IEEE, 2020, pp. 2247-2252, DOI: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245300.
6. Irudayaraj J., Saravanan P. Adoption Advantages of micro-service architecture in software industries. International Journal of Scientific & Technology Research, 201, vol. 8, pp. 183-186.
7. Capuccini M., Larsson A., Carone M. On-demand virtual research environments using microservices. PeerJ Comput. Sci, 2019, vol.5:e232, DOI:10.7717/peerj-cs.232.
8. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Microservice-oriented approach to automation of distributed scientific computations. 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), IEEE, 2019, pp. 236-241, DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757053.
9. Pashinin A.A., Bogdanova V.G. Application of user dew agent in hybrid-computing environments. 2020 1st International Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS), CEUR-WS Proceedings, 2020, pp. 135-145, DOI: 10.47350/AICTS.2020.16.
10. Chopra M., Mungi J., Chopra K. A Survey on use of cloud computing in various fields. IJSETR, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 480-488.
11. Navale V., Bourne P.E. Cloud computing applications for biomedical science: a perspective. PLOS Comp Biol., 2018, vol. 14, no. 6: e1006144, DOI: 10.1371/journal.pcbi.1006144.
12. Dahlö M., Scofield D.G., Schaal W., Spjuth O. Tracking the NGS revolution: managing life science research on shared high-performance computing clusters. Gigascience, 2018, vol. 7, no. 5, pp. 1-11.
13. Lampa S., Dahlö M., Olason P. I. Lessons learned from implementing a national infrastructure in Sweden for storage and analysis of next-generation sequencing data. Gigascience, 2013, vol. 2, no. 1, DOI:10.1186/2047-217X-2-9.
14. Armstrong D., Espling D., Tordsson J. Contextualization: dynamic configuration of virtual machines. J Cloud Comp., 2015, vol. 4, DOI:10.1186/S13677-015-0042-8.
15. Weerasiri D., Barukh M.C., Benatallah B. A taxonomy and survey of cloud resource orchestration techniques. ACM Computing Surveys (CSUR), 2017, vol. 50, no. 2, article no. 26, pp. 1-41, DOI:10.1145/3054177.
16. Petcu D. Service deployment challenges in cloud-to-edge continuum. Scalable Computing: Practice and Experience, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 313-320, DOI: 10.12694:/scpe.v22i3.1941.
17. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. A logical approach to qualitative analysis of controlled nonlinear binary dynamic systems, MESA, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1-9.
18. Bochmann D., Posthoff C. Binary dynamic systems. Berlin: Academic Verlag, 1981, 320 p.
19. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Implicit Boolean network for planning actions. 2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), IEEE, 2022, pp. 871-876. DOI: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803418.

Опарин Геннадий Анатольевич. *Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории 5.1 Параллельных и распределенных вычислительных систем, заведующий отделением вычислительных и управляющих систем, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, AuthorID: 1498, SPIN: 4544-2804, ORCID: 0000-0002-3757-6041, prn51@icc.ru, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.*

Богданова Вера Геннадьевна. *Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории 5.1 Параллельных и распределенных вычислительных систем, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, AuthorID: 1536, SPIN: 9123-3563, ORCID: 0000-0002-5763-6849, bvg@icc.ru, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.*

Пашинин Антон Алексеевич. *Младший научный сотрудник лаборатории 5.1 Параллельных и распределенных вычислительных систем, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, AuthorID: 776425, SPIN: 9325-0914, ORCID: 0000-0002-1205-7595, apcrol@gmail.com, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.*

UDC 004.421+004.4’2+004.771
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.011

Technology of qualitative study of binary dynamic systems in microservice infrastructure

Gennady A. Oparin, Vera G. Bogdanova, Anton A. Pashinin
Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS,
Russia, Irkutsk, *apcrol@gmail.com*

Abstract. The proposed technology is based on methods, models, software tools, and automation tools for solving problems of qualitative research of binary dynamic systems based on the Boolean constraint method in microservice computing infrastructure. The essence of the method is to reduce the problems under consideration to solving SAT or 2QBF problems by constructing a Boolean model of a dynamic property. The software includes tools for building Boolean models and checking their feasibility. We implemented these software tools as a package of applied microservices as part of our technology. The launch of the microservice is controlled by software agents installed in the nodes of the computing infrastructure, created based on the previously developed HPCSOMAS-MSC instrumental platform. This study aims to extend HPCSOMAS-MSC with tools for automation of computing nodes preparation in a distributed environment for deploying a package of applied microservices and specialized agents focused on the structure of a Boolean model to provide two-level control of parallel computing when checking its feasibility. At the upper level, the subtasks obtained by splitting the Boolean model are distributed over the nodes of the lower level, subjected to deep splitting, and solved in parallel as independent ones. Computational experiments for a qualitative study of binary dynamic systems with a large state vector dimension have shown the effectiveness of the proposed technology. The wide use of such systems as object models in conducting research in various subject areas determines the practical significance of the proposed technology.

Keywords: binary dynamic systems, qualitative analysis, Boolean constraint method, microservice

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. 121032400051-9 «Technologies for the development and analysis of subject-oriented intelligent group control systems in non-deterministic distributed environments».

References

1. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Qualitative analysis of autonomous synchronous binary dynamic systems. MESA, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 407-419.
2. Cheng D., H. Qi, Xue A. A survey on semi-tensor product of matrices. Jrl Syst Sci & Complexity, 2007, no. 20, pp. 304-322.
3. Dubrova E., Teslenko M. A SAT-based algorithm for finding short cycles in shift register based stream ciphers. IACR cryptology ePrint archive, 2016. Available at: https://eprint.iacr.org/2016/1068 (accessed: 21.07.2022).
4. Li R., Yang M., Chu T. Controllability and observability of Boolean networks arising from biology. Chaos, 2015, vol. 25, no. 2:023104, DOI:10.1063/1.4907708.
5. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Microservice approach to the qualitative study of attractors of binary dynamic systems based on the Boolean constraint method. 2020 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, IEEE, 2020, pp. 2247-2252, DOI: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245300.
6. Irudayaraj J., Saravanan P. Adoption Advantages of micro-service architecture in software industries. International Journal of Scientific & Technology Research, 201, vol. 8, pp. 183-186.
7. Capuccini M., Larsson A., Carone M. On-demand virtual research environments using microservices. PeerJ Comput. Sci, 2019, vol.5:e232, DOI:10.7717/peerj-cs.232.
8. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Microservice-oriented approach to automation of distributed scientific computations. 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), IEEE, 2019, pp. 236-241, DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757053.
9. Pashinin A.A., Bogdanova V.G. Application of user dew agent in hybrid-computing environments. 2020 1st International Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS), CEUR-WS Proceedings, 2020, pp. 135-145, DOI: 10.47350/AICTS.2020.16.
10. Chopra M., Mungi J., Chopra K. A Survey on use of cloud computing in various fields. IJSETR, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 480-488.
11. Navale V., Bourne P.E. Cloud computing applications for biomedical science: a perspective. PLOS Comp Biol., 2018, vol. 14, no. 6: e1006144, DOI: 10.1371/journal.pcbi.1006144.

12. Dahlö M., Scofield D.G., Schaal W., Spjuth O. Tracking the NGS revolution: managing life science research on shared high-performance computing clusters. Gigascience, 2018, vol. 7, no. 5, pp. 1-11.
13. Lampa S., Dahlö M., Olason P. I. Lessons learned from implementing a national infrastructure in Sweden for storage and analysis of next-generation sequencing data. Gigascience, 2013, vol. 2, no. 1, DOI:10.1186/2047-217X-2-9.
14. Armstrong D., Espling D., Tordsson J. Contextualization: dynamic configuration of virtual machines. J Cloud Comp., 2015, vol. 4, DOI:10.1186/S13677-015-0042-8.
15. Weerasiri D., Barukh M.C., Benatallah B. A taxonomy and survey of cloud resource orchestration techniques. ACM Computing Surveys (CSUR), 2017, vol. 50, no. 2, article no. 26, pp. 1-41, DOI:10.1145/3054177.
16. Petcu D. Service deployment challenges in cloud-to-edge continuum. Scalable Computing: Practice and Experience, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 313-320, DOI: 10.12694:/scpe.v22i3.1941.
17. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. A logical approach to qualitative analysis of controlled nonlinear binary dynamic systems, MESA, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1-9.
18. Bochmann D., Posthoff C. Binary dynamic systems. Berlin: Academic Verlag, 1981, 320 p.
19. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Implicit Boolean network for planning actions. 2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), IEEE, 2022, pp. 871–876. DOI: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803418.

Gennady Anatol'evich Oparin. *Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory 5.1. of Parallel and distributed computing systems, Head of Computing and control systems Department, Institute of System Dynamics and Control Theory named after V.M. Matrosov SB RAS, AuthorID: 1498, SPIN: 4544-2804, ORCID: 0000-0002-3757-6041, prn51@icc.ru, 664033, Russia, Irkutsk, st. Lermontov, 134.*

Vera Gennad'evna Bogdanova. *PhD in Technical Sciences, associate professor, Senior Researcher of the Laboratory 5.1. of Parallel and distributed computing systems, Institute of System Dynamics and Control Theory named after V.M. Matrosov SB RAS, AuthorID: 1536, SPIN: 9123-3563, ORCID: 0000-0002-5763-6849, bvg@icc.ru, 664033, Russia, Irkutsk, st. Lermontov, 134.*

Anton Alekseevich Pashinin. *Junior Researcher of the Laboratory 5.1. of Parallel and distributed computing systems, Institute of System Dynamics and Control Theory named after V.M. Matrosov SB RAS, AuthorID: 776425, SPIN: 9325-0914, ORCID: 0000-0002-1205-7595, apcrol@gmail.com, 664033, Russia, Irkutsk, st. Lermontov, 134.*

Статья поступила в редакцию 25.07.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 07/25/2022; approved after reviewing 09/16/2022; accepted for publication 11/25/2022.

УДК 528:004.78
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.012

Подходы к созданию Региональной ГИС Алтайского края

Ротанова Ирина Николаевна, Юнаков Владимир Сергеевич
Алтайский государственный университет,
Россия, Барнаул, *rotanova@mail.asu.ru*

Аннотация. Представляемое исследование посвящено рассмотрению вопросов создания в Алтайском крае Региональной геоинформационной системы (РГИС), что отвечает требованиям политики цифровизации Российской Федерации. Создание РГИС Алтайского края является актуальным и перспективным практико-ориентированным направлением, отвечающим задаче геоцифровизации и геоинформационного обеспечения субъектов РФ. Цель исследования состоит в обосновании подходов и разработке концептуальных положений для создания РГИС Алтайского края, что опирается на анализ имеющегося опыта разработок региональных ГИС в других субъектах РФ, а также на создание первичной геоинформационной базы данных для края в рамках специального локального контента: природно-ресурсного, аграрного, экологического. Основным методом исследования служит геоинформационно-картографический. Основные результаты заключаются в разработке концептуальной модели РГИС, ее структуры и структуры базы данных. Определены приоритетные направления прототипа РГИС, как для территории края в целом, так и для модельных административных районов: аграрное, природно-ресурсное, экологическое. Предложен формат РГИС Алтайского края в виде ГИС-атласа и геопортала с учетом уже разработанных и частично реализуемых для территории края ГИС транспорта и ЖКХ. Рассмотрены вопросы взаимосвязи РГИС с инфраструктурой пространственных данных (ИПД) и геопорталом. Дано представление о структуре и составе региональных ГИС субъектов РФ, в частности, указаны такие характеристики, как вид и тематика ГИС, используемая модель данных, заказчик и разработчик ГИС. Научная новизна исследования заключается в оригинальности подходов к созданию РГИС Алтайского края, учитывающих опыт реализации РГИС в других субъектах РФ.

Ключевые слова: цифровизация, геоинформатика, геоинформационная система, геопортал, инфраструктура пространственных данных

Цитирование: Ротанова И.Н. Подходы к созданию Региональной ГИС Алтайского края / И.Н. Ротанова, В.С. Юнаков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 156-169. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.012.

Введение. Актуальность исследования, связанного с подходами к созданию Региональной ГИС (РГИС) Алтайского края, заключается в том, что создание региональных ГИС – ГИС территориальных единиц верхнего уровня, субъектов Российской Федерации – является необходимым и перспективным практико-ориентированным направлением геоцифровизации субъектов Российской Федерации. Более чем в половине административных единиц РФ уже функционируют РГИС различных структуры и контента. Однако, на половину субъектов, имеющих РГИС, приходится половина не имеющих РГИС.

К таким регионам относится и Алтайский край. К сожалению, в настоящее время субъект не обладает полноценно работающей ГИС. На данный момент выполняются минимально требуемые государственными органами управления работы в области геоцифровизации региона. Инициатива создания полноценной РГИС Алтайского края исходит лишь от представителей науки и вузов, в частности, работающих в области географии, картографии, создания геоинформационных систем.

Наличие у Алтайского края функционирующей РГИС позволило бы значительно продвинуться в информатизации сфер деятельности, связанных с рациональным использованием природно-ресурсного потенциала, в частности, почвенного (земельного), водного и лесного, а также с мониторингом экологической ситуации, с развитием рекреации, туризма и т.д. Кроме того, это могло бы сказаться на значительном прогрессе в информатизации аграрного сектора и социально-экономической сферы.

Под региональными геоинформационными системами понимаются территориально и тематически ограниченные ГИС, основанные на принципах совместимости и взаимной

дополняемости или открытости данных и представляющие собой продукт конечного пользователя [1, 2].

Создание региональной ГИС – комплексная и трудозатратная задача. В первую очередь, для формирования ГИС требуются актуальные пространственные данные, определяемые инфраструктурой пространственных данных (ИПД) [3]. Немаловажным аспектом является правильно выстроенная типовая структура будущей ГИС, в большинстве случаев основным «каркасом» региональной ГИС является геопортал. Большинство известных РГИС имеют именно такую концепцию создания [4].

Любая ГИС реализуется, используя набор пространственных данных, заложенных в ее основе. Пространственные данные представляют собой упорядоченные сведения о географических объектах, об их местоположении и свойствах. В современных условиях решение задач повышения эффективности регионального управления невозможно без использования достоверной пространственной информации, в связи с этим оптимальным решением для создания, доступа, обработки и хранения пространственных данных в сети Интернет является создание региональной инфраструктуры пространственных данных (ИПД) [5]. Региональная ИПД способна решить такие классические проблемы региональных пространственных данных, как:

– Разнородность данных. В создании и обновлении пространственных данных задействованы различные органы власти, но, из-за отсутствия стандарта при пополнении и использовании пространственных данных, пользователи используют свои методы хранения, обработки и передачи пространственных данных, в результате чего различаются форматы и виды хранения данных, системы координат, масштабы и т.д. В конечном итоге это затрудняет работу и дальнейшее использование данных различными пользователями.

– Неактуальность картографических материалов. Значительная часть картографических материалов в настоящее время не обновляется своевременно, в частности, в связи с недостаточно развитым применением технологий космического мониторинга, в результате чего в различных информационных системах схожие данные могут различаться.

– Разрозненность пространственных данных. Информация, используемая как органами власти, так и обычными пользователями, распределена по различным информационным системам, поэтому очень часто проблематично найти нужную информацию в доступном комплексе, кроме того, она бывает неактуальна или недостоверна, что затрудняет анализ и оценку ситуации в регионе.

В связи с необходимостью комплексного решения названных и других проблем региональная ИПД в настоящее время служит стандартом для сбора, хранения и распространения пространственных данных, а также обеспечивает доступ к ним [6, 7]. В план мероприятий Росреестра РФ по созданию региональной модели ИПД были включены пилотные субъекты РФ (республики Башкортостан и Татарстан, Кировская, Саратовская, Свердловская, Тверская, Ульяновская, Ярославская области и Алтайский край) [8].

Основным инструментом доступа к ИПД является геоинформационный портал – геопортал. Согласно определению, данному на главной странице Геопортала ИПД РФ: «Геопортал – это единая точка доступа к пространственной информации Российской Федерации. Геопортал обеспечивает поиск, просмотр, загрузку метаданных, а также скачивание и публикацию пространственных данных и веб-сервисов в соответствии с правами доступа и видом лицензии на использование материалов» [9]. В данном контексте говорится только о Российской Федерации, но в целом определение является комплексным и может быть верным и в отношении зарубежных геопорталов, в их числе европейская Директива INSPIRE [10, 11].

Геопортал является неотъемлемой частью ИПД, без него невозможно предоставить пользователям полноценный доступ к имеющейся в ИПД информации, а без доступа к пространственной информации, соответственно, невозможно создать региональную ГИС. Такая концепция «триединства» компонентов является в своем роде уникальной, но, с другой стороны, довольно сложной, так как для реализации поставленной цели работа производится сразу над тремя компонентами, что требует их взаимного соответствия.

Несмотря на разнообразие имеющихся в настоящее время РГИС субъектов Российской Федерации, большинство из них представлены в следующем виде: региональные геопорталы; региональные ГИС-атласы. Реже функционируют: региональные ГИС-порталы; региональные информационные системы; региональные электронные карты.

Помимо общей классификации, региональные ГИС подразделяются по следующим параметрам.

Виды региональных ГИС по используемой модели данных:

- Векторные. Такие системы работают с топологическими и не топологическими моделями данных, а также иногда с триангуляционными моделями поверхностей.
- Растровые. Эти системы позволяют работать только с растровыми моделями данных и иногда с регулярными моделями поверхностей.
- Гибридные. Такие системы совмещают в себе возможности векторных и растровых ГИС.

Виды региональных ГИС по тематике и содержанию: природно-ресурсные; социально-экономические; транспортные; сельскохозяйственные; ГИС здравоохранения, образования и культуры; ГИС экологии и природопользования; ГИС экономики и финансов; ГИС коммунального хозяйства и строительства; ГИС социально-политического развития; ГИС кадастра природных ресурсов; ГИС территориального планирования региона; ГИС градостроительной деятельности; комплексные (интегральные) ГИС (объединяющие несколько видов).

Также каждый вид ГИС по тематике включает системно сформированный список компонентов, которые необходимы для полноценного раскрытия содержания ГИС. Так, например, ГИС кадастра природных ресурсов объединяет и включает информацию компонентов ГИС геологии, ГИС лесного хозяйства, ГИС водного хозяйства, а также рыбного хозяйства, заказников, охотничьего хозяйства и др. [12].

1. **Постановка задачи.** Целью работы является формирование концептуальной модели РГИС Алтайского края и ее прототипа на примере модельных административных районов. Достижение цели опирается на решение ряда первоочередных задач, обосновывающих подходы к созданию РГИС:

– анализ имеющегося опыта создания региональных ГИС, их структуры, контента, функциональных и территориальных особенностей;

– выявление и анализ взаимосвязи региональных ГИС с ИПД и геопорталами;

– обоснование концептуальных положений и подходов к созданию региональной ГИС Алтайского края, формирование логической и информационной моделей ГИС и создание первичного базового геоинформационного ресурса для края в рамках прототипов на модельные административные районы.

Каждая региональная ГИС разрабатывается по определенному плану, включающему реализацию всех структурных особенностей территории. Структура ГИС определяется на начальном этапе разработки и представляет собой последовательно размещенные атрибутивные таблицы определенной тематики. Создаваемые на основе данных карты внутри разделов могут быть структурированы как по типу, так и по масштабу.

Структура региональной ГИС определяется следующими факторами:

- размерами и географическими особенностями картографируемой территории;
- назначением – кругом лиц, основных пользователей ГИС и техническими условиями для работы с ГИС;
- содержанием – широтой и глубиной информации, заложенной при разработке ГИС, особенностями описания того или иного природного и социально-экономического явления.

Кроме того, при структурировании региональной ГИС выбирается оптимальная модель представления данных, которая должна отвечать следующим требованиям: наглядность представления информации; удобство поиска информации; возможность постоянного обновления ГИС; возможность использования информации и программных продуктов для различных целей.

Также при разработке ГИС учитывается такой немаловажный момент, как легенда. Легенды могут быть следующих видов: элементарные, комбинированные, типологические комбинированные, комплексные, и синтетические, все эти виды легенд могут также комбинироваться [13].

Предлагается использовать наиболее классический вариант структурирования ГИС, он состоит из следующих блоков: базовый информационный модуль; земельные ресурсы; минерально-сырьевые ресурсы; водные ресурсы; лесные ресурсы; фаунистические ресурсы; рекреационные ресурсы [14].

В связи с особенностями картографируемой местности, разработчика ГИС, а также возможностей и желания заказчика, данная структура ГИС может как значительно дополняться, так и исключать некоторые приведенные выше структурные блоки.

Из возможных направлений разработки региональных ГИС субъектов РФ вытекают концепты возможных геоинформационных разработок РГИС Алтайского края. В частности, это: аграрная региональная ГИС; природно-ресурсная региональная ГИС; экологическая региональная ГИС.

Каждая из ГИС может быть по-своему уникальна и выделена как основная согласно заданной тематике. Но также все эти три концепта могут быть объединены в одну, интегрированную ГИС, представленную региональным геопорталом Алтайского края.

2. Анализ имеющегося опыта создания региональных ГИС. Из 85 субъектов Российской Федерации работающими РГИС, по данным веб-сайта GISGeo, обладают 44 региона, что составляет чуть более 50% от общего числа [15]. Возможно, что такая ситуация связана с тем, что функционирование РГИС не является обязательным и не имеет законодательной поддержки, поэтому региональные власти не всегда уделяют должное внимание и финансирование реализации региональных ГИС-проектов. Тем не менее, существующие РГИС показывают довольно высокий уровень проработки и использования значительного комплекса пространственно-информационных данных.

Наиболее известным и действенным примером реализации геоинформационных систем, основанных на единых подходах ИПД, за рубежом является Директива INSPIRE, вступившая в силу в 2007 г. Директива INSPIRE представляет собой программу, направленную на создание целостной базы геоинформационных данных, реализуемую более чем в 30 странах Европейского союза. Основная цель создания данной директивы состоит в достижении целей устойчивого развития (ЦУР) и экологической политики посредством объединения и актуализации блока пространственных данных в виде целостной ИПД [16]. Несомненно, ее весомым достоинством является легкий доступ пользователей к необходимой пространственной информации об окружающей среде, с последующей возможностью обмена ею между самими пользователями и между уполномоченными организациями государственного сектора [7].

Анализ информации о российских региональных ГИС позволяет сделать вывод об отсутствии как единых подходов к созданию целостной базы геоинформационных данных, так и каких-либо закономерностей в их распределении на территории Российской Федерации. Наличие ГИС индивидуально и независимо для каждого региона. Причем, ни один федеральный округ не обладает полным числом субъектов с наличием РГИС,

Несмотря на наличие более половины регионов РФ, имеющих ГИС, для современной России этого, к сожалению, недостаточно. Многие регионы являются перспективными в развитии геоинформационного обеспечения.

Пожалуй, одним из самых комплексных и проработанных ГИС-проектов в азиатской части России является ГИС Красноярского края под названием «Енисей-ГИС» [17]. На геопортале представлены более 15 тематических блоков, посвящённых различным областям, таким, как: сельское хозяйство, флора и фауна, границы, экономика, рельеф, окружающая среда, данные наук о Земле, здравоохранение, картография, поверхностные воды, кадастр и др. Кроме того, в каждом из тематических блоков присутствуют порядка 2-3 слоев подобластей, представленных в различных масштабах и фоновом оформлении. Рассмотрим некоторые из них.

В разделе «Окружающая среда» находятся карты различной тематики: «ООПТ (линейные и площадные)», «Памятники природы», «Свалки» и «Границы притундровых лесов» и др. Так, в слое площадных ООПТ с помощью полигонов выделены заповедники и заказники на территории Красноярского края, в частности, представлены границы, а также основная информация о Саяно-Шушенском заповеднике.

Следующий раздел, имеющий название «Данные наук о Земле», включает в себя 23 тематические карты, посвященные различным географическим особенностям территории, в частности это: лесосырьевые ресурсы, литолого-геологическое строение, острова, месторождения нефти и газа, плато и горные образования, границы многолетней мерзлоты, болота, ледники и т.д.

Другую концепцию имеет ГИС Ростовской области [18]. По своей сути это интерактивная карта, однако, помимо тематических слоев, в своей структуре она имеет специальный раздел с новостями, которые актуализируются каждый день, а кроме того, каждая новость имеет свою географическую привязку на местности, чтобы пользователь мог без лишних действий узнать, где именно происходило то или иное событие. Слои в ГИС выполнены в виде разделов, каждый из которых имеет свою определенную тематику. Всего их 16, и в большей степени они имеют социально-экономическую направленность. В частности это: административное деление, инфраструктура, инвестиции, образование, культура и туризм, социальная среда, строительство, спорт, транспорт и др. Каждый из разделов включает еще несколько слоев более узкой тематики, так, например, раздел инфраструктуры содержит информацию о пешеходных переходах, пожарных частях, многофункциональных центрах и т.д. Из природной тематики ГИС содержит только раздел экологии, где имеются слои о местах обитания краснокнижных животных и растений, расположении охотничьих угодий, природных отвалов, недр по добыче полезных ископаемых и т.д. Оригинальным для РГИС Ростовской области является наличие исторического раздела, а именно, набор слоев, посвященных тематике Великой Отечественной войны, где указаны боевые пути, имена героев и места боевой славы.

В качестве картографической основы Ростовская РГИС использует свою цифровую модель по умолчанию, однако можно выбрать из списка необходимую пользователю, например, подложку OpenStreetMap, карту 2ГИС, Yandex, спутниковые снимки ESRI или Yandex [18].

Особенностями геопортала Тюменской области является, как его структура в виде тематических блоков, которые ведут на уникальные картографические сервисы, так и оригинальность в выборе тематики разделов и слоев [19]. В совокупности геопортал располагает геоданными в количестве 24 наборов, включает 21 картографический сервис с 210 слоями. К наиболее интересным разделам геопортала относятся: зоны покрытия сотовыми операторами, информатизация, недропользование, рыболовство, территориальная схема обращения с отходами, закупки тюменской области и др. Веб-сервис обладает и стандартным набором слоев, куда входят общественный транспорт, здравоохранение, строительство и инфраструктура, из природно-ресурсной направленности – разделы недропользования, охотопользования, рыболовства, лесного комплекса и экологии [19].

Во втором десятилетии XXI века в регионах РФ были с разной степенью завершенности реализованы технологические решения для создания полнофункциональных или функционально ограниченных геопорталов, среди которых: геопортал электронного правительства Самарской области [20]; геопортал Уральского федерального округа [21], геопортал Чувашии [22] в составе ИПД Чувашской Республики [22] и геопортал Республики Коми [23], геопортал Воронежской области [24]. Не все региональные геопорталы полноценно соответствуют точному определению «геоинформационные порталы», в их числе геоинформационные ресурсы Ульяновской [25], Белгородской [26], Кировской областей [27], Приморского края [28]. По сути они представляют собой сервисы веб-картографирования, ошибочно относимые к элементам ИПД [5].

В таблице 1 представлены некоторые характеристики известных региональных ГИС субъектов РФ.

Анализ данных таблицы показывает оригинальный подход к их созданию, разнообразие видов ГИС, их тематики, модели данных, а также заказчиков в регионе [15].

Алтайский край по данным геопортала GISGeo [15] относится к регионам, имеющим собственную ГИС, однако, данная ГИС позиционирует себя как портал строительства, транспорта и ЖКХ, а в настоящее время (2021 г.) не функционирует.

Помимо предложенных выше концептов создания региональной ГИС Алтайского края, стоит рассмотреть имеющийся опыт создания и проектирования ГИС различных авторских коллективов.

Одно из первых упоминаний о разработке геоинформационной системы Алтайского края – в 1998 год в научной статье «О разработке экологической ГИС «Природные ресурсы Алтайского края» [29]. Данная ГИС разрабатывалась Институтом водных и экологических проблем (ИВЭП) СО РАН с 1994 года как интегрированная информационная система для целей выработки и принятия управленческих решений в сфере природопользования и охраны окружающей среды на региональном уровне. Основной задачей разработчиков было создание ГИС, позволяющей собирать, хранить и предоставлять доступ к комплексным данным об основных природных ресурсах Алтайского края. Основные тематические блоки ГИС были выделены, исходя из типа природных ресурсов, так, ведущими являлись: лесные ресурсы, водные ресурсы, атмосферный воздух и земельные ресурсы. Тематические цифровые карты в зависимости от назначения варьируются в масштабе от 1:200 000 до 1:1 000 000.

В 2018 году была представлена разработка эколого-аграрного атласа Алтайского края в формате веб-ГИС, выполненная в Алтайском государственном университете, а в 2019 году – Эколого-ландшафтная ГИС Алтайского края. На данном этапе разработаны концепция, программа и структура ГИС и реализован ее прототип. В частности, были созданы три тематические карты. Первая – «Карта эколого-природного потенциала ландшафтов Алтайского края» – посвящена пространственному анализу эколого-природного потенциала

(ЭПП), рассматривается потенциал природных компонентов рельефа, почв и растительности с учетом гидрологической составляющей. Для каждого природного компонента ЭПП определялся с помощью балльных шкал.

Таблица 1. Сравнительные характеристики региональных ГИС субъектов РФ (составлено по данным GISGeo [15])

Регион	Вид ГИС	Тематика ГИС	Модель данных	Заказчик
Алтайский край	Геопортал	Социально-экономическая	Гибрид	Управление ЖКХ края
Амурская область	Геопортал	Природно-ресурсная	Гибрид	Нет данных
Архангельская область	Геопортал	Комплексная	Вектор	Правительство области.
Воронежская область	Геопортал	Комплексная	Вектор	Правительство области
Кемеровская область	ГИС Территориаль-ного планирования	Градостроительная.	Вектор.	Управление архитектуры и градостроительства .
Красноярский край	Геопортал	Комплексная	Гибрид	Министерство цифрового развития края
Мурманская область	Геопортал	Комплексная	Гибрид	Правительство области
Новосибирская область	Геопортал	Комплексная	Гибрид	Нет данных
Республика Бурятия	Геопортал	Комплексная	Гибрид	Нет данных
Республика Коми	Геопортал	Природно-ресурсная	Гибрид	Правительство республики
Республика Крым	РГИС	Комплексная	Гибрид	Нет данных
Ростовская область	Геопортал	Территориального планирования	Растр	Департамент архитектуры и градостроительства
Смоленская область	Геопортал	Социально-экономическая	Гибрид	Правительство области
Томская область	Геопортал	Комплексная	Гибрид	Нет данных
Тюменская область	Геопортал	Комплексная	Гибрид	Департамент информатизации
Хабаровский край	РГИС	Социально-экономическая	Вектор	Правительство края
Ярославская область	Геопортал	Комплексная	Гибрид	Нет данных

Вторая карта показывает антропогенное воздействие и влияние природных процессов на ландшафты Алтайского края. Рассматривались факторы использования земель

сельскохозяйственного и лесохозяйственного назначения. Также учитывалось воздействие на ландшафты: засоление, дефляция, водная эрозия, заболоченность, дороги, ЛЭП и селитьба. Третья карта отображает измененность ландшафтов в трех категориях: низкой, средней (умеренной и интенсивной) и высокой [30, 31].

Важный вклад в опыт разработки региональной ГИС Алтайского края внес относительно недавно созданный геопортал [32]. По поручению главного управления строительства, транспорта, жилищно-коммунального и дорожного хозяйства Алтайского края командной разработчиков «Лаборатория СОТО» была создана ГИС социально-экономической направленности «Геопортал Министерства строительства, транспорта и ЖКХ Алтайского края». По своей структуре геопортал представляет собой веб-сайт с интерактивной картой. В качестве картоосновы выступает карта сервиса Open Street Map, также имеется возможность переключиться на отображение с помощью спутниковых снимков Bing. Масштаб интерактивной карты динамический, и вся необходимая информация подстраивается, исходя из выбранного пользователем масштаба. Наполнение карты представлено списком слоев с возможностью включения необходимых пользователю.

Данный геопортал является хорошим примером реализации предоставления качественной геоинформационной базы, как для работников Министерства ЖКХ, так и для обычных пользователей [32]. Однако геопортал по неизвестным причинам уже достаточно долгое время не функционирует, что лишает заинтересованных пользователей получения необходимой информации.

3. Подходы к проектированию Региональной ГИС Алтайского края. Исходя из принятых подходов к созданию РГИС Алтайского края, рассмотрим каждый из предложенных концептов наиболее подробно.

Аграрная региональная ГИС. Поскольку Алтайский край обладает значительно развитым аграрным комплексом, создание ГИС на аграрную и сельскохозяйственную тематику является одной из ведущих перспектив геоинформационного развития региона. В связи с комплексной направленностью сельского хозяйства наилучшим вариантом представления пространственной информации является электронный ГИС-атлас или электронная карта. Концепт регионального ГИС-атласа Алтайского края включает базовые и тематические слои, а также возможности их комбинирования. Тематика слоев представляется на основе доступной пространственной информации в аграрной сфере, а именно: почвенно-земельные ресурсы; плодородие почв, эрозия и риски истощения; площадь сельскохозяйственных угодий; расположение и площадь аграрных хозяйств; расположение учреждений ветеринарии и др.

Представление слоев и карт разрабатывается в удобных для региона масштабах, а именно 1:500 000 – 1:50 000. Также предлагается возможность свободного масштабирования для комфортного пользования ГИС-атласом.

В качестве слоя-подложки можно использовать как векторную основу, так и растровую, представленную в виде космических снимков территории.

Природно-ресурсная региональная ГИС. Данный концепт представляет полноценно функционирующую ГИС, в основе которой лежат данные о природных объектах и ресурсах Алтайского края. Основные информационные разделы базы данных предлагаются в виде следующих слоев: водные ресурсы; почвенные ресурсы; растительные ресурсы с дополнительным подразделом лесных ресурсов; минеральные ресурсы и полезные ископаемые; особо охраняемые природные территории; рекреационные ресурсы и уникальные природные достопримечательности.

Тематические слои согласуются с масштабами и возможностями ГИС аграрного концепта.

Экологическая региональная ГИС. Решение проблем экологии в Алтайском крае является не менее важной задачей, чем развитие аграрного комплекса. Своевременно указанные экологические проблемы и очаги критических состояний природы определяют фундамент для их последующего решения. Наиболее удобной для восприятия пространственной информации является электронная карта на основе ГИС.

Концепт экологической электронной ГИС-карты Алтайского края представляет собой набор тематических слоев, представленных в наиболее удобном для региона масштабе. Каждый слой освещает одну из актуальных проблем экологии в крае. Это могут быть следующие слои: загрязнение водных ресурсов и почв; зоны критического загрязнения атмосферы; расположение свалок и их ликвидация; экологическое районирование края и др. Актуализация данных позволит отследить пути решение прошлых проблем экологии, а также задать направления для решения новых.

Данный концепт электронной ГИС-карты является одним из важнейших направлений развития геоинформационных систем в Алтайском крае, наряду с аграрным ГИС-атласом. Предложенный вариант интегрированной концептуальной модели структуры РГИС Алтайского края представлен в виде схемы (рис.1).

Интегрированная модель РГИС Алтайского края включает основные поставленные задачи, первоочередные реализуемые концепты и перспективные направления развития.

Региональный геопортал. Наиболее трудоемким и объемным концептом выступает региональный геопортал Алтайского края. Геопортал подразумевает объединение в одну систему всех описываемых выше тематических концептов. Аграрная, природно-ресурсная и экологическая составляющие представляются на геопортале в виде трех тематических блоков, каждый из которых включает в себя не менее пяти содержательных карт и слоев в различных масштабах, удобных для отображения региона. Также на геопортале имеется возможность расширенного поиска пространственной информации, быстрого переключения между слоями и картами с возможностью их комбинирования. Подложка используется гибридная с возможностью выбора из всех доступных. Базы пространственных данных постоянно обновляются в соответствии с актуализацией информации в сфере экологии и экономики. Доступ к геопорталу свободный, предоставлена возможность просмотра легенды, использования виртуальной линейки, сохранения и печати карт.

Из представленных концептов наиболее перспективным на данный момент является агарный ГИС-атлас Алтайского края. В связи с развитием сельского хозяйства наличие региональной ГИС позволит краю выйти на новый уровень геоцифрового обеспечения и экономического развития.

Заключение. Создание региональных геоинформационных систем в настоящее время является одним из перспективных направлений в сфере геоинформатики, востребованных с позиции геоцифровизации экономики и решения вопросов экологической безопасности. РГИС способна дать комплексную оценку всех особенностей региона, показать перспективы развития. Созданные в виде геопорталов или электронных атласов (электронных карт) региональные ГИС направлены на раскрытие потенциала имеющихся информационных пространственных данных, что основано на их структуризации и представлении в удобном для пользователя виде. Тематический контент РГИС отражает потенциальную направленность развития региона, такую, как аграрный комплекс, туристско-рекреационная сфера или эколого-экономико-социальный императив.

Выполнен анализ наличия и функционирования региональных ГИС субъектов Российской Федерации. Дано представление о структуре и составе региональных ГИС субъектов РФ, в частности, указаны такие особенности, как вид и тематика ГИС, используемая модель данных, заказчик и разработчик ГИС.

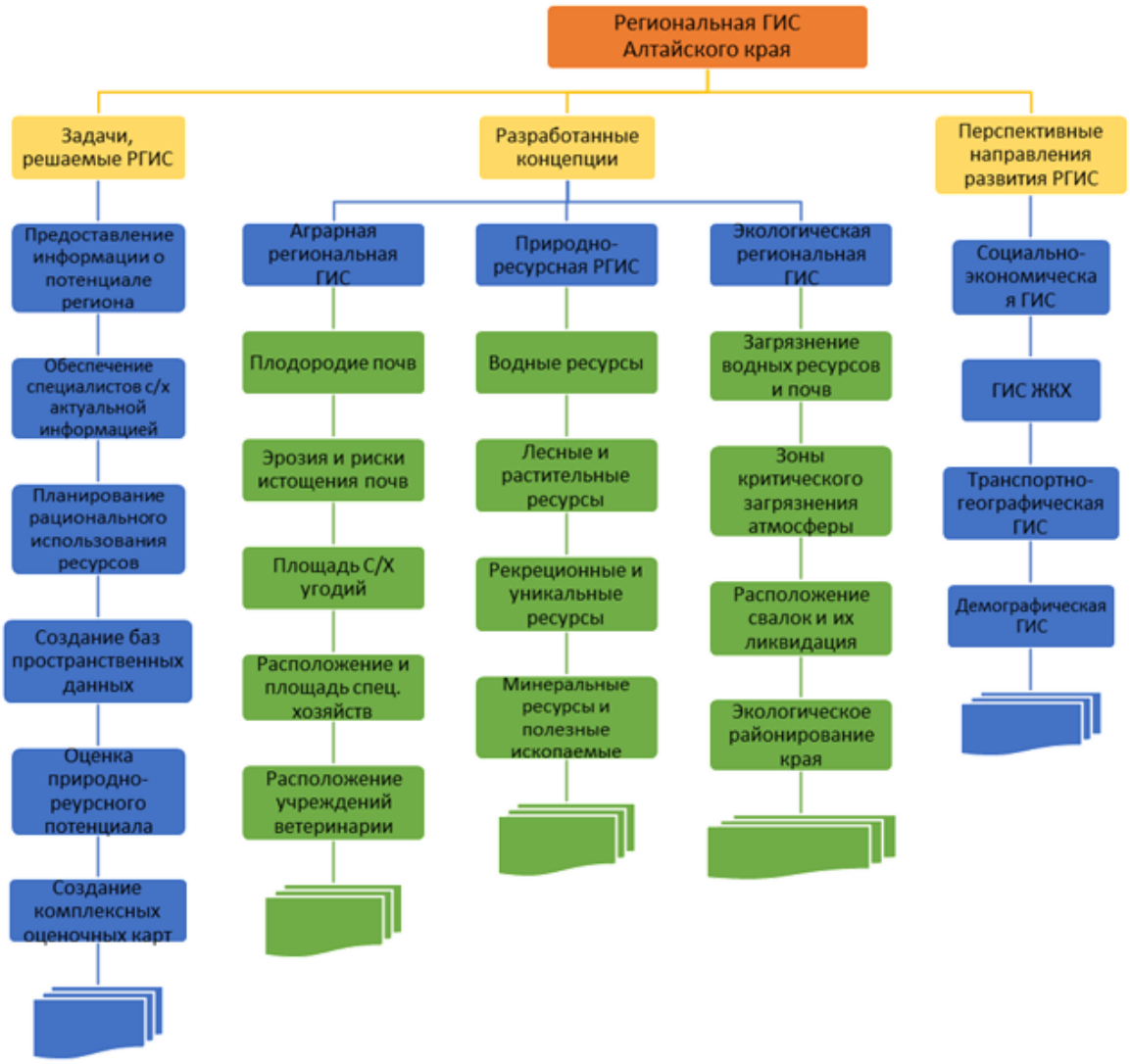


Рис. 1. Интегрированная концептуальная модель структуры РГИС Алтайского края

Дальнейшие работы включают создание физического прототипа РГИС Алтайского края, как для территории края в целом, так и для модельных административных районов. Для разработки геоинформационной базы данных модельными районами планируются Алтайский, Смоленский и Советский. Для них разрабатывается первичная база физико-географических данных в виде ГИС, включающей комплексные физико-географические слои цифровых моделей рельефа, водосборных бассейнов и ландшафтов, а также почвенно-земельных ресурсов.

Благодарности. Работы выполнены в рамках гранта РНФ № 22-27-20135 и Стратегического проекта «АгроБиоТех» программы «Приоритет – 2030» в Алтайском госуниверситете.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52155-2003. Национальный стандарт Российской Федерации. Географические информационные системы федеральные, региональные, муниципальные. Общие технические требования: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 09.12.2003 N 359-ст). – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200034761 (дата обращения 20.02.2022).
2. Ворошин С.В. Региональные геоинформационные системы для геологических исследований: опыт создания и анализа / С.В. Ворошин, А.С. Зинкевич, Е.Э. Тюкова // Тихоокеанская геология, 2006. – т. 25. – № 5. – С. 22-38.
3. Кошкарев А.В. Инфраструктуры пространственных данных / А.В. Кошкарев // ГИС-Обозрение, 2000. – № 3-4. – С. 5-10.

4. Кошкарев А.В. Инфраструктуры пространственных данных / А.В. Кошкарев // ГИС-Обозрение, 2001. – № 1. – С. 28-32.
5. Кошкарев А.В. Проблемы российских региональных ИПД / А.В. Кошкарев, И.Н. Ротанова // Материалы V Всерос. научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России» (Воронеж, 19-22 сентября 2013 г.).– Воронеж: Цифровая полиграфия, 2013. – С. 77-90.
6. Кошкарев А.В. Инфраструктуры пространственных данных и ближайшие задачи картографии / А.В. Кошкарев // II Всероссийская научная конференция по картографии, посвященная памяти А.А. Лютого «Картография XXI века: теория, методы, практика»: Сб. докладов. – М.: Ин-т географии РАН, 2001. – 137-144.
7. Кошкарев А.В. Директива INSPIRE и национальные инициативы по ее осуществлению. – URL: http://www.gisa.ru/54638.html (дата обращения 15.04.2022).
8. Приказ Росреестра от 27 августа 2010 г. № 462 «Об организации работы по разработке и реализации мероприятий по созданию региональной модели ИПД». – URL: http://www.gisa.ru/66952.html; http://www.rosreestr.ru/document/legislation/1146422 (дата обращения 15.04.2022).
9. Геопортал ИПД РФ. – URL: http://gis-services.ru / (дата обращения 10.10.2021).
10. Эйсельт Б. INSPIRE. Первые результаты. – URL: http://www.gisa.ru/78871 (дата обращения 12.10.2021).
11. Кошкарев А.В. Нормативная база и стандарты Европейской программы INSPIRE как основа ИПД Российской Федерации / А.В. Кошкарев // 1-я Всероссийская конференция с международным участием «Геоинформационные системы в здравоохранении Российской Федерации: данные, аналитика, решения»: материалы. – СПб., 2013. – С. 123-130.
12. Концепция государственной информационной системы органов исполнительной власти Воронежской области (ГИС-ОИВ). – URL: https://base.garant.ru/18110393/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/ (дата обращения 20.04.2022).
13. Нольфина МА. Основные принципы проектирования регионального ГИС-атласа / М.А. Нольфина // Интерэкспо Гео-Сибирь: материалы. – Новосибирск: СГГА, 2013. – т. 1. – ч. 2. – С. 170-173.
14. Светличная Д.А. Концепция региональной геоинформационной системы оценки и управления природно-ресурсным потенциалом региона / Д.А. Светличная // Региональная экономика, 2012. – № 11. – С. 111-115.
15. ГИС Гео. – URL: http://gisgeo.org (дата обращения 10.04.2022).
16. Кошкарев А.В. Инфраструктура пространственных данных: современное состояние и проблемы. Российский и зарубежный опыт / А.В. Кошкарев // Охрана окружающей среды и природопользование, 2011. – № 3. – С. 37-47.
17. Енисей-ГИС. Государственная геоинформационная система Красноярского края. – URL: https://24bpd.ru/content/ (дата обращения 10.05.2022).
18. ГИС Ростовской области. – URL: https://gisro.donland.ru (дата обращения 25.05.2022).
19. Геопортал Тюменской области. Правительство Тюменской области. – URL: https://gis.72to.ru (дата обращения 15.05.2022).
20. Геопортал Самарской области. – URL: http://geosamara.ru (дата обращения 15.05.2022).
21. Геопортал Уральского федерального округа. – URL: http://www.geourfo.ru (дата обращения 15.05.2022).
22. Геопортал Чувашии. – URL: http://sdi.cap.ru/geoportal/ (дата обращения 15.05.2022).
23. Геопортал Республики Коми. – URL: http://gis.rkomi.ru/ (дата обращения 15.05.2022).
24. Геопортал Воронежской области. – URL: http://map.govvrn.ru (дата обращения 15.05.2022).
25. Геоинформационный портал Ульяновской области. – URL: http://gis.ulgov.ru/ (дата обращения 15.05.2022).
26. Геопортал Белгородской области. – URL: http://www.map31.ru/ (дата обращения 15.05.2022).
27. Геопортал Кировской области. – URL: http://geoportal43.ru/ (дата обращения 15.05.2022).
28. Геопортал Приморского края. – URL: http://www.primoragp.ru/geoportal (дата обращения 15.05.2022).
29. Винокуров Ю.И. О разработке экологической ГИС «Природные ресурсы Алтайского края» / Ю.И. Винокуров, С.Л. Широкова, О.В. Ловцкая, К.В. Воробьев, С.Г. Яковченко // Вычислительные технологии, 1998. – № 3(5). – С. 23-27.
30. Ротанова И.Н. Эколого-ландшафтная ГИС Алтайского края / И.Н. Ротанова, В.В. Гайда // XIV Международная научно-практическая конференция «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (7–8 февраля 2019 г.): материалы. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет. – Книга 2. – С. 396-398.

31. Ротанова И.Н. Аграрному региону необходим региональный эколого-аграрный атлас с веб-ГИС / И.Н. Ротанова, В.В. Гайда. Л.Е. Долгачева // XIII Международная научно-практическая конференция «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (15–16 февраля 2018 г.): материалы. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2018. – Книга 2. – С. 95-96.
32. Геопортал Министерства строительства, транспорта и ЖКХ Алтайского края. – URL: http://reg22.soto.ru (дата обращения 20.10.2021).

Ротанова Ирина Николаевна. *Кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры физической географии и ГИС Института географии Алтайского государственного университета, инженер-картограф, Новосибирский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (НИИГАиК, ныне СГУГиТ, магистр географии, Алтайский государственный университет, AuthorID: 63920, ResearchID: G-4677-2014, SPIN: 9670-7890, ORCID: 0000-0001-5205-5095, rotanova@mail.asu.ru.*

Юнаков Владимир Сергеевич. *Географ, Алтайский государственный университет, магистрант, Институт географии Алтайского государственного университета, ResearchID: GNP-8693-2022, ORCID: 0000-0002-5516-7997, res.x.s@yandex.ru.*

UDC 528:004.78
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.012

Approaches to the creation of a Regional GIS of the Altai Krai

Irina N. Rotanova, Vladimir S. Yunakov
Altai State University,
Russia, Barnaul, *rotanova@mail.asu.ru*

Abstract. The presented research is devoted to the consideration of the creation of a Regional Geoinformation System (RGIS) in the Altai Krai, which meets the requirements of the digitalization policy of the Russian Federation. The creation of the RGIS of the Altai Krai is an actual and promising practice-oriented direction that meets the task of geocyphrovization and geoinformation support of the subjects of the Russian Federation. The purpose of the study is to substantiate approaches and develop conceptual provisions for the creation of a GIS of the Altai Krai, which is based on the analysis of existing experience in the development of regional GIS in other subjects of the Russian Federation, as well as on the creation of a primary geoinformation database for the region within the framework of special local content: natural resource, agricultural, environmental. The main research method is geoinformation and cartographic. The main results are the development of a conceptual model of the RGIS, its structure and the structure of the database. Priority directions of the RGIS prototype have been identified, both for the territory of the region as a whole and for model administrative districts: agrarian, natural resource, environmental. The format of the GIS of the Altai Krai in the form of a GIS atlas and a geoportal is proposed, taking into account the GIS of transport and housing and communal services already developed and partially implemented for the territory of the region. The issues of the relationship of the RGIS with the spatial data infrastructure (SDI) and the geoportal are considered. An idea of the structure and composition of the regional GIS of the subjects of the Russian Federation is given, in particular, such characteristics as: the type and subject of GIS, the data model used, the customer and the GIS developer are indicated. The scientific novelty of the study lies in the originality of approaches to the creation of the RGIS of the Altai Krai, taking into account the experience of the implementation of the RGIS in other subjects of the Russian Federation.

Keywords: digitalization, geoinformatics, geoinformation system, geoportal, spatial data infrastructure
Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the RNF grant No. 22-27-20135 and the Strategic Project "AgroBioTech" of the Priority 2030 program at Altai State University.

References

1. GOST R 52155-2003. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Geograficheskie informacionnye sistemy federal'nye, regional'nye, municipal'nye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [State Standard 52155-2003. Geographical information systems federal, regional, municipal. General technical requirements]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/1200034761 (accessed 20 February 2022).
2. Voroshin S. V., Zinkevich A. S., Tyukova E.E. Regional'nye geoinformacionnye sistemy dlya geologicheskih issledovanij: opyt sozdaniya i analiza [Regional geoinformation systems for geological research: the experience of creation and analysis]. Tikhookeanskaya geologiya [Pacific Geology], 2006, vol. 25, no. 5, pp. 22-38.

3. Koshkarev A. V. Infrastruktury prostranstvennyh dannyh [Spatial data infrastructures]. GIS-Obozreniye [GIS-Review], 2000, no 3-4, pp. 5-10.
4. Koshkarev A.V. Infrastruktury prostranstvennyh dannyh [Spatial data infrastructures]. GIS-Obozreniye [GIS-Review], 2001, no 1, pp. 28-32.
5. Koshkarev A.V., Rotanova I.N. Problemy rossijskih regional'nyh IPD [Problems of Russian regional SDI]. Materialy V Vseros. nauchno-prakticheskaya konferenciya «Geoinformacionnoe kartografirovanie v regionah Rossii» (Voronezh, 19-22 sentyabrya 2013 g.) [V All-Russian Scientific and practical conference "Geoinformation mapping in the regions of Russia" (Voronezh, September 19-22, 2013)]. Voronezh, Tsifrovaya poligrafiya [Cifrovaya poligrafiya], 2013, pp. 77-90.
6. Koshkarev A.V. Infrastruktury prostranstvennyh dannyh i blizhajshie zadachi kartografii [Spatial data infrastructures and the immediate tasks of cartography]. Doklady II Vserossijskaya nauchnaya konferenciya po kartografii, posvyashchennaya pamyati A.A. Lyutogo «Kartografiya XXI veka: teoriya, metody, praktika» [II All–Russian Scientific Conference on Cartography dedicated to the memory of A.A. Lyutoy «Cartography of the XXI century: theory, methods, practice»]. Moscow. In-t geografii RAN, 2001, pp. 137-144.
7. Koshkarev A.V. Direktiva INSPIRE i nacional'nye iniciativy po ee osushchestvleniyu [The INSPIRE Directive and national initiatives for its implementation]. Available at: http://www.gisa.ru/54638.html (accessed 15 April 2022).
8. Prikaz Rosreestra ot 27 avgusta 2010 g. no. 462 «Ob organizacii raboty po razrabotke i realizacii meropriyatij po sozdaniyu regional'noj modeli IPD» [Rosreestr Order no. 462 dated August 27, 2010 «On the organization of work on the development and implementation of measures to create a regional model of the SDI»]. Available at: http://www.gisa.ru/66952.html; http://www.rosreestr.ru/document/legislation/1146422 (accessed 15 April 2022).
9. Geoportal IPD RF [Geoportal of the IPD of the Russian Federation]. Available at: http://gis-services.ru / (accessed 10 October 2021).
10. Ejsel't B. INSPIRE. Pervye rezul'taty [The first results]. Available at: http://www.gisa.ru/78871 (accessed 12 October 2021).
11. Koshkarev A.V. Normativnaya baza i standarty Evropejskoj programmy INSPIRE kak osnova IPD Rossijskoj Federacii [Regulatory framework and standards of the European INSPIRE Program as the basis of the IPD of the Russian Federation]. Materialy 1-ya Vserossijskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem «Geoinformacionnye sistemy v zdravoohranenii Rossijskoj Federacii: dannye, analitika, resheniya»: materialy [1st All-Russian Conference with international participation «Geoinformation systems in healthcare of the Russian Federation: data, analytics, solutions», Sankt-Peterburg, 2013, pp. 123-130.
12. Koncepciya gosudarstvennoj informacionnoj sistemy organov ispolnitel'noj vlasti Voronezhskoj oblasti (GIS-OIV) [The concept of the state information system of executive authorities of the Voronezh region (GIS-EAV)]. Available at: https://base.garant.ru/18110393/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/ (accessed 20 April 2022).
13. Nol'fina MA. Osnovnye principy proektirovaniya regional'nogo GIS-atlasa [Basic principles of designing a regional GIS atlas]. Interekspo Geo-Sibir'. Novosibirsk. SGGA, 2013, 1, pp. 170-173.
14. Svetlichnaya D.A. Koncepciya regional'noj geoinformacionnoj sistemy ocenki i upravleniya prirodno-resursnym potencialom regiona [The concept of a regional geoinformation system for assessing and managing the natural resource potential of the region]. Regional economy [Regional economy], 2012, no 11, pp. 111-115.
15. GIS Geo [GIS-Geo]. Available at: http://gisgeo.org (accessed 10 April 2022).
16. Koshkarev A.V. Infrastruktura prostranstvennyh dannyh: sovremennoe sostoyanie i problemy. Rossijskij i zarubezhnyj opyt [Spatial data infrastructure: current state and problems. Russian and foreign experience]. Okhrana okruzhayushchey sredy i prirodopol'zovaniye [Environmental protection and nature management], 2011, no 3, pp. 37-47.
17. Enisej-GIS. Gosudarstvennaya geoinformacionnaya sistema Krasnoyarskogo kraya [Yenisei-GIS. The State geoinformation system of the Krasnoyarsk Krai]. Available at: https://24bpd.ru/content/ (accessed 10 May 2022).
18. GIS Rostovskoj oblasti [GIS of the Rostov region]. Available at: https://gisro.donland.ru (accessed 10 May 2022).
19. Geoportal Tyumenskoj oblasti. Pravitel'stvo Tyumenskoj oblasti [Geoportal of the Tyumen region. The Government of the Tyumen region]. Available at: https://gis.72to.ru (accessed 15 May 2022).
20. Geoportal Samarskoj oblasti [Geoportal of the Samara region]. Available at: http://geosamara.ru (accessed 15 May 2022).
21. Geoportal Ural'skogo federal'nogo okruga [Geoportal of the Ural Federal District]. Available at: http://www.geourfo.ru (accessed 15 May 2022).
22. Geoportal CHuvashii [Geoportal of Chuvashia]. Available at: http://sdi.cap.ru/geoportal/ (accessed 15 May 2022).

23. Geoportal Respubliki Komi [Geoportal of the Komi Republic]. Available at: http://gis.rkomi.ru/ (accessed 15 May 2022).
24. Geoportal Voronezhskoj oblasti [Geoportal of the Voronezh region]. Available at: http://map.govvrn.ru (accessed 15 May 2022).
25. Geoinformacionnyj portal Ul'yanovskoj oblasti [Geoinformation portal of the Ulyanovsk region]. Available at: http://gis.ulgov.ru/ (accessed 15 May 2022).
26. Geoportal Belgorodskoj oblasti [Geoportal of the Belgorod region]. Available at: http://www.map31.ru/ (accessed 15 May 2022).
27. Geoportal Kirovskoj oblasti [Geoportal of the Kirov region]. Available at: http://geoportal43.ru/ (accessed 15 May 2022).
28. Geoportal Primorskogo kraya [Primorsky Krai Geoportal]. Available at: http://www.primoragp.ru/geoportal (accessed 15 May 2022).
29. Vinokurov, S.L. SHirokova, O.V. Lovckaya, K.V. et al. O razrabotke ekologicheskoj GIS «Prirodnye resursy Altajskogo kraya» [On the development of ecological GIS «Natural resources of the Altai Territory»]. Vychislitel'nyye tekhnologii [Computing Technologies], 1998, no 3 (5), pp. 23-27.
30. Rotanova I.N., Gajda V.V. Ekologo-landshaftnaya GIS Altajskogo kraya [Ecological and landscape GIS of the Altai Krai]. Materialy XIV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Agrarnaya nauka – sel'skomu hozyajstvu» (7–8 fevralya 2019 g.) [XIV International scientific and practical conference "Agrarian science – agriculture" (February 7-8, 2019)]. Barnaul, ASAU, Book 2, pp. 396-398.
31. Rotanova I.N., Gajda V.V., Dolgacheva L.E. Agrarnomu regionu neobhodim regional'nyj ekologo-agrarnyj atlas s veb-GIS [The agrarian region needs a regional ecological and agrarian atlas with web GIS]. Materialy XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Agrarnaya nauka – sel'skomu hozyajstvu» (15–16 fevralya 2018 g.) [XIII International Scientific and Practical Conference "Agrarian science – agriculture" (February 15-16, 2018)]. Barnaul, Altajskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet [Altai State Agrarian University], 2018, Book 2, pp. 95-96.
32. Geoportal Ministerstva stroitel'stva, transporta i ZHKKH Altajskogo kraya [Geoportal of the Ministry of Construction, Transport and Housing of the Altai Krai]. Available at: http://reg22.soto.ru (accessed 20 October 2021).

Irina Nikolaevna Rotanova. *Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physical Geography and GIS, Institute of Geography, Altai State University, Cartographer, Novosibirsk Institute of Geodesy, Aerial Photography and Cartography Engineers (NIIGAiK, now SGUGiT, Master of Geography, Altai State University, AuthorID: 63920, ResearchID: G-4677-2014, SPIN: 9670-7890, ORCID: 0000-0001-5205-5095, rotanova@mail.asu.ru.*

Vladimir Sergeevich Yunakov. *Geographer, Altai State University, MSc Institute of Geography, Altai State University, ResearchID: GNP-8693-2022, ORCID: 0000-0002-5516-7997, res.x.s@yandex.ru.*

Статья поступила в редакцию 28.07.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 07/28/2022; approved after reviewing 11/16/2022; accepted for publication 11/25/2022.

УДК 620.9:519.2; 004.9
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.013

Онтологическая модель данных для оценки повторяемости отказов элементов электрической сети

Бендик Надежда Владимировна, Полковская Марина Николаевна
Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, *starkovan@list.ru*

Аннотация. Статья посвящена разработке онтологической модели данных для оценки повторяемости отказов элементов электрической сети. Модель включает в себя иерархически упорядоченные классы, которые подробно характеризуют аварийные отключения, а также различные параметры объектов наблюдения: напряжение, дату и время отключения/включения, причины и др.; математические модели для вероятностной оценки и прогнозирования и пр. Полученная онтология позволяет анализировать причины и продолжительность аварийных отключений, потери электроэнергии, выявлять внутрирядные связи, определять регрессионные зависимости и осуществлять прогноз отказов с использованием различных моделей. Созданная онтологическая модель данных ориентирована на сети г. Иркутска, однако она может быть использована и для сетей других населенных пунктов. На основании разработанной онтологической модели построена инфологическая модель, которая реализована в базе данных информационной системы оценки повторяемости отказов элементов электрической сети. С помощью реализованной информационной системы существует возможность осуществлять вероятностную оценку и прогнозирование числа отказов элементов электрических сетей на основании различных моделей.

Ключевые слова: электрическая сеть, онтологическая модель, аварийное отключение, класс

Цитирование: Бендик Н.В. Онтологическая модель данных для оценки повторяемости отказов элементов электрической сети / Н.В. Бендик, М.Н. Полковская // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 170-180. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.013.

Введение. Основной задачей функционирования энергетических компаний является бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией. В связи с этим уменьшение числа отказов элементов электрической сети – актуальная проблема, требующая своевременного решения. Для прогнозирования аварийных отключений часто используются методы теории вероятностей и математической статистики, а также корреляционно-регрессионного анализа [1-4 и др.].

Для эффективного использования математического аппарата при прогнозировании отказов элементов электрической сети необходимы хорошо формализованные информация и знания. Онтологическое моделирование является одним из способов описания семантических аспектов предметной области и представляет особый интерес в формализации информации и знаний для оценки повторяемости отказов элементов электрической сети [5]. Семантическое описание предметной области является начальным этапом представления знаний, позволяющим выявить основные понятия и их взаимосвязи [5].

Следует отметить, что онтологические модели нашли широкое применение в различных отраслях: промышленности [6], сельском хозяйстве [7-9], образовании [10-12] и энергетике [13]. Вместе с тем работы, связанные с семантическим моделированием энергетического комплекса, не описывают применение математического аппарата для моделирования показателей надежности электрооборудования. Поскольку систематизацию данных по аварийным отключениям для их прогнозирования и предупреждения необходимо осуществлять во всех энергоснабжающих предприятиях независимо от их расположения и размера, построение онтологической модели, реализующей эти возможности, является актуальной задачей [14-16].

В связи с этим целью работы является построение онтологической модели данных для вероятностной оценки и прогнозирования аварийных отключений в электрических сетях.

В соответствии с целью сформулированы следующие задачи: 1) выделить модели для вероятностной оценки и прогнозирования рядов исследуемого показателя; 2) спроектировать онтологическую модель аварийных отключений в электрических сетях; 3) осуществить ретроспективный прогноз аварийных отключений с помощью онтологической модели.

Материалы и методы. В качестве материалов для составления онтологической модели данных применены журналы отключений на подстанциях Южных электрических сетей г. Иркутска. Данные о средних месячных температурах, влияющих на работу электрических сетей в г. Иркутске, взяты в ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды».

На основании исследований, приведенных в работах [2, 17, 18], для моделирования отказов элементов электрических сетей выделены методы теории вероятностей, математической статистики и корреляционно-регрессионного анализа. Для описания модели данных использована онтологическая модель [19, 20].

Основные результаты. Для оценки надежности систем электроснабжения зачастую используются законы распределения вероятностей [1]. В ранее проведенных исследованиях выявлено, что для описания вероятности возникновения отказов наиболее подходящим является трехпараметрическое степенное гамма-распределение [17]. Однако недостатком вероятностных моделей является невозможность прогнозирования исследуемых параметров. Значения показателя можно оценить лишь с некоторой заданной вероятностью.

Наибольший интерес представляют прогностические модели, с помощью которых можно получать прогнозы на краткосрочную перспективу. В работе [2] при оценке наличия тренда за 2008-2017 гг. применена методика выделения выступающих точек. Помимо этого, для прогнозирования значений аварийных отключений по месяцам можно использовать нелинейные (полиномиальный, степенной) и тренд-сезонные модели [2].

Учету воздействия природно-климатических факторов на отказы элементов оборудования в электрических сетях посвящено большое количество исследований [21, 22 и др.]. Применительно к исследуемым сетям рассмотрено влияние средних месячных температур [18].

Следует отметить, что наличие ёмкого математического обеспечения, используемого для моделирования аварийных отключений, требует создания программного обеспечения, упрощающего расчеты, и доступного для пользователей, не владеющих навыками построения приведенных выше моделей. В связи с этим на первом этапе с помощью программного средства Protégé [23] разработана иерархия классов онтологии, которая представлена на рисунке 1.

Проектирование онтологии. Построение онтологической модели для вероятностной оценки и прогнозирования аварийных отключений в электрической сети является актуальной и сложной задачей [24-26]. Сложность поставленной задачи определяется наличием множества межклассовых связей и различными целями конечных пользователей системы.

Приведенные в модели классы, в большинстве своем, имеют множество подклассов. Например, класс «Аварийное отключение» состоит из девяти подклассов (рис. 2).

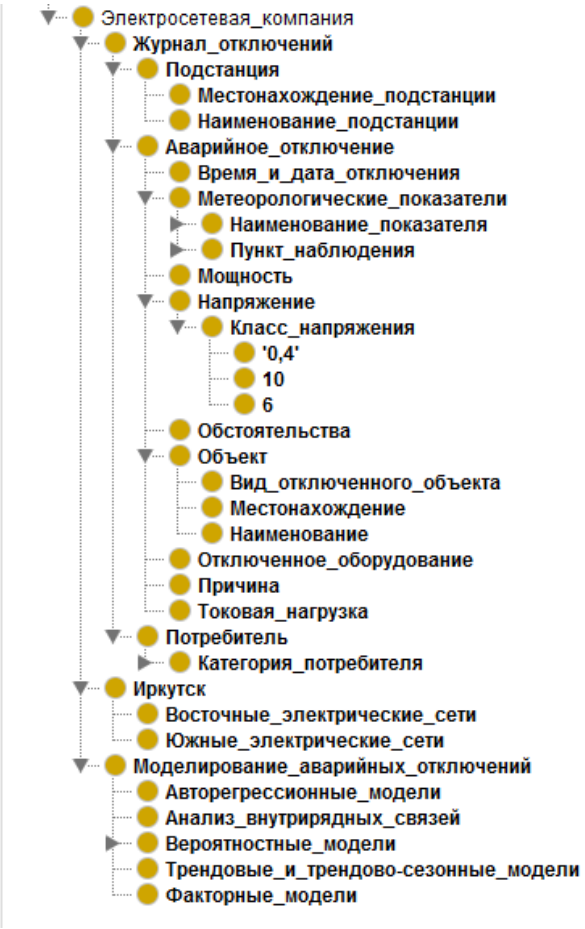


Рис. 1. Иерархия классов моделирования аварийных отключений в электрической сети

Рис. 2. Описание класса «Аварийное отключение»

Класс «Метеорологические показатели» состоит из двух основных подклассов. В свою очередь, подкласс «Наименование показателя» содержит характеристики климатических параметров (рис. 3).

Рис. 3. Описание класса «Метеорологические показатели»

Класс «Моделирование аварийных отключений» включает в себя различные модели для оценки и прогнозирования исследуемого параметра (рис. 4).

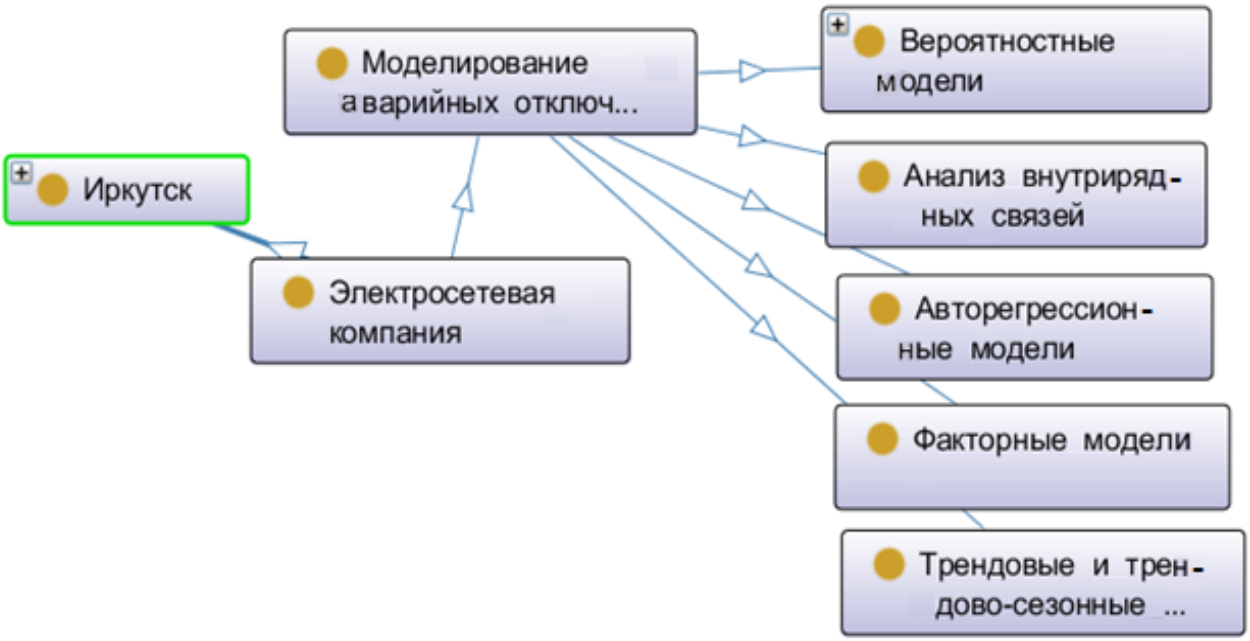


Рис. 4. Описание класса «Моделирование аварийных отключений»

Созданная семантическая сеть представляет собой ориентированный граф, вершинами (узлами) которого являются классы, а дугами – направленные отношения, соединяющие эти узлы (рис. 5). Несмотря на то, что созданная онтологическая модель ориентирована на сети г. Иркутска, она может быть использована и для других сетей. Модель включает в себя аварийные отключения, а также различные характеристики объектов наблюдения: напряжение, дату и время отключения/включения, причины и др.; математические модели для вероятностной оценки и прогнозирования и пр.

На основе онтологической модели создана инфологическая модель данных предметной области, которая содержит 9 сущностей: Журнал отключений, Категория потребителя, Класс напряжения, Наименования объекта, Вид отключения, Отключенный объект, Метеорологические показатели, Значение метеопоказателя, Пункт наблюдения. Инфологическая модель данной предметной области преобразована в даталогическую модель и сгенерирована в СУБД PostgreSQL. Реализованная база данных является основой информационной системы оценки повторяемости отказов элементов электрической сети [27]. К основным функциям разработанной информационной системы относятся:

- анализ внутрирядных связей, предназначенный для оценки возможности построения авторегрессионных моделей (если коэффициент автокорреляции превышает значение ±0,70);
- построение законов распределения вероятностей;
- расчет параметров трендовых, тренд-сезонных и факторных моделей;
- оценка качества моделей с помощью критериев точности и адекватности (критериев согласия);
- вероятностная оценка и прогнозирование числа отказов элементов электрических сетей.

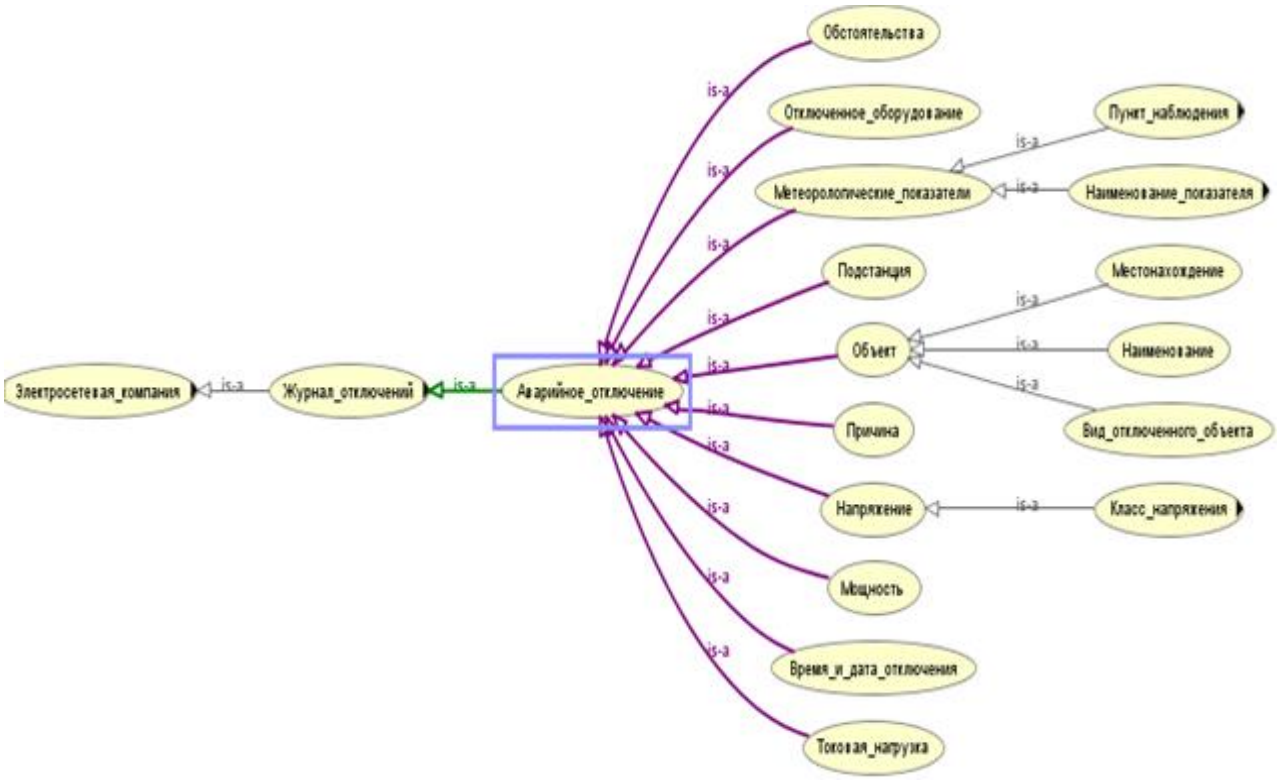


Рис. 5. Онтология моделирования аварийных отключений в электрической сети

Математическое обеспечение информационной системы. Ранее отмечалось, что для оценки надежности систем электроснабжения зачастую используются законы распределения вероятностей, среди которых выделим нормальное, гамма, Вейбулла, Пирсона III типа, трехпараметрическое степенное и др. [1]. В работе [17] для описания вероятности возникновения аварийных отказов использовано трехпараметрическое степенное гамма-распределение

$$f(x) = \frac{\alpha^{\alpha}}{a^{\alpha/\beta}\Gamma(\alpha)b} e^{-\alpha(x/a)^{1/b}} x^{(\alpha/b)-1}, \tag{1}$$

где α, a и b – параметры, связанные с коэффициентами вариации и асимметрии, $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция.

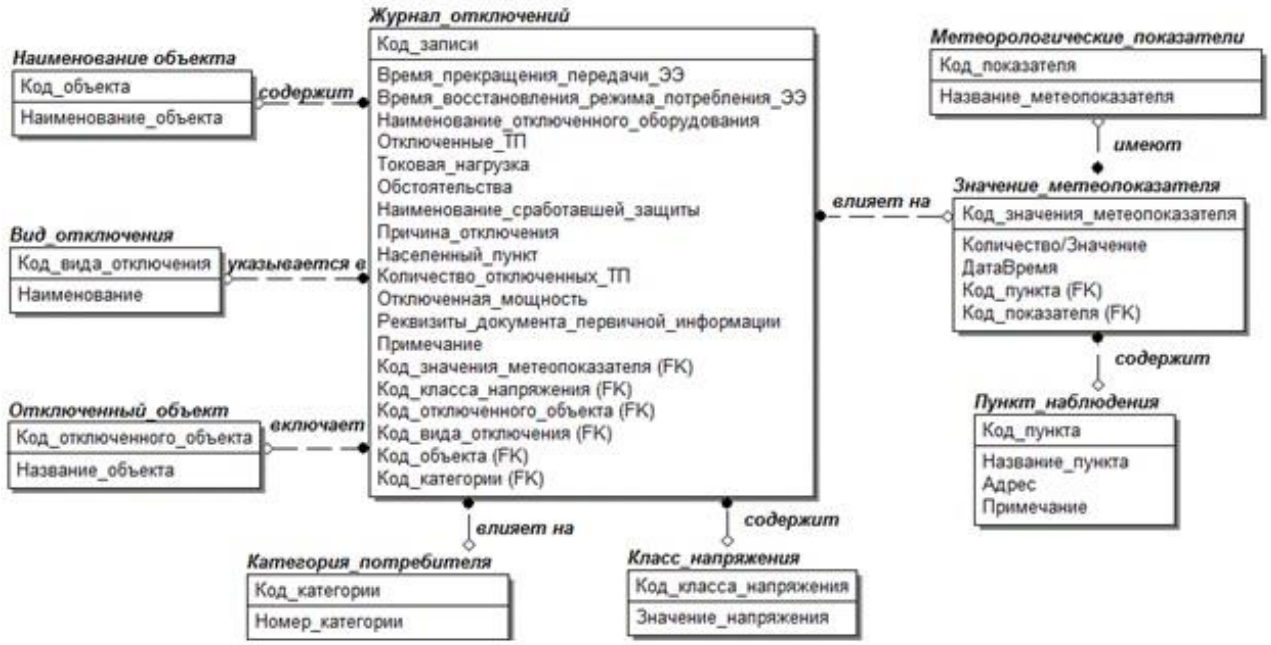


Рис. 6. Инфологическая модель данных

Согласно полученной функции распределения для вероятностей 0,05, 0,5 и 0,95 количество аварийных отключений соответствует значениям $x_{0,05}$=27, $x_{0,5}$=61, $x_{0,95}$=170.

Помимо вероятностных моделей, интерес представляют тренды. При этом зависимости могут быть получены для значений аварийных отключений по месяцам за весь исследуемый период или для каждого месяца. Кроме того, в работе [2] предложено оценивать с помощью тренда динамику выделенной последовательности высокого числа аварий, полученной на основании определения пиков ряда (рис. 7).

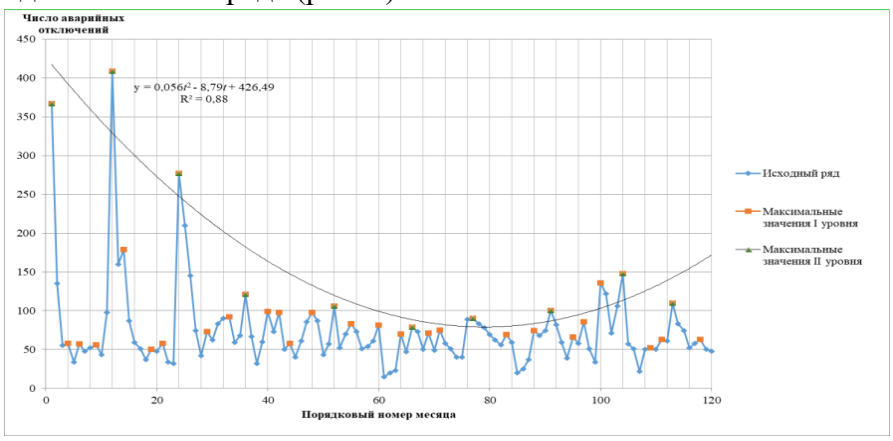


Рис. 7. Выступающие значения аварийных отключений I и II уровня

Следует отметить, что тренды, полученные для значений отказов по некоторым месяцам, имеют линейный и нелинейный (полиномиальный, степенной) вид.

Поскольку на возникновение аварийных отключений влияют неблагоприятные погодные условия, была оценена их сезонная составляющая [2]. Согласно тренду, количество аварийных отключений со временем незначительно уменьшается.

$$y = -0{,}0557\,t + 74{,}327 \qquad (2)$$

Согласно индексам сезонности, наибольший рост аварийных отключений имеет место в апреле и июле (рис. 8). Увеличение числа аварий в апреле, вероятно, вызвано неблагоприятными климатическими условиями (сильный ветер, снег с дождем), а в июле – нагрузкой на сети в связи со значительным повышением температуры воздуха.

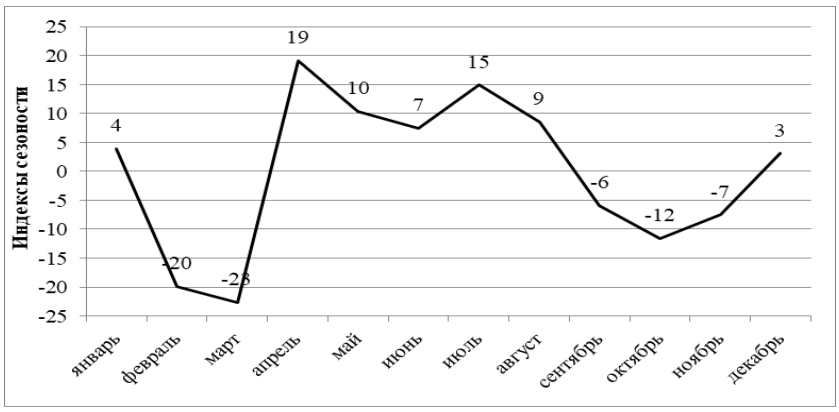


Рис. 8. Индексы сезонности аварийных отключений в Правобережном округе г. Иркутска за 2010-2017 гг.

Помимо сезонности, оценено влияние на аварийные отключения средних месячных значений суточных температур [18]. Поскольку в рядах аварийных отключений в июле и декабре имеет место значимый линейный тренд, в качестве дополнительного параметра в факторную модель включено время. Помимо линейных регрессионных моделей, в работе [18] предложены нелинейные, в которых использован полиномиальный тренд. При этом коэффициент детерминации нелинейных уравнений значительно выше, чем у линейных. Соответственно значение критерия Фишера, оценивающего значимость уравнения, также высокое.

Поскольку для исходных данных получены различные зависимости, удовлетворяющие критериям точности и адекватности, для подбора модели, наиболее точно описывающей фактические значения исследуемого параметра, использован ретроспективный прогноз (табл. 1).

Таблица 1. Результаты ретроспективного прогноза аварийных отключений на электрических сетях за 2017 г. на основе различных моделей

Модель	Месяцы											
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Тренд-сезонная	74	50	47	89	80	77	84	78	63	58	62	72
Полиномиальный тренд	80	65	57	-	122	-	-	-	-	-	-	51
Степенной тренд	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48
Однофакторная	-	-	-	-	-	-	90	-	-	59	-	68
Факторная с учетом времени	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57	50	49
Нелинейная факторная с учетом времени	81	68	59	-	-	-	108	-	-	65	44	61
Фактические значения	52	50	63	61	110	83	74	52	58	63	50	48

Исходя из полученных данных, прогнозные значения аварийных отключений в январе, августе и сентябре значительно отличаются от фактических данных. В этом случае может быть использована вероятностная оценка при условии случайности рядов отказов в эти месяцы. Наиболее точный прогноз числа отказов на электрических сетях в феврале, апреле, мае, июне и июле согласно ретроспективному прогнозу, дает тренд-сезонная модель. Значения, рассчитанные по линейному тренду, наиболее близки к фактическим в декабре, по фак-

торной модели с учетом времени – в октябре, а по нелинейному регрессионному уравнению – в марте и ноябре. Отметим, что для прогнозирования аварийных отключений нельзя использовать определенный вид модели, поскольку исследуемый показатель подвержен воздействию многих факторов.

Заключение. На основе исследований, касающихся моделирования аварийных отключений, построена онтологическая модель данных для оценки повторяемости отказов элементов электрической сети применительно к электрическим сетям г. Иркутска. Разработанная онтологическая модель реализована в информационной системе и может быть использована для вероятностной оценки и краткосрочного прогноза исследуемого параметра с учетом наличия автокорреляции, зависимости исследуемого параметра от времени, сезонности и метеорологических факторов. Несмотря на то, что онтологическая модель ориентирована на сети г. Иркутска, она может быть использована и для других сетей.

Список источников

1. Волков Н.Г. Надежность электроснабжения: учебное пособие / Н.Г. Волков, А.А. Сивков, А.С. Сайгаш // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 160 с.
2. Иваньо Я.М. Моделирование отказов элементов городской электрической сети (10 кВ) на примере правобережного округа города Иркутска / Я.М. Иваньо, И.В. Наумов, М.Н. Полковская // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2021. – № 9(203). – С. 87-98.
3. Карамов Д.Н. Математическое моделирование отказов элементов электрической сети (10 кВ) автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией / Д.Н. Карамов, И.В. Наумов, С.М. Пержабинский. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – вып. 329. – № 7. – С. 116-130.
4. Xie K. Reliability forecasting models for electrical distribution systems considering component failures and planned outages. International journal of electrical power & energy systems, 2016, v. 79, pp. 228-234.
5. Shunkevich D. Ontology-based design of knowledge processing machines. Open semantic technologies for intelligent systems, 2017, vol. 1, pp. 73-94.
6. Kizim A., Matokhina A., Nesterov B. Development of ontological knowledge representation model of industrial equipment. Communications in Computer and Information Science, 2015, v. 535, pp. 354-366.
7. Бендик Н.В. База знаний интеллектуальной системы поддержки производства продукции растениеводства / Н.В. Бендик, О.В. Борхошкин // Теория и практика современной аграрной науки: сб. III нац. (всерос.) науч. конф. с междунар. участием. – Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета «Золотой колос», 2020. – Т. 1. – С. 26-29.
8. Bova V.V., Kureichik V.V., Scheglov S.N., Kureichik L.V. Multi-level ontological model of big data processing. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019, vol. 874, pp. 171-181.
9. Musina D.R., Yangirov A.V., Kharitonov S.V. Ontological model of agro-industrial complex of the region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, “International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022 - Chapter 2”, 2022, pp. 032004.
10. Конев К.А. Принятие решений на основе онтологической модели учебной дисциплины / К.А. Конев // Информатизация образования и науки, 2020. – № 4 (48). – С. 124-134.
11. Федоров О.Д. Онтологическая модель наставничества молодых учителей / О.Д. Федоров, Н.Р. Ящук // Ярославский педагогический вестник, 2021. – № 5 (122). – С. 38-49.
12. Черных С.И. Интеллектуальный капитал регионального вуза: опыт построения онтологической модели / С.И. Черных, К.Ю. Казанцев // Философия образования, 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 5-17.
13. Petrochenkov A.B., Bochkarev S.V., Ovsyannikov M.V., Bukhanov S.A. Construction of an ontological model of the life cycle of electrotechnical equipment. Russian Electrical Engineering, 2015, v. 86, no. 6, pp. 320-325.
14. Ворожцова Т.Н. Онтологический подход к проектированию базы данных для оценки влияния энергетики на окружающую среду / Т.Н. Ворожцова, Н.Н. Макагонова, Л.В. Массель // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – № 3 (15). – С. 31-41.
15. Ворожцова Т.Н. Семантическое моделирование в исследованиях устойчивости энергетических и социоэкологических систем / Т.Н. Ворожцова, Д.В. Пестерев, В.Р. Кузьмин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 4(24). – С. 31-43. – DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.003.
16. Massel L., Massel A. Ontologies as a basis for constructing digital twins in energy. 2021 International symposium on knowledge, ontology, and theory, KNOTH 2021, pp. 1-5.

17. Ланин А.В. Статистический анализ аварийных отключений в электрических сетях 10 кВ / А.В. Ланин, М.Н. Полковская, А.А. Якупов // Актуальные вопросы аграрной науки: электрон. науч.-практ. журн., 2019. – Вып. 30. – С. 5-12.
18. Polkovkaya M. Modelling of failures of electric network elements based on regression models accounting the trend. International Multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon 2020, 9271371.
19. Давыденко И. Т. Средства структуризации семантических моделей баз знаний / И.Т. Давыденко // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2016): материалы VI междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БГУИР, 2016. – С. 93-106.
20. Скворцов Н.А. Концептуальное моделирование предметных областей с интенсивным использованием данных / Н.А. Скворцов, Л.А. Калиниченко, Д.Ю. Ковалев // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных: XVIII межд. конф. DAMDID RCDL'2016. – Москва: Изд-во ФИЦ «Информатика и управление» РАН, 2016. – С. 7-15.
21. Шаулева Н.М. Влияние природно-климатических факторов на эксплуатационную надежность распределительных сетей угольных разрезов. / Н.М. Шаулева, А.Г. Захарова, Д.К. Стариченко // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 1. – С. 114-116.
22. Reed D. Electric utility distribution analysis for extreme winds. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2008, 96, 123-140.
23. Платицын В.А. Практический справочник по построению Онтологий OWL в Protégé 4 URL: http://www.co-ode.org. (дата обращения: 25.02.2022).
24. Голенков В.В. Проект открытой семантической технологии компонентного проектирования интеллектуальных систем. Часть 1 / В.В. Голенков, Н.А. Гулякина // Принципы создания. Онтология проектирования, 2014. – № 1. – С. 42-64.
25. Мокрозуб В.Г. Представление продукционных знаний в реляционных базах данных / В. Г. Мокрозуб // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XV междунар. науч.-метод. конф. – Воронеж: Изд-во Воронежский государственный университет, 2015. – С. 114-117.
26. Осипов Г. С. Методы искусственного интеллекта / Г.С. Осипов // Москва: Физматлит, 2015. – 296 с.
27. Иваньо Я.М. Визуализация результатов моделирования отказов элементов в электрической сети / Я.М. Иваньо, М.Н. Полковская // Электрические станции, 2021. – № 12(1085). – С. 46-52.

Бендик Надежда Владимировна. *Доцент, кандидат технических наук, зав.кафедрой информатики и математического моделирования, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, ORCID: 0000-0002-3097-8953, SPIN: 6088-4232, starkovan@list.ru, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный*.

Полковская Марина Николаевна. *Доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, ORCID: 0000-0002-9646-1818, SPIN: 4833-9212, polk_mn@mail.ru, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный.*

UDC 620.9:519.2; 004.9
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.013

Ontological data model for assessing the repeatability of failures of electrical network elements

Nadezhda V. Bendik, Marina N. Polkovskaya
Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,
Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny, *starkovan@list.ru*

Abstract. The article is devoted to the development of an otological data model for assessing the frequency of failures of electrical network elements. The model includes hierarchically ordered classes that characterize emergency shutdowns in detail, as well as various parameters of monitored objects; log of emergency shutdowns; substations; voltage; mathematical models for probabilistic estimation and forecasting, etc. The resulting ontology makes it possible to analyze the causes and duration of emergency shutdowns, power losses, identify in-row relationships, determine regression dependencies, and predict failures using various models. The created ontological data model is focused on the networks of the city of Irkutsk, but it can also be used for networks of other settlements. Based on the developed ontological model, an infological model was built, which is implemented in the database of the information system for assessing the repeatability of failures of electrical

network elements. With the help of the implemented information system, it is possible to carry out a probabilistic assessment and prediction of the number of failures of electrical network elements using various models.

Keywords: electrical network, ontological model, emergency shutdown, class

References

1. Volkov N.G., Sivkov A.A., Saygash A.S. Nadezhnostʹ elektrosnabzheniya: uchebnoye posobiye [Reliability of power supply]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Publishing house of Tomsk Polytechnic University], 2011, 160 p.
2. Ivanyo Ya.M., Naumov I.V., Polkovskaya M.N. Modelirovaniye otkazov elementov gorodskoy elektricheskoy seti (10 kV) na primere pravoberezhnogo okruga goroda Irkutska [Modeling of failures of elements of the urban electrical network (10 kV) on the example of the right-bank district of the city of Irkutsk]. Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2021, no. 9 (203), pp. 87-98.
3. Karamov D.N., Naumov I.V., Perzhabinskiy S.M. Matematicheskoye modelirovaniye otkazov elementov elektricheskoy seti (10 kV) avtonomnykh energeticheskikh sistem s vozobnovlyayemoy raspredelennoy generatsiyey [Mathematical modeling of failures of electrical network elements (10 kV) of autonomous energy systems with renewable distributed generation]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources], 2018, vol. 329, no. 7, pp. 116-130.
4. Xie K., Zhang H., Singh C. Reliability forecasting models for electrical distribution systems considering component failures and planned outages. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, vol. 79, pp. 228-234.
5. Shunkevich D. Ontology-based design of knowledge processing machines. Open semantic technologies for intelligent systems, 2017, vol. 1, pp. 73-94.
6. Kizim A., Matokhina A., Nesterov B. Development of ontological knowledge representation model of industrial equipment. Communications in Computer and Information Science, 2015, vol. 535, pp. 354-366.
7. Bendik N.V., Borkhoshkin O.V. Baza znaniy intellektualʹnoy sistemy podderzhki proizvodstva produktsii rasteniyevodstva [Knowledge base of the intellectual system to support the production of crop production]. Teoriya i praktika sovremennoy agrarnoy nauki : sb. III nats. (vseros.) nauch. konf. c mezhdunar. uchastiyem. Izdatel'skiy tsentr Novosibirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta «Zolotoy Kolos» [Publishing Center of the Novosibirsk State Agrarian University "Zolotoy Kolos"], 2020, vol. 1, pp. 26-29.
8. Bova V.V., Kureichik V.V., Scheglov S.N., Kureichik L.V. Multi-level ontological model of big data processing. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019, vol. 874, pp. 171-181.
9. Musina D.R., Yangirov A.V., Kharitonov S.V. Ontological model of agro-industrial complex of the region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022 - Chapter 2", 2022, pp. 032004.
10. Konev K.A. Prinyatiye resheniy na osnove ontologicheskoy modeli uchebnoy distsipliny [Decision making based on the ontological model of academic discipline]. Informatizatsiya obrazovaniya i nauki [Informatization of education and science], 2020, vol. 4 (48), pp. 124-134.
11. Fedorov O.D., Yashchuk N.R. Ontologicheskaya modelʹ nastavnichestva molodykh uchiteley [Ontological model of mentoring young teachers]. Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik [Yaroslavl Pedagogical Bulletin], 2021, vol. 5 (122), pp. 38-49.
12. Chernykh S.I., Kazantsev K.Yu. Intellektualʹnyy kapital regionalʹnogo vuza: opyt postroyeniya ontologicheskoy modeli [Intellectual capital of a regional university: experience in building an ontological model]. Filosofiya obrazovaniya [Philosophy of education], 2020, vol. 20, no. 2, pp. 5-17.
13. Petrochenkov A.B., Bochkarev S.V., Ovsyannikov M.V., Bukhanov S.A. Construction of an ontological model of the life cycle of electrotechnical equipment. Russian Electrical Engineering, 2015, v. 86, no. 6, pp. 320-325.
14. Vorozhtsova T.N., Makagonova N.N., Masselʹ L.V. Ontologicheskiy podkhod k proyektirovaniyu bazy dannykh dlya otsenki vliyaniya energetiki na okruzhayushchuyu sredu [Ontological approach to database design for assessing the impact of energy on the environment]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2019, no. 3 (15), pp. 31-41.
15. Vorozhtsova T.N., Pesterev D.V., Kuzʹmin V.R. Semanticheskoye modelirovaniye v issledovaniyakh ustoychivosti energeticheskikh i sotsio-ekologicheskikh sistem [Semantic modeling in studies of the sustainability of energy and socio-ecological systems]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2021, no. 4 (24), pp. 31-43, DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.003.

16. Massel L., Massel A. Ontologies as a basis for constructing digital twins in energy. 2021 International Symposium on Knowledge, Ontology, and Theory, KNOTH 2021, pp. 1-5.
17. Lanin A.V., Polkovskaya M.N., Yakupov A.A. Statisticheskiy analiz avariynykh otklyucheniy v elektricheskikh setyakh 10 kV [Statistical analysis of emergency shutdowns in electrical networks 10 kV]. Aktualʹnyye voprosy agrarnoy nauki: elektron. nauch.-prakt. zhurn. [Topical issues of agricultural science: electron. scientific-practical journal], 2019, vol. 30, pp. 5-12.
18. Polkovkaya M. Modelling of failures of electric network elements based on regression models accounting the trend. International Multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon 2020, 9271371.
19. Davydenko I.T. Sredstva strukturizatsii semanticheskikh modeley baz znaniy [Means of structuring semantic models of knowledge bases]. Otkrytyye semanticheskiye tekhnologii proyektirovaniya intellektualʹnykh sistem (OSTIS-2016): materialy VI mezhd. nauch.-tekhn. konf., Minsk, BGUIR, 2016, pp. 93-106.
20. Skvortsov N.A., Kalinichenko L.A., Kovalev D.Yu. Kontseptualʹnoye modelirovaniye predmetnykh oblastey s intensivnym ispolʹzovaniyem dannykh [Conceptual modeling of subject areas with intensive use of data]. Analitika i upravleniye dannymi v oblastyakh s intensivnym ispolʹzovaniyem dannykh: XVIII mezhd. konf. DAMDID RCDL'2016, Moskva: Izd-vo FITS «Informatika i upravleniye» RAN [Moscow: Publishing House of the Federal Research Center "Informatics and Control" RAS], 2016, pp. 7-15.
21. Shauleva N.M., Zakharova A.G., Starichenko D.K. Vliyaniye prirodno-klimaticheskikh faktorov na ekspluatatsionnuyu nadezhnostʹ raspredelitelʹnykh setey ugolʹnykh razrezov [Influence of natural and climatic factors on the operational reliability of distribution networks of coal mines]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2020, no. 1, pp. 114-116.
22. Reed D. Electric utility distribution analysis for extreme winds. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2008, 96, 123-140.
23. Platitsyn V.A. Prakticheskiy spravochnik po postroyeniyu Ontologiy OWL v Protégé 4. Available at: http://www.co-ode.org. (accessed: 25.02.2022).
24. Golenkov V.V., Gulyakina N.A. Proyekt otkrytoy semanticheskoy tekhnologii komponentnogo proyektirovaniya intellektualʹnykh sistem. [The project of open semantic technology of component design of intelligent systems]. Printsipy sozdaniya. Ontologiya proyektirovaniya [Principles of creation. Design ontology], 2014, no. 1, pp. 42-64.
25. Mokrozub, V. G. Predstavleniye produktsionnykh znaniy v relyatsionnykh bazakh dannykh [Representation of production knowledge in relational databases]. Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii : materialy XV mezhdunar. nauch.-metod. konf., Voronezh: Izd-vo Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet [Voronezh: Voronezh State University Publishing House], 2015, pp. 114-117.
26. Osipov G. S. Metody iskusstvennogo intellekta [Methods of artificial intelligence]. Moscow: Fizmatlit [Moscow: Fizmatlit], 2015, 296 p.
27. Ivanʹo Ya.M., Polkovskaya M.N. Vizualizatsiya rezulʹtatov modelirovaniya otkazov elementov v elektricheskoy seti [Visualization of the results of simulation of failure of elements in the electric network]. Elektricheskiye stantsii [Electric stations]. 2021, no. 12 (1085), pp. 46-52.

Nadezhda Vladimirovna Bendik. *Docent, Ph.D, Head of the department of informatics and mathematical modeling, FSBEI HE Irkutsk SAU, ORCID: 0000-0002-3097-8953, SPIN: 6088-4232, starkovan@list.ru, 664038, Russia, Irkutsk Region, Irkutsk region, Molodezhny.*

Marina Nikolaevna Polkovskaya. *Docent, Ph.D, Docent of the department of informatics and mathematical modeling, FSBEI HE Irkutsk SAU, ORCID: 0000-0002-9646-1818, SPIN: 4833-9212, polk_mn@mail.ru, Russia, Irkutsk Region, Irkutsk region, Molodezhny.*

Статья поступила в редакцию 22.07.2022; одобрена после рецензирования 11.10.2022; принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 07/22/2022; approved after reviewing 10/11/2022; accepted for publication 11/01/2022.

УДК 004.043: 004.91
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.014

Модельно-ориентированный подход к формированию оперативных печатных отчётов

Коробко Анна Владимировна[1], Шефтель Кирилл Сергеевич[2]
[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева,
[2]Институт вычислительного моделирования СО РАН,
Россия, Красноярск, *gglhroom@gmail.com*

Аннотация. Настоящее исследование посвящено разработке методических и алгоритмических средств генерации оперативных печатных отчетных форм на базе модельно-ориентированного подхода. В работе показана актуальность современного подхода к разработке программного обеспечения без программирования и обосновано использование модельно-ориентированной архитектуры в качестве технологической основы «no code» платформ. Приведено описание мета-метамодели «no code» платформы сбора данных, обеспечивающей динамическую интерпретацию метамодели и генерацию форм сбора данных. Предложено развитие существующей мета-метамодели за счет добавления сущностей «шаблон» и «процедура», позволяющее оперативно формировать печатные отчетные формы с динамическим содержимым. Обоснован выбор шаблонизатора Jinja2 для программной реализации модуля генерации отчетов и представлена диаграмма последовательности модуля, показывающая взаимодействие интерфейсной части платформы с шаблонизатором и метаданными.

Ключевые слова: модельно-ориентированная разработка, zero code, платформа сбора данных, генерация печатных отчетов, шаблонизатор, Jinja2

Цитирование: Коробко А.В. Модельно-ориентированный подход к формированию оперативных печатных отчётов / А.В. Коробко, К.С. Шефтель // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 181-189. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.014.

Ведение. В условиях обилия информационных потоков, всевозрастающих вычислительных мощностей и повышения требований к обоснованности принимаемых решений сохраняют свою актуальность печатные отчетные формы, особенно в критически важных областях деятельности человека. Несмотря на повсеместное внедрение оперативных информационных панелей и дашбордов, обновляемых автоматически в момент поступления новых данных, важной частью тактического и стратегического управления являются регламентированные срочные отчетные формы. Печатные отчеты позволяют «фиксировать» состояние отслеживаемой ситуации на момент формирования отчета, предоставлять всем заинтересованным лицам одну и туже информацию, не беспокоясь о возможном изменении информации и манипуляции с данными.

Несмотря на кажущуюся статичность отчетов, чтобы оставаться актуальными, они должны изменяться. На примере оперативной сводки, формируемой Центром обеспечения реализации полномочий в областях гражданской обороны, чрезвычайных ситуаций Красноярского края (Центра ГО и ЧС) видно, что отчет претерпевает постоянные изменения. В зависимости от сезона меняется перечень контролируемых обстановок: подтопления и лесные пожары характерны для весенне-летнего периода, а зимой необходим мониторинг ледовых переправ. С окончанием отчетного года в некоторые разделы отчета добавляются новые столбцы для сопоставления показателей с аналогичными данными в предшествующие отчетные периоды. Ввиду развития средств инструментального контроля добавляются новые разделы, например, «космический мониторинг термоточек». С точки зрения программных средств формирования оперативного отчета все эти изменения требуют непосредственного участия человека в адаптации и настройке новой версии отчета. В таких случаях всегда было только два решения: пользоваться недорогим типовым программным обеспечением и мириться с невозможностью внести изменения, или приобретать многофункциональную дорогую систему и содержать в штате программиста, готового вносить правки, как только потре-

буется. Второй путь приведет нас к желанной цели, но с дополнительными финансовыми и временными издержками. Современное решение создавшейся проблемы – это low code/no code системы (LC/NC) [1], которые позволяют вносить изменения в клиентское приложение (системы) без программирования совсем или с незначительным объемом программного кода. Суть современной концепции «no code» («zero code») заключается в тезисе: «если участие человека необходимо, то пусть это будет аналитик, а не программист».

Технологической основой разработки «без программирования» является модельно-ориентированный подход, который позволяет создавать «zero code» – системы за счет вынесения бизнес-логики из программного кода в метаданные и «вшивания» алгоритмов построения прикладных систем под управлением этих метаданных [2]. Структура метаданных задает потенциальную функциональность системы, а данные, хранящиеся в этой структуре, определяют тематику системы, ее объем и информационное наполнение.

Настоящее исследование посвящено разработке методических и алгоритмических средств поддержки создания и редактирования печатных отчетных форм на базе модельно-ориентированного подхода. В работе показана актуальность современного подхода к разработке программного обеспечения без программирования и обосновано использование модельно-ориентированной архитектуры в качестве технологической основы «no code» платформ. Приведено описание мета-метамодели «no code» платформы сбора данных, обеспечивающей динамическую интерпретацию метамодели и генерацию форм сбора данных. Предложено развитие существующей мета-метамодели за счет добавления сущностей «шаблон» и «процедура», позволяющее оперативно формировать печатные отчетные формы с динамическим содержимым. Обоснован выбор шаблонизатора Jinja2 для программной реализации модуля генерации отчетов и представлена диаграмма последовательности модуля, показывающая взаимодействие интерфейсной части платформы с шаблонизатором и метаданными. Предложенные методические и алгоритмические средства апробированы на данных Агентства по гражданской обороне, чрезвычайным ситуациям и пожарной безопасности Красноярского края в рамках задачи формирования печатной формы оперативной сводки.

1. Модельно-ориентированный подход. В современном мире программисты постоянно работают над повышением уровня абстракции своих программ. Многие поняли, что повышение уровня абстракции предметной области на один порядок дает расширение сферы применения продукта в десятки раз и возможность занять многие смежные ниши, порой увеличивая количество клиентов в сотни и тысячи раз. Модельно-ориентированный подход является результатом развития методик и подходов абстрагирования от предметных областей в сторону концепции функционирования системы. Вместо требования от разработчиков использовать язык программирования для спецификации того, как система должна работать, подход позволяет использовать модели для декларативного описания того, какая функциональность необходима и какой должна быть архитектура системы. Движение в сторону высокоуровневой спецификации содержит потенциал для значительного упрощения разработки программного обеспечения. Такие проблемы, как распределение объектов, поиск методов, перехватывание исключений и пр., более не являются актуальными задачами для большинства разработчиков и решаются автоматически на этапе компиляции/интерпретации программы. Цель модельно-ориентированного подхода в достижении такого уровня абстрагирования, который позволит автоматизировать решение проблем устойчивости, совместимости и развертывания, в данный момент решаемые вручную с привлечением высококвалифицированных специалистов, оставляя лишь задачу наполнения системы. Классическая разработка на основе модельно-ориентированного подхода подразумевала построение метамоделей отдельно от кода и служила скорее ориентиром, чем функциональной частью системы. С развитием новой парадигмы гибкой разработки и концепции снижения требований к квалифи-

кации пользователей возникла идея динамической интерпретации метамоделей и разработки «no-code» платформ, которые позволяют без программирования «собирать» тематические приложения с заданной функциональностью, но с произвольной специализацией и информационным наполнением. Теперь метамодели и модели формируются с помощью визуальных конструкторов на базе платформ и определяют бизнес-логику, функциональность и внешний вид будущего приложения. Гибкость и эффективность «no-code» платформ заключается в алгоритмах генерации схемы базы данных, пользовательского и программного интерфейса, аналитических и печатных отчетных форм. Охрана коммерческой тайны проприетарного программного обеспечения в части разработки механизмов конкретной реализации подхода сохраняет актуальность научных исследований, посвященных решению той же задачи, но с исследовательским подходом.

Технология модельно-ориентированной разработки (Model Driven Development – MDD) основывается на построении абстрактной мета-метамодели, управляющих и прикладных моделей и задании способов их трансформации в поддерживаемые технологии программирования [3, 4, 5]. «Разработка» модельно-ориентированных систем в рамках подхода MDD заключается в построении моделей абстрактного уровня и автоматической генерации моделей прикладного уровня. Проектирование моделей абстрактного уровня включает процесс построения мета-метамодели – модели языка моделирования – и процесс построения метамодели различных специфичных областей приложения. Проектирование прикладных моделей состоит из процесса построения моделей прикладного уровня и этапа формирования экземпляров концептов, определенных на абстрактном уровне. Метамодель в информатике – модель, описывающая другую модель; транзитивное отношение между двумя моделям. Например, если модель M1 описывает язык L0, в котором формулируется модель M0, то M1 является метамоделью M0; если же модель M2 описывает язык L1, в котором была сформулирована модель M1, то M2 – это метамодель M1, а M2 является тогда для M0 мета-метамоделью.

С целью создания «no-code» платформы для создания систем сбора данных на основе модельно-ориентированного подхода была предложена авторская реализация классического процесса MDD [6]. Во-первых, объединены процессы формирования управляющей и прикладной моделей. Объединенный процесс предполагает, что управляющая модель системы формируется пользователем с помощью интерфейса самой системы. При этом автоматически изменяется структура базы данных и сохраняется формальное описание моделей. Во-вторых, добавлен процесс автоматической трансформации прикладных моделей в пользовательский интерфейс модельно-ориентированной системы – динамическая интерпретация метамодели. Благодаря этому интерфейс системы в части ввода данных перестраивается автоматически, в соответствии с изменениями, внесенными пользователем в управляющую модель. В основе авторской реализации, как и в основе классического подхода, лежит концептуальная мета-метамодель, определяющая основные классы сущностей и связи между ними для построения управляющих моделей.

Для решения задачи разработки типовых модельно-ориентированных систем консолидации данных предложена мета-метамодель сбора данных [7], которая является спецификацией для создания управляющих и прикладных моделей проектируемых систем, обеспечивает динамическую интерпретацию метамодели и генерацию форм сбора данных. Мета-метамодель содержит три класса объектов: «Объект», «Атрибут» и «Группа». Объекты класса «Атрибут» описываются свойствами: наименование атрибута, тип атрибута, флаг темпоральности атрибута. В рамках мета-метамодели задан ряд отношений, определяющих связи между экземплярами классов модели.

Применяемый в платформе сбора данных модельно-ориентированный подход можно применить и к генерации отчетов. Если представить информацию о структуре и наполнению

отчетов как метаданные, то программный код, отвечающий за формирование отчетов на основе метамодели, должен включать унифицированный модуль генерации отчета.

2. Проектирование модуля генерации отчётов. Применение модельно-ориентированного подхода при создании модуля подразумевает модификацию мета-метамодели для полноценной интеграции новой функциональности в систему. Модификация заключается во внесении в структуру метаданных сущностей, без которых процесс генерации отчетов будет невозможен. Отчет принято разделять на статическую и динамическую составляющие. Статическая часть – шаблон отчета – определяет индивидуальную структуру отчета в соответствии с назначением документа: заголовок и параметры генерации, блоки, составляющие отчет, и их наполнение. Динамическая часть формируется в момент генерации отчета по заданному шаблону. Предлагается ввести в мета-метамодель такие сущности, как «шаблон» и «процедура», отвечающие за статическую и динамическую составляющие отчета соответственно. Процедуры позволяют перенести сбор и группировку данных из программного кода в базу данных. При необходимости изменить набор данных, добавить новые данные в отчет или удалить их, благодаря процедурам, больше не нужно редактировать программный код, а достаточно указать новую процедуру в шаблоне или её оттуда удалить. Модифицированная мета-метамодель представлена на рисунке 1.

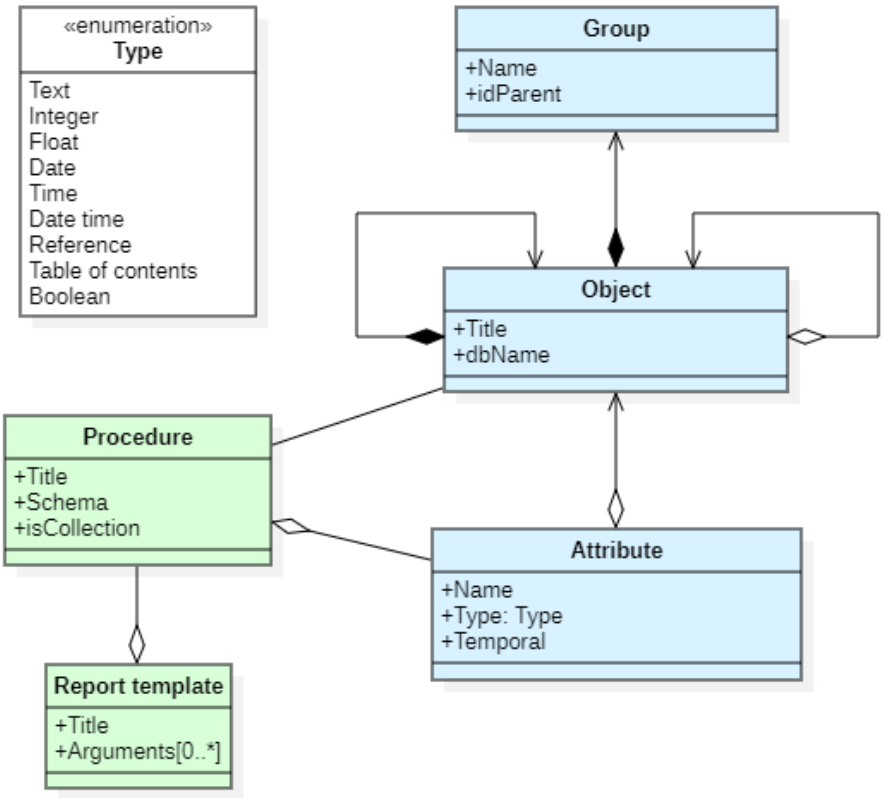


Рис. 1. Модифицированная мета-метамодель модельно-ориентированной платформы

С целью реализации механизма динамической генерации печатных отчетных форм модель дополнена двумя классами: «Procedure» и «Report template». Новые классы описывают организацию доступа к консолидированным данным в виде хранимых процедур и их связь с шаблоном печатной формы, использующим эти данные. Класс «Report template» в настоящей модификации содержит название шаблона, по которому программный модуль

найдет выбранный шаблон на сервере. Класс «Procedure» содержит имя процедуры для получения оперативных данных, схему в базе данных, разграничивающую процедуры из разных разделов системы, и логическое поле «Коллекция». Поле «Коллекция» принимает

значения: «Истина» или «Ложь». Значения определяют, какого рода данные будут получены и как их следует обрабатывать. Значение «Истина» означает, что результатом выполнения хранимой процедуры будет множество записей, которые могут быть представлены в отчете как таблица или могут требовать дополнительной обработки. Значение «Ложь» соответствует ситуации, когда процедура возвращает одну запись или скалярное выражение. Такие данные могут быть представлены в отчете «как есть» или могут использоваться в обработке данных, полученных от процедур со значением параметра «Истина».

3. Программная реализация модуля генерации отчетов. Самый распространённый подход к генерации отчетных документов до недавнего времени заключался в сохранении шаблонов в форматах doc(x) и xls(x) с разметкой, интерпретируемой специализированными программными средствами [8, 9]. Однако, с утратой доверия к форматам корпорации Microsoft актуальной стала задача поиска более демократичного формата для представления шаблонов оперативных печатных форм. В рамках web-приложения таким форматом является HTML (HyperText Markup Language). Мы можем использовать богатые возможности языка гипертекстовой разметки по конструированию визуальных элементов и применять каскадные таблицы стилей (Cascading Style Sheets, CSS) для управления оформлением и даже анимацией страницы. Все эти преимущества могут быть использованы при создании шаблонов и генерации печатных отчетов. С использованием HTML как шаблона и формата представления конечного отчета мы можем как отображать сгенерированный отчет на странице web-приложения, так и экспортировать его в другие форматы, например, PDF или XML.

В разработке пользовательского интерфейса web-приложений задача наполнения шаблона фактическими данными решается с помощью шаблонизатора (Template Engine). Шаблонизатор – программное обеспечение, позволяющее использовать шаблоны для генерации конечных документов с помощью декларативного языка разметки [10]. В реализации шаблонизатора воплощается идея разделения бизнес-логики и представления, формы и содержания при создании документов [11]. Шаблонизаторы призваны обеспечить наполнение повторяющихся элементов web-приложения динамическим контентом на HTML странице, например, для генерации карточек товаров в Интернет-магазине.

Шаблонные движки принимают маркированные строки и выдают на выходе визуализированные строки со значениями вместо маркеров. Они позволяют разработчикам генерировать желаемые типы контента, используя при этом некоторые конструкции программирования, такие как условия и циклы, для управления результатом вывода.

Для программной реализации модуля генерации оперативных печатных отчетов выбран один из наиболее популярных шаблонизаторов на языке Python – Jinja2 [12], который позволяет использовать тэги, фильтры, тесты и глобальные переменные, а также обеспечивает исполнение шаблонов в тестовом режиме в «песочнице», тем самым гарантируя безопасность конечной системы. Jinja2 широко используется вместе с фреймворком Flask и считается хорошим шаблонизатором в случаях, где предполагается постоянная работа над шаблонами, их модификация.

Разработанное дополнение к мета-метамодели может служить концептуальной моделью для описания отчетов системы, которые хранятся в метаданных системы (metadata). Шаблоны (template), хранимые в метаданных, представляют модель отчета, а разрабатываемый модуль генерации осуществляет функции интерпретации шаблона и встроенного динамического описания. На рисунке 2 представлена диаграмма последовательности генерации печатного отчета по шаблону.

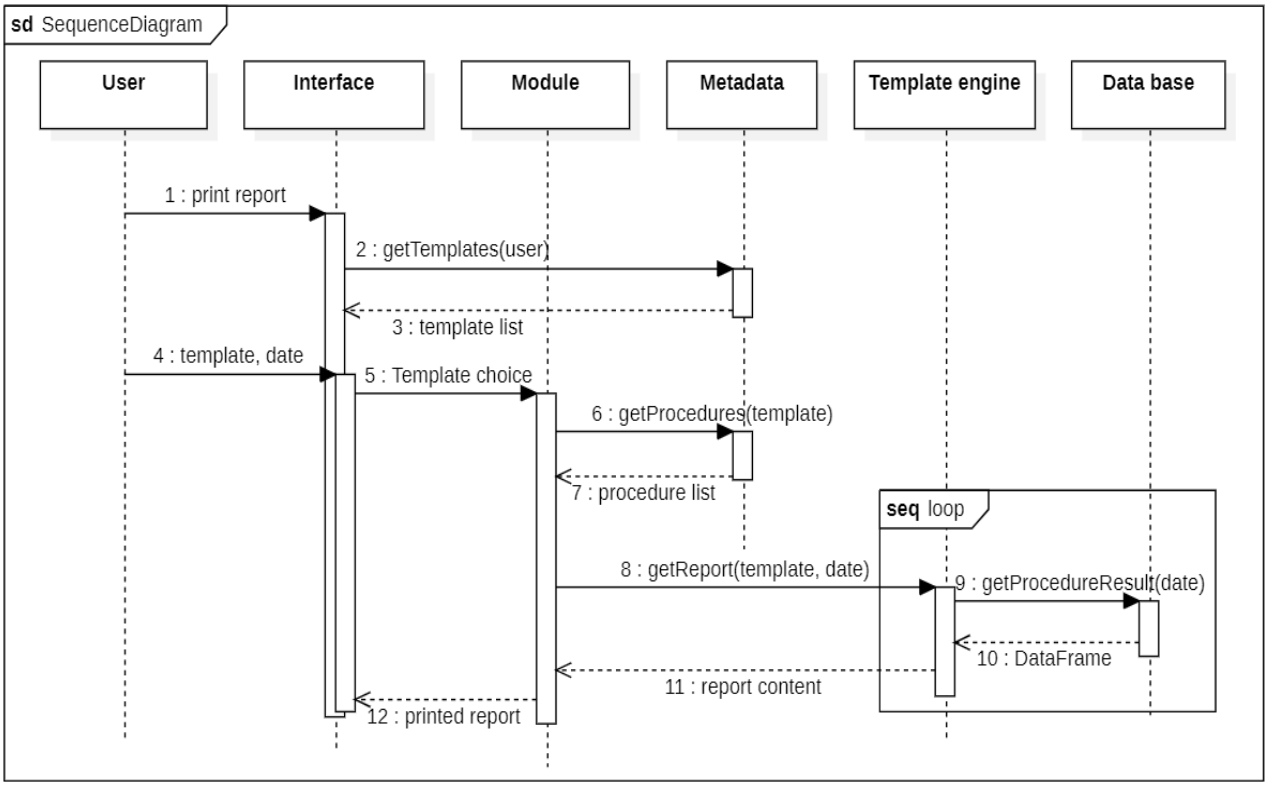


Рис. 2. Диаграмма последовательности генерации оперативного печатного отчета

Диаграмма последовательности фокусируется на временном аспекте взаимодействия и имеет два измерения. Первое измерение, горизонталь, указывает на порядок вовлечения экземпляров сущностей (прямоугольники) во взаимодействие. Второе измерение, вертикаль, указывает на порядок обмена сообщениями (нумерованные стрелки) [22].

После открытия окна генерации отчета (print report) интерфейсная часть приложения запрашивает через API (application programming interface) серверной части метаданные о доступных пользователю шаблонах отчетов (getTemplates(user)). Пользователь выбирает шаблон из представленного списка и задает параметры генерации отчета (template, date). Модуль генерации начинает процедуру формирования отчета с помощью шаблонизатора. Для этого модуль запрашивает метаданные о процедурах, используемых в выбранном шаблоне (getProcedures(template)), и передает управление шаблонизатору Jinja2, который в цикле выполняет запросы на получения фактических данных из базы данных (getReport(template, date)) и генерирует динамический контент отчета в соответствии с разметкой шаблона. Результат генерации печатного отчета в формате HTML предоставляется пользователю.

Модуль генерации отчетов воплощает модельно-ориентированный подход и демонстрирует возможность использования метаданных для обеспечения большей гибкости в построении оперативных печатных отчетах. Шаблон отчета может быть актуализирован пользователем в конструкторе шаблонов и сразу использоваться как основа для построения печатного отчета новой версии.

Заключение. Современные тренды в разработке программного обеспечения и развитие технологий обработки и представления данных дают возможность по-новому взглянуть на многократно решенную задачу формирования оперативных печатных отчетов. Применение модельно-ориентированного подхода диктует необходимость включения сущностей, необходимых для формирования отчетов в мета-метамодель. Использование нестандартных форматов представления шаблонов требует подбора программной библиотеки, легко интегрируемой в существующую систему. Разработка специализированного модуля генерации отчетов обеспечивает взаимодействие всех компонентов: пользовательского интерфейса, программ-

ного интерфейса, метаданных и шаблонизатора. Настоящая работа представляет результаты разработки методических и алгоритмических средств генерации оперативных печатных отчетных форм на базе модельно-ориентированного подхода.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН программы фундаментальных исследований РФ (рег. № 0287-2021-0003).

Список источников

1. Cypher A. et al. No code required: giving users tools to transform the web. – Morgan Kaufmann, 2010.
2. Cabot J. Positioning of the low-code movement within the field of model-driven engineering. Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems: Companion Proceedings, 2020, pp. 1-3.
3. Atkinson C., Kuhne T. Model-driven development: a metamodeling foundation. IEEE software, 2003, vol. 20, no. 5, pp. 36-41.
4. Pastor O. et al. Model-driven development. Informatik-Spektrum, 2008, vol. 31, no. 5, pp. 394-407.
5. Грищенко М.А. Применение модельно-управляемого подхода для создания продукционных экспертных систем и баз знаний / М.А. Грищенко, Н.О. Дородных, О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин // Искусственный интеллект и принятие решений, 2016. – №. 2. – С. 16-29.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614159 Российская Федерация. Веб-платформа для построения модельно-ориентированных систем сбора данных: № 2018611794: заявл. 22.02.2018 : опубл. 02.04.2018 / Л. Ф. Ноженкова, А. В. Коробко, А. А. Коробко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».
7. Korobko A. A., Korobko A. V. A software platform for constructing model-driven systems for primary data consolidation //Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2020, vol. 1679, no. 3, pp. 032056.
8. Ланин В.В. Управление документами в динамически адаптируемых системах, основанных на метамоделировании / В.В. Ланин, Л.Н. Лядова // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT, 2010. – Т. 10. – С. 510-518.
9. Пенькова Т.Г. Модели и методы оперативного формирования документов / Т.Г. Пенькова // Вычислительные технологии, 2009. –Т. 14. – №2. – С. 98-109.
10. Panati M. Using Template Engines. Beginning KeystoneJS, Apress, Berkeley, CA, 2016, pp. 123-132.
11. Parr T. J. Enforcing strict model-view separation in template engines. Proceedings of the 13th international conference on World Wide Web, 2004, pp. 224-233.
12. Ronacher A. Jinja2 documentation. Welcome to Jinja2—Jinja2 Documentation (2.8-dev), 2008.

Коробко Анна Владимировна. *К.т.н., доцент кафедры Информационных управляющих систем Института информатики и телекоммуникаций СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Основные направления исследований включают методы и технологии интеллектуального и оперативного анализа данных, разработку и поддержку программного обеспечения, инициацию и выполнение научных исследований и наукоёмких инновационных проектов (StartUp). AuthorID: 615780, SPIN: 7756-2840, ORCID: 0000-0001-5337-3247. gglhroom@gmail.com, 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44.*

Шефтель Кирилл Сергеевич. *Бакалавр по направлению «Программная инженерия». Основные направления исследований включают модельно-ориентированную разработку и поддержку программного обеспечения. sheftel.ks@gmail.com, 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44.*

UDC 004.043: 004.91
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.014

Model-driven approach to generating operational printed reports

Anna V. Korobko[1], Kirill S. Sheftel[2]
[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
[2]Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Krasnoyarsk, *gglhroom@gmail.com*

Abstract. This work is focused on the development of methodological and algorithmic means of generating operational printed report forms based on the model-oriented approach. The paper shows the relevance of modern approach to software development without programming and justifies the use of model-driven architecture as the technological basis of "no code" platforms. Meta-metamodel description of "no code" data consolidation platform, that provides dynamic interpretation of the metamodel and data consolidation forms generation, is presented. Suggested the development of existing meta-metamodel by adding the entities "template" and "procedure", allowing for the efficient generation of printed report forms with dynamic content. The choice of Jinja2 templating engine for software implementation of report generation module is justified and a diagram of module sequence showing the interaction of the interface part of the platform with templating engine and metadata is presented.

Keywords: model-driven development, zero code, data consolidation platform, report generation, template engine, Jinja2

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the project of the state order of the Federal Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for the program of fundamental research of the Russian Federation (registration No. 0287-2021-0003).

References

1. Cypher A. et al. No code required: giving users tools to transform the web. – Morgan Kaufmann, 2010.
2. Cabot J. Positioning of the low-code movement within the field of model-driven engineering. Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems: Companion Proceedings, 2020, pp. 1-3.
3. Atkinson C., Kuhne T. Model-driven development: a metamodeling foundation. IEEE software, 2003, vol. 20, no. 5, pp. 36-41.
4. Pastor O. et al. Model-driven development. Informatik-Spektrum, 2008, vol. 31, no. 5, pp. 394-407.
5. Grishchenko M. A., Dorodnyh N. O., Nikolaychuk O. A., Yurin A. U. Primenenie model'no-upravlyaemogo podhoda dlya sozdaniya produkcionnyh ekspertnyh sistem i baz znanij[Applying a model-driven approach to develop productive expert systems and knowledge bases]. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij [Artificial intelligence and decision-making], 2016, no. 2, pp. 16-29.
6. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM no. 2018614159 Rossijskaya Federaciya [State Registration Certificate for Computer Programme no. 2018614159 Russian Federation]. Veb-platforma dlya postroeniya model'no-orientirovannyh sistem sbora dannyh: no. 2018611794 : zayavl. 22.02.2018: opubl. 02.04.2018 / L. F. Nozhenkova, A. V. Korobko, A. A. Korobko; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe nauchnoe uchrezhdenie «Federal'nyj issledovatel'skij centr «Krasnoyarskij nauchnyj centr Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk» [Web-platform for construction of model-oriented data consolidation systems: No. 2018611794: application. 22.02.2018: publ. 02.04.2018 / L.F. Nozhenkova, A.V. Korobko, A.A. Korobko; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Centre "Krasnoyarsk Scientific Centre of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences"].
7. Korobko A. A., Korobko A. V. A software platform for constructing model-driven systems for primary data consolidation. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, vol. 1679, no. 3, pp. 032056.
8. Lanin V. V., Lyadova L. N. Upravlenie dokumentami v dinamicheski adaptiruemyh sistemah, osnovannyh na metamodelirovanii [Document management in dynamically adaptable systems based on metamodelling]. Trudy Kongressa po intellektual'nym sistemam i informacionnym tekhnologiyam «AIS-IT» [Proceedings of the AIS-IT Congress on Intelligent Systems and Information Technology], 2010, part 10, pp. 510-518.
9. Penkova T.G. Modeli i metody operativnogo formirovaniya dokumentov [Models and methods for the rapid generation of documents]. Vychislitel'nye tekhnologii [Computational technologies], 2009, part 14, no. 2, pp. 98-109.
10. Panati M. Using Template Engines. Beginning KeystoneJS. Apress, Berkeley, CA, 2016, pp. 123-132.

11. Parr T. J. Enforcing strict model-view separation in template engines. Proceedings of the 13th international conference on World Wide Web, 2004, pp. 224-233.
12. Ronacher A. Jinja2 documentation. Welcome to Jinja2–Jinja2 Documentation (2.8-dev), 2008.

Anna Vladimirovna Korobko. *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Control Systems of the Institute of Informatics and Telecommunications of the Siberian State University. M.F. Reshetnev. The main areas of research include methods and technologies for intellectual and operational data analysis, software development and support, initiation and implementation of scientific research and science-intensive innovative projects (StartUp). AuthorID: 615780, SPIN: 7756-2840, ORCID: 0000-0001-5337-3247. gglhroom@gmail.com, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.*

Kirill Sergeevich Sheftel. *Bachelor in Software Engineering. The main areas of research include Model-Based Development and Software Support. sheftel.ks@gmail.com, 660036, Krasnoyarsk, Akadem-gorodok, 50, building 44.*

Статья поступила в редакцию 05.08.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 08/05/2022; approved after reviewing 09/06/2022; accepted for publication 09/19/2022.

УДК 004.89+510.644
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.015

Объективизация баз знаний интеллектуальных систем на основе индуктивного вывода с использованием нестрогих вероятностей

Аршинский Леонид Вадимович, Лебедев Вадим Сергеевич
Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *larsh@mail.ru*

Аннотация. Одним из способов объективизации продукционных баз знаний в системах, основанных на знаниях, может служить индуктивный вывод на основе объединённого метода сходства и различия с применением таблиц совместной встречаемости явлений. В статье предложен подход к такому выводу в условиях возможной низкой достоверности и противоречивости источников информации, формирующих таблицы. В основе подхода лежит понятие нестрогой вероятности, которая, в свою очередь, опирается на теорию логик с векторной семантикой в варианте V^{TF}-логик. Сами таблицы возможно получать из больших данных, в первую очередь – реляционных баз данных. Обсуждаемый подход позволяет не только генерировать продукции в условиях низкого качества информации, но и рассчитывать их истинность как векторную величину.

Ключевые слова: база знаний, большие данные, индуктивный вывод, нестрогая вероятность, логики с векторной семантикой

Цитирование: Аршинский Л.В. Объективизация баз знаний интеллектуальных систем на основе индуктивного вывода с использованием нестрогих вероятностей / Л.В. Аршинский, В.С. Лебедев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 190-200. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.015.

Введение. Системы, основанные на знаниях (СОЗ) – одна из классических технологий искусственного интеллекта (ИИ), с которой он фактически начинался. В основу технологии положено моделирование предметных областей (ПрО) с помощью баз знаний (БЗ), дополненных машинами вывода – специальными компонентами, обрабатывающими знания. Эти принципы были заложены ещё на заре развития ИИ в таких известных программах, как «Логик-теоретик» (Logic Theorist) Ньюэлла и Саймона, а также «Общий решатель проблем» (General Problem Solver - GPS) Ньюэлла, Саймона, Шоу [1, 2].

Моделирование на основе знаний позволяет формализовать области, не поддающиеся классической математической (количественной) формализации. Знаниевые модели качественные и отражают самые общие связи и отношения внутри ПрО. Уступая количественным моделям в детальности и предсказательной силе, они обладают большей широтой охвата, так как способны описывать любую часть мира, о которой можно рассуждать.

Первые СОЗ синтезировали или доказывали теоремы, исходя из соответствующих аксиом математики. Однако достаточно быстро стало понятно, что в таком качестве могут выступать определённые утверждения из любой предметной области: медицины, геологии, химии, юриспруденции и т.д. Здесь тоже существуют начальные факты и связи, отталкиваясь от которых, можно приходить к тем или иным заключениям. Соответствующее направление ИИ получило название экспертных систем (ЭС) [3-5].

Источниками знаний – исходных утверждений о свойствах и отношениях ПрО – стали эксперты. Однако знания экспертов вторичны по отношению к ПрО, они отражают её, внося субъективизм в соответствующие модели. При том, что сами БЗ – это отражение знаний экспертов, где также присутствует субъективное знание, уже со стороны инженеров знаний (хотя и существуют специальные методы уменьшения этого). То есть, в отличие от классического математического моделирования, в СОЗ присутствует двойное отражение: ПрО – эксперт – БЗ. Это, безусловно, сказывается на качестве моделей. Кроме того, при отражении знаний экспертов вскрылся факт: «Чем более компетентными становятся эксперты, тем менее способны они описать знания, которые используют для решения задач» [4] (парадокс

экспертизы). Да и сами принципы человеческого мышления сильно отличаются от машинных рассуждений. Возникают и дополнительные риски, обусловленные влиянием человеческого фактора [6]. Всё это вызвало снижение интереса к ЭС и даже привело к крайним представлениям о неэффективности СОЗ, хотя речь идёт об естественных границах технологии.

Как показывает история ИИ, специалисты приложили немало усилий для расширения этих границ. Разрабатывались новые модели знаний, методы автоматизации рассуждений, включающие разнообразные логические и квазилогические формализмы; наряду со знаниями стали использовать метазнания, ЭС развились до гибридных ЭС, объединяющих стандартные пакеты прикладных программ и средства манипулирования знаниями [7]. Более того, появились гибридные интеллектуальные системы как технология, объединяющая различные методы ИИ, включая технологии СОЗ [8, 9]. Однако главным источником знаний для СОЗ попрежнему остались эксперты, а значит, БЗ как модель ПрО неизбежно содержит изъян двойного отражения: ПрО – эксперт – БЗ, т.е. изъян субъективизма. Для уменьшения этого изъяна специалисты в качестве источников знаний предлагают привлекать не только экспертов, но и источники в виде лабораторных журналов, отчётов, иные первичные материалы, содержащие сведения непосредственно о ПрО [4, 10], в том числе базы данных (БД) [11]. Поскольку БД отражают непосредственно ПрО, становится возможным извлекать из них внутрипредметные связи и отношения, не искажённые субъективизмом экспертов-исследователей, причем в автоматическом или автоматизированном режимах. В информационных технологиях это обеспечивается средствами анализа больших данных (АБД) и интеллектуального анализа данных (Data Mining) как его ветви [10-14].

1. Индуктивный вывод в АБД. Векторная истинность при индуктивном выводе. Сегодня АБД – одно из ведущих направлений в обработке информации. Накопленные на электронных носителях сведения становится источником знаний, и «добыча» их из информационных массивов представляет большой прикладной интерес. Собственно, АБД во многом можно рассматривать, как способ извлечения скрытых знаний из больших массивов данных [11, 13].

Существуют различные подходы к анализу – статистические методы, OLAP-анализ, методы распознавания образов (задачи сегментации и классификации) и т.д. [13, 14] Естественное место в этом ряду занимает индуктивная логика, которая изначально предназначалась как раз для вывода общих закономерностей из частных случаев. В первую очередь – это закономерности вида «Если…, то…» [15-17]. Несмотря на то, что к индуктивному выводу в известном смысле можно отнести любой метод АБД, рассмотрим индукцию в классическом смысле Бэкона-Милля.

Первые упоминания об индукции, как методе, упоминаются ещё у Аристотеля и ряда более поздних исследователей [16]. Однако считается, что классический индуктивный вывод берёт своё начало в работах Ф. Бэкона и Д.С. Милля. Кроме самого первого – перечислительного метода, известного ещё Аристотелю, он содержит шесть «фигур» [16, 17]:

1. Метод единственного сходства (МЕС):

$$\frac{\begin{array}{c} a_{11} \,\&\, \ldots \,\&\, a_{n1} \,\&\, x \,\&\, y \\ a_{12} \,\&\, \ldots \,\&\, a_{n2} \,\&\, x \,\&\, y \\ \ldots \\ a_{1K} \,\&\, \ldots \,\&\, a_{nK} \,\&\, x \,\&\, y \end{array}}{x \to y}$$

2. Метод единственного различия (МЕР):

$$\frac{\begin{array}{c} a \,\&\, x \,\&\, y \\ a \,\&\, \neg x \,\&\, \neg y \end{array}}{x \to y}$$

3. Объединённый метод сходства и различия, совмещающий МЕС и МЕР (ОМСР).
4. Метод сопутствующих изменений:

$$\frac{\begin{array}{c} a \,\&\, x \,\&\, y \\ a \,\&\, x` \,\&\, y` \end{array}}{x \to y}$$

5. Метод остатков:

$$\frac{\begin{array}{c} a \,\&\, x \to b \,\&\, y \\ a \to b \end{array}}{x \to y}$$

6. Обратная дедукция:

$$\frac{\begin{array}{c} a \to b \\ b \end{array}}{a}$$

В каждом случае заключение носит гипотетический характер. При этом фигуры 1-5 отражают свойство совместной встречаемости, или совместного изменения *x* и *y*; что здесь является причиной, а что следствием, устанавливается из дополнительных соображений. С позиции дальнейшего интересны первые три фигуры, которые естественным образом ложатся на реляционную модель данных, наиболее часто употребляемую сегодня в различных БД. Эти фигуры фактически сводятся к анализу таблиц совместной встречаемости, подобных табл. 1.

Таблица 1. Совместная встречаемость явлений a_i и b

	a_1	a_2	…	a_n	b
1	a_{11}	a_{21}	…	a_{n1}	b_1
2	a_{12}	a_{22}	…	a_{n2}	b_2
3	a_{13}	a_{23}	…	a_{n3}	b_3
…	…	…	…	…	…
K	a_{1K}	a_{2K}	…	a_{nK}	b_K

Здесь a_i и b – наблюдаемые явления, между которыми ищется связь типа $a_i \to b$ (вид импликации может быть более сложным, но ограничимся таким). Факты наличия/отсутствия явлений рассматриваются двузначным (булевым) образом, когда $a_{ik}, b_k \in \{0,1\}$ ($k = 1 \ldots K$, K – число опытов).

Анализ таблиц, подобных 1, даёт хороший результат, когда a_i и b совместно встречаются либо не встречаются во всех K позициях. Если не так (что бывает на практике) учитывают относительную долю случаев, когда связь подтверждается, потому данный подход дополнился статистико-вероятностными представлениями [15, 17-20]. Это позволило категорические суждения $a_i \to b$ дополнить количественными характеристиками вроде показателей уверенности, как доле совместного наличия/отсутствия пар $\{a_i, b\}$ в общем наборе опытов. Одна из существующих при этом проблем, на которую не всегда обращают внимание, – необходимость гарантированного присутствия или отсутствия элементов пары. Возможна ситуация, когда полная уверенность в результатах наблюдения отсутствует. Например, когда не выполнена или некачественно выполнена очистка данных, данные получены из разнородных, в т.ч. противоречащих друг другу источников, источникам нет полного доверия и т.д.

Популярный сегодня нечёткий подход здесь плохо применим, так как для него нет разницы между совместными ответами «Да и Нет» (противоречие) и «Не знаю» (неопределённость), притом в условиях неполного доверия к данным. Современные техники индуктивного вывода пробуют это учесть (например [20, 21]), но более естественным, как представляется, выглядит векторный подход, когда истинность суждения a (в нашем случае утверждения о наблюдении/ненаблюдении элементов пары $\{a_i, b\}$) представляется вектором $\| a \| = \langle a^+; a^- \rangle$, где $a^+, a^- \in [0,1]$; a^+ – степень уверенности, что a истинно, a^-, – что ложно (аспекты истинности Истина и Ложь) [22, 23]. Аспекты a^+ и a^- формируются подтверждающими и опровергающими источниками, которым мы можем в разной степени доверять или не доверять. При этом связь

$$a^+ + a^- = 1,$$

не постулируется. Как результат, таблица 1 принимает векторную форму (таблица 2).

Таблица 2. Векторное представление совместной встречаемости

	a_1	a_2	…	a_n	b
1	$\langle a_{11}^+; a_{11}^- \rangle$	$\langle a_{21}^+; a_{21}^- \rangle$	…	$\langle a_{n1}^+; a_{n1}^- \rangle$	$\langle b_1^+; b_1^- \rangle$
2	$\langle a_{12}^+; a_{12}^- \rangle$	$\langle a_{22}^+; a_{22}^- \rangle$	…	$\langle a_{n2}^+; a_{n2}^- \rangle$	$\langle b_2^+; b_2^- \rangle$
3	$\langle a_{13}^+; a_{13}^- \rangle$	$\langle a_{23}^+; a_{23}^- \rangle$	…	$\langle a_{n3}^+; a_{n3}^- \rangle$	$\langle b_3^+; b_3^- \rangle$
…	…	…	…	…	…
K	$\langle a_{1K}^+; a_{1K}^- \rangle$	$\langle a_{2K}^+; a_{2K}^- \rangle$	…	$\langle a_{nK}^+; a_{nK}^- \rangle$	$\langle b_K^+; b_K^- \rangle$

Здесь $a_{ik}^+, b_k^+, a_{ik}^-, b_k^- \in [0,1]$, так как по каждому из явлений a_i и b могут поступать как подтверждающие, так и опровергающие свидетельства. Переход к классическому случаю происходит, если векторы имеют значение $\langle 1;0 \rangle$ (строгая истина) или $\langle 0;1 \rangle$ (строгая ложь). Таблица 2 даёт основания к применению в индуктивном выводе понятия нестрогой вероятности.

2. Нестрогая вероятность. Данное понятие было введено в работе [23] и связано с векторным представлением истинности утверждения $F(\omega,A)$ = «Элементарное событие ω благоприятно с точки зрения события A». Здесь A – подмножество полной группы элементарных событий Ω. Если, как это принято, представить вероятность события A суммой:

$$p(A) = \sum_{\omega \in A} p(\omega), \tag{1}$$

то такой же результат даст сумма:

$$p(A) = \sum_{\omega \in \Omega} \| F(\omega, A) \| \, p(\omega), \tag{2}$$

где $\|F(\omega,A)\|$ – истинность $F(\omega,A)$. Истинность равна 1, если $\omega \in A$, и 0 в противном случае. Переход к векторному представлению:

$$\| F(\omega, A) \| = \langle F^+(\omega, A); F^-(\omega, A) \rangle$$

порождает иное, векторное представление вероятности:

$$P(A) = \langle P^+(A); P^-(A) \rangle = \langle \sum_{\omega \in \Omega} F^+(\omega, A) p(\omega); \sum_{\omega \in \Omega} F^-(\omega, A) p(\omega) \rangle . \tag{3}$$

Оно имеет смысл, когда нет твердой уверенности в благоприятности/неблагоприятности ω для A, а есть доводы как «за», так и «против» с разной степенью доверия к ним. Очевидно, что для строгих значений вектора $\| F(\omega, A) \|$, равных $\langle 1;0 \rangle$ или $\langle 0;1 \rangle$, (2) превращается в (1), а (3) в привычную вероятность, где $P^+(A)$ – вероятность A, а $P^-(A)$ – вероятность противоположного события. В [10] для такого представления даны выражения для сложных вероятностей:

$$P(\neg A)=\sum_{\omega\in\Omega}\|\neg F(\omega,A)\|p(\omega)=\langle\sum_{\omega\in\Omega}F^{-}(\omega,A)p(\omega);\ \sum_{\omega\in\Omega}F^{+}(\omega,A)p(\omega)\rangle$$

– вероятность первой формы противоположного события;

$$P(\sim A)=\sum_{\omega\in\Omega}\|\sim F(\omega,A)\|p(\omega)=\langle\sum_{\omega\in\Omega}[1-F^{+}(\omega,A)]p(\omega);\ \sum_{\omega\in\Omega}[1-F^{-}(\omega,A)]p(\omega)\rangle$$

– вероятность второй формы противоположного события (в классическом случае эти формы совпадают);

$$P(A\vee B)=\langle\sum_{\omega\in\Omega}[F^{+}(\omega,A)\oplus F^{+}(\omega,B)]p(\omega);\ \sum_{\omega\in\Omega}[F^{-}(\omega,A)\bullet F^{-}(\omega,B)]p(\omega)\rangle$$

– вероятность первой формы суммы двух нестрогих событий;

$$P(A\vee_2 B)=\langle\sum_{\omega\in\Omega}[F^{+}(\omega,A)\oplus F^{+}(\omega,B)]p(\omega);\ \sum_{\omega\in\Omega}[F^{-}(\omega,A)\oplus F^{-}(\omega,B)]p(\omega)\rangle$$

– вероятность второй формы суммы двух нестрогих событий (в классическом случае эта вероятность отсутствует);

$$P(A\,\&\,B)=\langle\sum_{\omega\in\Omega}[F^{+}(\omega,A)\bullet F^{+}(\omega,B)]p(\omega);\ \sum_{\omega\in\Omega}[F^{-}(\omega,A)\oplus F^{-}(\omega,B)]p(\omega)\rangle$$

– вероятность первой формы произведения двух нестрогих событий;

$$P(A\,\&_2\,B)=\langle\sum_{\omega\in\Omega}[F^{+}(\omega,A)\bullet F^{+}(\omega,B)]p(\omega);\ \sum_{\omega\in\Omega}[F^{-}(\omega,A)\bullet F^{-}(\omega,B)]p(\omega)\rangle$$

– вероятность второй формы произведения двух нестрогих событий (в классическом случае эта вероятность отсутствует).

Здесь $\bullet$ и $\oplus$ – соответственно триангулированная (треугольная) норма и ко-норма в инфиксной записи, с дополнительной аксиомой:

$$(1-x)\bullet(1-y)=1-x\oplus y;$$

(или, что то же самое: $(1-x)\oplus(1-y)=1-x\bullet y$).

Двумя наиболее распространёнными примерами данных норм выступают известные пары функций:

$$x\bullet y=x\cdot y;\qquad x\oplus y=x+y-x\cdot y;$$
$$x\bullet y=\min(x,y);\qquad x\oplus y=\max(x,y).$$

Смысл первых форм сложных событий достаточно очевиден. Для противоположного события благоприятность и неблагоприятность меняются местами. Для суммы достаточно, чтобы элементарное событие ω было благоприятным хотя бы для одного из подмножеств A или B и неблагоприятным для обоих сразу. Для произведения – чтобы событие было благоприятным для обоих и неблагоприятным хотя бы для одного.

Вторые приведены для полноты и далее здесь не рассматриваются.

В [23] нестрогая вероятность интерпретировалась, как риск, если соответствующие случайные события оценивать, как с вредной, так и с полезной стороны. Возможны и другие интерпретации [24]. Одну из таких интерпретаций предлагает индуктивный вывод.

3. Нестрогая вероятность в индуктивном выводе. Как уже говорилось, в основе ОМСР лежит работа с таблицами совместной встречаемости (таблица 1). При этом каждая строка таблицы рассматривается, как аргумент в пользу соответствующей импликации (например, $a_i\to b$). Согласно ОМСР, если каждое обнаружение явления a_i сопровождается регистрацией b, а отсутствие a_i отсутствием b, можно говорить о достоверности импликации (с точностью до произведённых опытов). Формально это означает эквивалентность a_i и b; выполняется: $a_i\,\&\,b\vee\neg a_i\,\&\neg b$ (в этом смысле «индуктивная импликация» отличается от материальной: $\neg a_i\vee b$).

Если совместное наличие/отсутствие a_i и b наблюдается только в части проверок, скажем, в 75% случаев, можно говорить о степени уверенности в импликации равной 0.75. Каж-

дая строка таблицы 1, где одно из утверждений: $a_i \,\&\, b$ или $\neg a_i \,\&\, \neg b$ истинно, есть аргумент в пользу $a_i \to b$; остальные строки – аргументы против.

Указанные представления можно перенести на векторный случай, когда утверждения о наблюдении не столь категоричны и в каждой строке могут встречаться как показания за, так и показания против a_i и/или b с разной степенью убедительности. Значение вектор-функции $\| F(\omega, A) \|$ для конкретной строки k в этом случае определяется, как:

$$\| F(k, a_i \to b \| = \| a_{ik} \,\&\, b_k \vee \neg a_{ik} \,\&\, \neg b_k \|;$$

(строка, как элементарное случайное событие).

Присваивая строке «вероятность» $p(k)=1/K$ и принимая, что векторная истинность конъюнкции, дизъюнкции и отрицания определяются их первыми формами [23]:

$$\| A \,\&\, B \| = \langle A^+ \bullet B^+ ; A^- \oplus B^- \rangle ;$$

$$\| A \vee B \| = \langle A^+ \oplus B^+ ; A^- \bullet B^- \rangle ;$$

$$\| \neg A \| = \langle A^- ; A^+ \rangle ;$$

определяем для таблицы 2 истинность импликации $a_i \to b$ как нестрогую вероятность:

$$P(a_i \to b) = \langle \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} [a_{ik}^+ \bullet b_k^+ \oplus a_{ik}^- \bullet b_k^-] ; \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} [(a_{ik}^- \oplus b_k^-) \bullet (a_{ik}^+ \oplus b_k^+)] \rangle . \quad (4)$$

Выражение (4) можно использовать для вычисления (векторного) показателя уверенности (истинности) индукции $a_i \to b$ при дефиците и/или противоречивости сведений о наблюдении a_i и b.

К примеру, для таблицы 3 (столбцы 2…n во внимание не принимаем; норму и ко-норму берём из первого примера):

Таблица 3. Пример совместной встречаемости 1

	a_1	a_2	…	a_n	b
1	⟨1;0⟩	…	…	…	⟨0.8;0.4⟩
2	⟨0.2;0.9⟩	…	…	…	⟨0;1⟩
3	⟨0.7;0.4⟩	…	…	…	⟨1;0⟩
4	⟨0.3;0.4⟩	…	…	…	⟨1;1⟩

Это даёт значение $P(a_1 \to b) = \langle 0.745;0.5 \rangle$. Т. е. импликация в целом наблюдается, но информация достаточно противоречивая. Если же взять более простые случаи (таблицы 4-6), получаются вполне ожидаемые результаты:

Таблица 4. Пример совместной встречаемости 2

	a_1	a_2	…	a_n	b
1	⟨1;0⟩	…	…	…	⟨1;0⟩
2	⟨0;1⟩	…	…	…	⟨0;1⟩
3	⟨1;0⟩	…	…	…	⟨1;0⟩
4	⟨0;1⟩	…	…	…	⟨0;1⟩

$P(a_1 \to b) = \langle 1;0 \rangle$ – строгая истина;

Таблица 5. Пример совместной встречаемости 3

	a_1	a_2	…	a_n	b
1	⟨1;0⟩	…	…	…	⟨0;1⟩
2	⟨0;1⟩	…	…	…	⟨1;0⟩
3	⟨0;1⟩	…	…	…	⟨1;0⟩
4	⟨0;1⟩	…	…	…	⟨1;0⟩

$P(a_1 \to b) = \langle 0.;1 \rangle$ – строгая ложь.

Если гипотеза подтверждается лишь в 75% случаев (таблица 6), получаем:

Таблица 6. Пример совместной встречаемости 4

	a_1	a_2	…	a_n	b
1	⟨1;0⟩	…	…	…	⟨1;0⟩
2	⟨0;1⟩	…	…	…	⟨0;1⟩
3	⟨1;0⟩	…	…	…	⟨1;0⟩
4	⟨1;0⟩	…	…	…	⟨0;1⟩

$P(a_1 \to b) = \langle 0.75;0.25 \rangle$ – как, собственно говоря, и должно быть.

Если считать, что подобные таблицы отражают связь между явлениями *a* и *b*, такая связь может выражаться гипотезами:

$$h_1 = a \to b = a \,\&\, b \vee \neg a \,\&\, \neg b$$
$$h_2 = a \to \neg b = a \,\&\, \neg b \vee \neg a \,\&\, b$$
$$h_3 = \neg a \to b = \neg a \,\&\, b \vee a \,\&\, \neg b$$
$$h_1 = \neg a \to \neg b = \neg a \,\&\, \neg b \vee a \,\&\, b$$

Видно, что $h_1 = h_4$ и $h_2 = h_3$, то есть с точки зрения ОМСР возможны только гипотезы h_1 и h_2.

Все сочетания «предельных» значений истинности $\|a\|$ и $\|b\|$: ⟨0;1⟩ «строгая ложь», ⟨0;0⟩ «неопределённость», ⟨1;1⟩ «полное противоречие», ⟨1;0⟩ «строгая истина» и соответствующие значения истинности гипотез h_1 *и* h_2 представлены в таблице 7. Видно, что для «классического» представления истинности в виде строгой истины и строгой лжи гипотезы h_1 *и* h_2 противоположны (таблица 7), то есть в «классическом» варианте достаточно одной гипотезы: h_1 или h_2. Однако если $\|a\|$ и $\|b\|$ отличаются от предельных значений, такая взаимосвязь исчезает:

$$h_1 = \langle a^+ \bullet b^+ \oplus a^- \bullet b^-; (a^- \oplus b^-) \bullet (a^+ \oplus b^+) \rangle$$
$$h_2 = \langle a^+ \bullet b^- \oplus a^- \bullet b^+; (a^- \oplus b^+) \bullet (a^+ \oplus b^-) \rangle$$

Это означает, что в векторном случае свидетельства в пользу каждой гипотезы следует учитывать отдельно!

Таблица 7. Гипотезы h_1 *и* h_2 для предельных значений истинности

a	b	$a \to b$	$a \to \neg b$
⟨0;1⟩	⟨0;1⟩	⟨1;0⟩	⟨0;1⟩
⟨0;0⟩	⟨0;1⟩	⟨0;0⟩	⟨0;0⟩
⟨1;1⟩	⟨0;1⟩	⟨1;1⟩	⟨1;1⟩
⟨1;0⟩	⟨0;1⟩	⟨0;1⟩	⟨1;0⟩
⟨0;1⟩	⟨0;0⟩	⟨0;0⟩	⟨0;0⟩
⟨0;0⟩	⟨0;0⟩	⟨0;0⟩	⟨0;0⟩
⟨1;1⟩	⟨0;0⟩	⟨0;1⟩	⟨0;1⟩
⟨1;0⟩	⟨0;0⟩	⟨0;0⟩	⟨0;0⟩
⟨0;1⟩	⟨1;1⟩	⟨1;1⟩	⟨1;1⟩
⟨0;0⟩	⟨1;1⟩	⟨0;1⟩	⟨0;1⟩

a	b	$a \to b$	$a \to \neg b$
⟨1;1⟩	⟨1;1⟩	⟨1;1⟩	⟨1;1⟩
⟨1;0⟩	⟨1;1⟩	⟨1;1⟩	⟨1;1⟩
⟨0;1⟩	⟨1;0⟩	⟨0;1⟩	⟨1;0⟩
⟨0;0⟩	⟨1;0⟩	⟨0;0⟩	⟨0;0⟩
⟨1;1⟩	⟨1;0⟩	⟨1;1⟩	⟨1;1⟩
⟨1;0⟩	⟨1;0⟩	⟨1;0⟩	⟨0;1⟩

Из таблицы 7 также видно, что, несмотря на то, что результирующие истинности достаточно разумны, строки с неопределённостями целесообразно исключать. Исключение можно реализовать, вводя порог определённости. Например, 0.5, если его значение $\in$ [0,1]. Окончательный выбор следует делать, привлекая меры достоверности:

$$\mu_{\text{д}}(h_k) = h_k^+ - h_k^- ;$$

и определённости:

$$\mu_{\text{о}}(h_k) = h_k^+ \oplus h_k^- .$$

Первая из них позволяет выбрать наиболее достоверную гипотезу, вторая – определить гипотезу, наиболее подкреплённую свидетельствами.

Таким образом, подход на основе нестрогих вероятностей позволяет определять (статистическую) истинность индуктивных гипотез как векторную величину, независимо от наличия или отсутствия проблем со свидетельствами. Достоинством подхода служит то, что техника расчёта сохраняет работоспособность при наличии описанных проблем и в этом смысле устойчива к ним. Объективные импликативные связи можно получать в достаточно сложных условиях. Однако субъективизм может (и скорее всего будет) присутствовать в векторных оценках истинности фактов (наборы $a_{ik}^+, b_k^+, a_{ik}^-, b_k^-$), что следует принимать во внимание.

Заключение. Общий вывод следующий:

1. Индуктивный вывод в смысле ОМСР в условиях дефицита и противоречивости данных можно осуществлять на основе векторного представления истинности и вытекающего из него понятия нестрогой вероятности.

2. Такой подход позволяет работать в условиях частичной информированности и, что важно, автоматически и достаточно последовательно учитывать неполноту и противоречивость свидетельств, отсеивая их при необходимости. Это выглядит достоинством представленного подхода, хотя следует помнить, что субъективизм может присутствовать в оценках истинности генерируемых импликаций.

3. Саму технику можно применять для автоматизации построения продукционных баз знаний в СОЗ. Исходным сырьём для этого могут служить большие данные.

Следует отметить, что ОМСР не единственный способ выявления причинно-следственных зависимостей в наборах данных. Этому же служат, к примеру, ассоциативный и секвенциальный анализы, направленные на выявление связей между неупорядоченными (в ассоциативном) или упорядоченными (в секвенциальном анализе) группами явлений или объектов, входящих в т.н. транзакции по принципу: если в транзакции наблюдается ассоциация/секвенция *A*, то с определённой степенью уверенности в ней может обнаружиться ассоциация/секвенция *B* (см. напр. [25, 26]). Основным понятием обоих анализов является «поддержка» как отношение числа транзакций, где ассоциация/секвенция (или совместное присутствие *A* и *B*) наблюдалась, к общему числу транзакций. Например, вывод о том, что если

покупатель приобрёл группу товаров *A*, в его чеке (транзакции) будет наблюдаться и группа товаров *B*. Если полный перечень (ассортимент) явлений представить набором столбцов, а транзакции строками с нулями и единицами в соответствующих столбцах, то поддержку можно вычислить (и вычисляют) статистически. Заменяя нули и единицы векторами истинности, можно распространить представленный в работе подход и на эти анализы. Это может оказаться востребованным для случаев, когда сведения о явлениях в транзакциях неочевидны, однако это требует отдельного изучения.

Список источников

1. Newell A., Simon H.A. The Logic Theory Machine. Transactions on Information Theory, IT-2, no. 3, 1956.
2. Newell A., Shaw J.C., Simon H.A. Report on a General Problem-Solving Program. Carnegie Institute of Technology, 1958, 27 p.
3. Элти Дж. Экспертные системы: концепции и примеры / Дж. Элти, М. Кумбс: пер. с англ. и предисл. Б.И. Шитикова // М.: Финансы и статистика, 1987. – 191 с.
4. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам / Д. Уотермен: пер. с англ. // М.: Мир, 1989. – 388 с.
5. Джарратано Дж. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. 4-е издание. / Дж. Джарратано, Г. Райли: пер. с англ. // М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 1152 с.
6. Абрамова Н.А. О проблеме рисков из-за человеческого фактора в экспертных методах и информационных технологиях / Н.А. Абрамова // Труды VI Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO`07 Москва 29 января-1 февраля 2007 г. – С. 51-68.
7. Частиков А.П. Разработка экспертных систем. Среда CLIPS / А.П. Частиков А.П., Т.А. Гаврилова Т.А., Д.Л. Белов // СПб: «БХВ-Петербург», 2003. – 393 с.
8. Medsker L.R. Hybrid Intelligent Systems. Kluwer Academic Publishers, Boston, London, Dordrecht, 1995, 298 p.
9. Колесников А.В. Технология гибридных интеллектуальных систем: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управлеине и обработка информации»: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / А.В. Колесников // Санкт-Петербургский государственный технический университет. – Санкт-Петербург, 2002. – 387 с.
10. Гаврилова Т.А. Инженерия знаний. Модели и методы: учебник / Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, Д.И. Муромцев // СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 324 с.
11. Финн В.К. Об интеллектуальном анализе данных / В.К. Финн // Новости искусственного интеллекта, 2004. – №3. – С. 1-20.
12. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний / Н.Г. Загоруйко // Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. – 270 с.
13. Большие данные (Big Data) // ФОРС. Интернет-журнал, № 1. URL: https://www.fors.ru/ upload/magazine/01/html_texts/total_big_date(2).html
14. Big Data Analytics – Quick Guide. Available at: https://www.tutorialspoint.com/big_data_analytics/ big_data_analytics_quick_guide.htm
15. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения / Д. Пойа: пер. с англ. под ред. С.А. Яновской // М.: Наука, 1975. – 464 с
16. Ивлев Ю.В. Логика: Учебник 3-е изд. / Ю.В. Ивлев // М.: ТК Велби, – Изд-во Проспект, 2004. – 288 с.
17. Минто В. Дедуктивная и индуктивная логика / В. Минто // Мн.: Харвест, 2002. – 352 с.
18. Голенков В.В. Статистические основы индуктивного вывода: учеб. пособие / В.В. Голенков, М. Д. Степанова, С.А. Самодумкин, Н.А. Гулякина // Минск: БГУИР, 2009. – 202 с.
19. Кайберг Г. Вероятность и индуктивная логика / Г. Кайберг // М.: Изд-во «Прогресс», 1978. – 373 с.
20. Гаек П., Гавранек Т. Автоматическое образование гипотез: математические основы общей теории / П. Гаек, Т. Гавранек // М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 280 с.
21. ДСМ-метод автоматического порождения гипотез: Логически и эпистемологические основания / Сост. О.М. Аншаков, Е.Ф. Фабрикантова // М.: Книжный дом «ЛИБРИКОМ», 2009. – 432 с.
22. Аршинский Л.В. Методы обработки нестрогих высказываний / Л.В. Аршинский. // Иркутск: Изд-во Восточно-Сибирского института МВД России, 1998. – 40 с.
23. Аршинский Л.В. Приложение логик с векторной семантикой к описанию случайных событий и оценке риска / Л.В. Аршинский. // Проблемы анализа риска, 2005. –Т.2. – № 3. – С.231-248.
24. Аршинский Л.В. Векторные логики: основания, концепции, модели / Л.В. Аршинский // Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2007. – 228 с.

25. Трубицын И.Ю. Формирование наборов данных при проведении секвенциального анализа событий / И.Ю. Трубицын, Я.А. Бекенёва // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. – № 3 – С. 45-52.
26. Матвейкин В.Г., Дмитриевский Б.С., Ляпин Н.Р. Информационные системы интеллектуального анализа / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, Н.Р. Ляпин // М.: Машиностроение, 2008. – 92 с.

Аршинский Леонид Вадимович. *Д.т.н., доцент, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения, AuthorID: 520252; SPIN: 9286-4084; ORCID: 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.*

Лебедев Вадим Сергеевич. *Аспирант кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения. AuthorID: 1100520; SPIN: 4276-7301. lebedevvs97@yandex.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.*

UDC 004.89+510.644
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.015

Objectification of knowledge bases of intelligent systems based on inductive inference using non-strict probabilities

Leonid V. Arshinskiy, Vadim S. Lebedev
Irkutsk State Transport University,
Russia, Irkutsk, *larsh@mail.ru*

Abstract. It is shown that one of the ways to objectify productive knowledge bases in knowledge-based systems can serve as an inductive inference based on the combined method of similarity and difference and tables of joint occurrence of phenomena. An approach to the use of such a conclusion is proposed in conditions of possible low reliability and inconsistency of information sources forming tables. The approach is based on the concept of non-strict probability, which, in turn, is based on the theory of logics with vector semantics in the VTF-logic variant. The tables themselves can be obtained from big data, primarily relational databases. It is assumed that such an approach will weaken subjectivism in the construction of production knowledge bases.

Keywords: knowledge base, big data, inductive inference, nonstrict probability, logics with vector semantics

References

1. Newell A., Simon H.A. The logic theory machine. Transactions on information theory, IT-2, no. 3, 1956.
2. Newell A., Shaw J.C., Simon H.A. Report on a General problem-solving program. Carnegie Institute of Technology, 1958, 27 p.
3. Alty J.L., Coombs M.J. Ekspertnyye sistemy: kontseptsii i primery [Expert Systems: Concepts and Examples]. Moscow: Finansy i statistika [Finance and statistics], 1987, 191 p.
4. Uotermen D. Rukovodstvo po ekspertnym sistemam [Guide to Expert Systems]. Moscow: Mir [Mir], 1989, 388 p.
5. Giarratano J.C., Riley G.D. Ekspertnye sistemy: principy razrabotki i programmirovanie. 4-e izdanie [Expert Systems: Principles and Programming. 4th ed.]. Moscow: Izdatel'skij dom «Vil'yams» [Publishing House "Williams"], 2007, 1152 p.
6. Abramova N.A. O probleme riskov iz-za chelovecheskogo faktora v ekspertnyh metodah i informacionnyh tekhnologiyah [On the problem of risks due to the human factor in expert methods and information technologies]. Trudy VI Mezhdunarodnoy konferentsii «Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya» SICPRO`07 Moskva 29 yanvarya-1 fevralya 2007g. [Proceedings of the VI International Conference "Identification of systems and management tasks" SICPRO`07 Moscow January 29-February 1], 2007, pp. 51-68.
7. Chastikov A.P., Gavrilova T.A., Belov D.L. Razrabotka ekspertnyh sistem. Sreda CLIPS. [Development of expert systems. CLIPS environment]. St. Petersburg: "BHV-Peterburg" ["BHV-Petersburg"], 2003, 393 p.
8. Medsker L.R. Hybrid Intelligent Systems. Kluwer Academic Publishers, Boston, London, Dordrecht, 1995, 298 p.
9. Kolesnikov A.V. Tekhnologiya gibridnyh intellektual'nyh system [Technology of hybrid intelligent systems]: specialty 05.13.01 "System analysis, control and information processing": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. St. Petersburg State Technical University. Saint Petersburg, 2002, 387 p.
10. Gavrilova T.A., Kudryavtsev D.V., Muromtsev D.I. Inzheneriya znanij. Modeli i metody: uchebnik [Engineering of knowledge. Models and methods: textbook]. St. Petersburg: Izdatel'stvo "Lan'" [Publishing House "Lan'"], 2016, 324 p.

11. Finn V.K. Ob intellektual'nom analize dannyh [About intelligent data analysis]. Novosti iskusstvennogo intellekta [Artificial Intelligence News], 2004, no. 3, pp. 1-20.
12. Zagoruiko N.G. Prikladnye metody analiza dannyh i znanij [Applied methods of data and knowledge analysis]. Novosibirsk: IM SO RAN [MI SB RAS], 1999, 270 p.
13. Bol'shie dannye [Big Data]. FORS. Internet-zhurnal [FORS. Internet-magazine], no. 1. Available at: https://www.fors.ru/ upload/magazine/01/html_texts/total_big_date(2).html
14. Big Data Analytics – Quick Guide. Available at: https://www.tutorialspoint.com/big_data_analytics/ big_data_analytics_quick_guide.htm
15. Poja G. Matematika i pravdopodobnye rassuzhdeniya [Mathematics and Plausible Reasoning]. Moscow: Nauka [Science], 1975, 464 p.
16. Ivlev Yu.V. Logika: Uchebnik. 3-e izd. [Logic: Textbook. 3rd ed.]. Moscow: TK Velbi [TK Velbi], Izd-vo Prospekt [Publishing House "Prospect"], 2004, 288 p.
17. Minto V. Deduktivnaya i induktivnaya logika [Deductive and inductive logic]. Minsk: Harvest [Harvest], 2002, 352 p.
18. Golenkov V.V., Stepanova M.D., Samodumkin S.A., Gulyakina N.A. Statisticheskie osnovy induktivnogo vyvoda: ucheb. posobie [Statistical bases of inductive inference: textbook]. Minsk: BGUIR [BGUIR], 2009, 202 p.
19. Kyburg H.E. Вероятность и индуктивная логика [Probability and Inductive Logic]. Moscow: Izd-vo «Progress» [Publishing House "Progress"], 1978, 373 p.
20. Hajek P., Havranek T. Avtomaticheskoye obrazovaniye gipotez: matematicheskiye osnovy obshchey teorii [Mechanizing Hypotesis Formation: Mathematical Foundation for a General Theory]. Moscow: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury [Science. Main editorial office of the physical and mathematical literature], 1984, 280 p.
21. Anshakov O.M., Fabrikantova E.F. DSM-metod avtomaticheskogo porozhdeniya gipotez: Logicheski i epistemologicheskie osnovaniya [DSM-the method of automatic generation of hypotheses: Logical and epistemological foundations]. Moscow: Knizhnyj dom "LIBRIKOM" ["LIBRIKOM" Book House], 2009, 432 p.
22. Arshinskiy L.V. Metody obrabotki nestrogih vyskazyvanij [Methods of processing of nonstrict propositions]. – Irkutsk: Izd-vo Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii [East-Siberian Institute of MIA of Russia], 1998, 40 p.
23. Arshinskiy L.V. Prilozhenie logik s vektornoj semantikoj k opisaniyu sluchajnyh sobytij i ocenke riska [Application of logic with vector semantics to the description of random events and risk assessment]. Problemy analiza riska [Issues of Risk Analysis], 2005, vol.2, no. 3, pp. 231-248.
24. Arshinskiy L.V. Vektornye logiki: osnovanija, koncepcii, modeli [Vector logic: foundations, concepts, models]. Irkutsk: Irkutskij gosudarstvennyj universitet [Irkutsk state university], 2007, 228 p.
25. Trubityn I. Yu., Bekeneva Ya, A. Formirovanie naborov danny`x pri provedenii sekvencial`nogo analiza soby`tij [Formation of databases during sequential event analysis]. Izvestiya SPbGETU «LETI» [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University], 2020, no. 3, pp. 45-52.
26. Matveikin V.G., Dmitrievsky B.S., Lyapin N.R. Informacionny`e sistemy` intellektual`nogo analiza [Information systems of intellectual analysis]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 2008, 92 p.

Leonid Vadimovich Arshinsky. *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department "Information Systems and Information Security" of Irkutsk State Transport University, AuthorID: 520252, SPIN: 9286-4084, ORCID: 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky, 15.*

Vadim Sergeyevich Lebedev. *Postgraduate student of the Department "Information Systems and Information Security" of Irkutsk State Transport University, AuthorID: 1100520, SPIN: 4276-7301, lebedevvs97@yandex.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky, 15.*

Статья поступила в редакцию 03.09.2022; одобрена после рецензирования 22.09.2022; принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 09/03/2022; approved after reviewing 09/22/2022; accepted for publication 11/01/2022.

УДК 004.932.72
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.016

Система распознавания объектов с использованием теории активного восприятия

Гай Василий Евгеньевич, Смирнов Александр Вадимович, Баринов Роман Олегович, Поляков Игорь Владимирович, Голубенко Владимир Андреевич, Кузнецов Георгий Дмитриевич

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород, *barinovr@list.ru*

Аннотация. Предлагается метод обнаружения объекта на изображении на основе глобального признакового описания. Описывается информационная модель и предлагаются варианты реализации каждого из этапов решения задачи обнаружения объекта на изображении. На этапе предварительной обработки изображения приводятся варианты, включающие нормализацию, вычисление функции яркости и применение фильтра Гаусса. Этап формирования глобального признакового описания объекта опирается на теорию активного восприятия (U-преобразование). Принятие решения о локализации объекта осуществляется на основе минимального евклидового расстояния от обнаруженного объекта до эталонных объектов из базы данных. Для тестирования использовались изображения из базы Russian Traffic Sign Dataset и их изменённые копии (изображения с наложенным шумом, изображения с поворотом искомых объектов). При анализе результатов тестирования были предложены параметры, дающие наибольшую точность предложенного метода обнаружения объекта на изображении. При наличии шума на изображении, точность локализации предложенного метода составила более 70%. Предлагаемый метод обнаружения объекта на изображении устойчив к повороту искомых объектов. Полученная точность, порядка 94-96%, при сравнении с точностью существующих методов показала, что в нормальных условиях разработанный метод работает аналогично известным методам.

Ключевые слова: обработка изображений, обнаружение объектов, теория активного восприятия

Цитирование: Гай В.Е. Система распознавания объектов с использованием теории активного восприятия / В.Е. Гай, А.В. Смирнов, Р.О. Баринов, И.В. Поляков, В.А. Голубенко, Г.Д. Кузнецов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 201-212. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.016.

Введение. Распознавание объектов на изображениях стало в последнее время одной из важнейших задач анализа сцен и машинного зрения. Под объектом понимается не только цифровое представление локального фрагмента двумерной сцены, а некоторое его приближенное описание, в виде набора характерных свойств (признаков). Основное назначение описаний (образов объектов) – это их использование в процессе установления соответствия объектов, осуществляемого путем сравнения (сопоставления).

Исследования по распознаванию образов пространственных объектов отличаются большим разнообразием в постановке задач и выборе средств их решения (методов обработки соответствующих фрагментов изображений), что является следствием разнообразия областей практического применения. Традиционными задачами, решавшимися еще в первых опытных разработках систем машинного зрения, служат задачи обнаружения и распознавания объектов, имеющих заданную форму на основе искаженных (зашумленных, повернутых, деформированных) изображений.

1. Структура алгоритмов обнаружения объектов на изображении. Большая часть актуальных методов, решающих задачу обнаружения объектов на изображении, включают в себя три основных этапа:

- предварительная обработка изображения;
- построение признакового описания искомого объекта;
- принятие решения на основе полученного признакового описания.

Схема описанных выше этапов решения задачи представлена на рисунке 1.

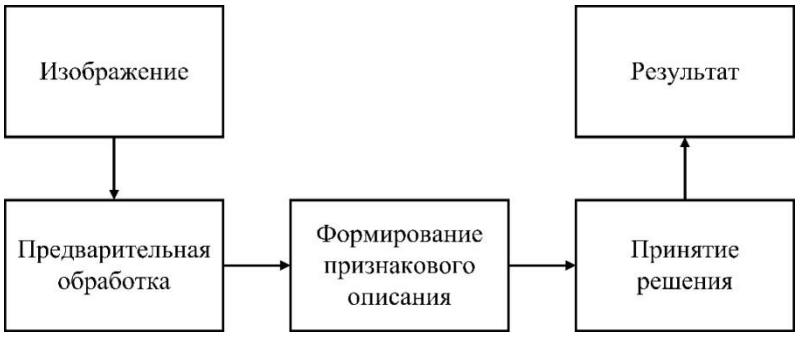


Рис. 1. Структура системы обнаружения объектов на изображении

2. Обзор существующих методов построения признакового описания объекта на изображении. Общие принципы работы существующих систем по обнаружению объектов достаточно схожи. Как правило, в процессе поиска производится сравнивание признаков данного объекта или группы данных объектов в используемой базе изображений. Степени схожести объектов задаются параметрами системы и задачами, которые она выполняет. Главное преимущество глобальных дескрипторов заключается в том, что такого рода признаки демонстрируют достаточно высокую производительность, при этом обладая существенно меньшей сложностью вычислений.

Для получения глобального признакового описания, используются низкоуровневые операции, которые производятся при структурном анализе изображения. Благодаря этому, такого рода дескрипторы могут нести информацию о текстуре объекта, его цвете, или возможном движении объекта.

Сегодня имеются несколько алгоритмов, которые применяются для вычисления глобального признакового описания объектов. Ниже приведены самые основные и наиболее популярные из них: GIST [1]; HOG [2]; COHOG [3]; Моментные инварианты Ху [4].

GIST – алгоритм базируется на допущении, что при помощи распределения градиентов интенсивности или направления краев можно описать внешний вид и форму объектов на изображении. Реализация такого рода дескриптора может осуществляться разделением изображения на сегментированные области, именуемые ячейками, и расчетом для каждой ячейки гистограммы направлений градиентов или направлений краев для пикселей, находящихся внутри ячейки. Главным недостатком такого метода является сложность вычислений направлений градиентов и направлений краев пикселей.

HOG – этот метод похож на гистограммы направления края, дескрипторы SIFT и контексты формы, но отличается тем, что вычисляется на плотной сетке равномерно распределенных ячеек по всему изображению и использует нормализацию перекрывающегося локального контраста для увеличения точности. Недостатком метода HOG является применение операции свертки при вычислении градиентов направлений.

COHOG – совместная гистограмма ориентированных градиентов, представляет собой дескриптор, основанный на наборе из нескольких пар допустимых градиентных ориентаций. COHOG может выражать формы более подробно, чем HOG, который использует ориентацию с одним градиентом. Недостатком данного метода является повышенная вычислительная сложность по отношению к стандартному методу HOG.

Моментные инварианты Ху – хорошо известный подход в распознавании образов на цифровом изображении. Приведенный Ху набор характеристик включает семь инвариантов. Алгоритм [5] получения инвариантов содержит следующие этапы:

1. Определение центральных моментов порядка не выше третьего.
2. Получение моментов, инвариантных к операциям поворота, переноса и зеркального отображения [6].

3. Получение моментов, инвариантных к полной группе аффинных преобразований.

Как показано в работе Ху, могут быть построены инварианты относительно перемещения, масштаба и вращения. Следует заметить, что описанные Ху инварианты являются таковыми только в непрерывной области. В дискретной области ни масштабирование, ни вращение не определены четко: дискретное изображение, преобразованное таким образом, обычно является приближенным – это является основным недостатком описанного метода.

3. Информационная модель обнаружения объектов на изображении. Предлагаемый метод решения задачи обнаружения объекта на изображении комбинирует метод локализации объекта по цвету в цветовом пространстве HSV на этапе детектирования объекта с применением теории активного восприятия (ТАВ) [7, 8] на этапе формирования глобального признакового описания выделенного объекта. На этапе принятия решения о распознанном на изображении объекте применяется алгоритм поиска наименьшего евклидового расстояния между глобальным признаковым описанием обнаруженного объекта и базой эталонных признаковых описаний известных объектов в пространстве признаков.

В качестве распознаваемых объектов в данной работе будут использоваться дорожные знаки. Таким образом, база эталонов будет включать в себя непосредственно изображения самих дорожных знаков, а база данных анализируемых изображений будет сформирована из изображений, покадрово полученных с видеорегистратора, находящегося в салоне автомобиля. Системе будет необходимо проанализировать входное изображение, выделить на нем область, в которой присутствует дорожный знак, а затем – распознать, какой именно знак представлен на изображении.

3.1. Предварительная обработка изображения. Цель предварительной обработки изображения – избавление от шумов и сглаживание цветов на изображении. Данная операция позволяет значительно повысить точность на этапе локализации.

В первую очередь, к изображению применяется фильтр Гаусса, он позволяет избавиться от большинства шумов. Хотя это и приводит к некоторому размытию изображения, цветовые диапазоны сглаживаются и выравниваются.

Фильтр Гаусса – это фильтр размытия изображения, который использует нормальное распределение для вычисления преобразования, применяемого к каждому пикселю изображения. Нормальное распределение для двух измерений описывается формулой [9]:

$$G(u,v) = \frac{1}{2\pi r^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

где r – радиус размытия, σ – стандартное отклонение распределения Гаусса.

Данная формула задает поверхность, имеющую вид концентрических окружностей с нормальным распределением от центральной точки. Пиксели, где распределение отлично от нуля, используются для построения матрицы свертки, которая применяется к исходному изображению. Значение каждого пикселя становится средне взвешенным для окрестности. Исходное значение пикселя принимает наибольший вес (имеет наивысшее Гауссово значение), и соседние пиксели принимают меньшие веса, в зависимости от расстояния до них.

Параметры для фильтра Гаусса были подобраны эмпирически и представляют собой ядро размером 5 на 5 пикселей, применяемое к изображению в три последовательных прохода.

3.2. Детектирование объекта на изображении. Специфические условия освещённости значительно влияют на возможность корректного восприятия цвета объектов снимаемой сцены. При съёмке реальной дорожной ситуации на знаках возникает целый ряд различных условий освещения, сильно усложняющих детектирование объектов: прямые солнечные лучи, отражённый свет, затенения, свет автомобильных фар в тёмное время суток. Таким образом, на изображениях, получаемых с камеры, установленной в автомобиле, не всегда воз-

можно выделить интересующую область по цвету с помощью простого применения порогового фильтра напрямую в цветовом пространстве RGB (Red, Green and Blue). Для извлечения красного, синего и желтого цвета из входного изображения необходимо использовать информацию о цвете каждого пикселя независимо от его неконтролируемого показателя освещённости. Для этих целей было выбрано цветовое пространство HSV (Hue, Saturation and Value). Цветовое пространство HSV принадлежит к группе цветовых пространств, изначально основанных на человеческом восприятии цветов.

Таким образом, следующим этапом после предварительной обработки является наложение маски, фильтрующей заданный цветовой диапазон в HSV пространстве (синий, красный и желтый – основные цвета дорожных знаков). Однако, в большинстве случаев, наложение маски приведет не только к выделению синих, красных и желтых знаков на изображении, но также и к выделению других регионов изображения, содержащих цвета заданного цветового диапазона. Таким образом, необходимо снизить погрешность модуля локализации путем устранения нежелательных регионов, выделенных цветовой фильтрацией по заданной маске, но так, чтобы случайно не отсеять интересующие регионы изображения, содержащие дорожные знаки.

В настоящей работе с этой целью применяются морфологические операции над выделенными регионами. Наиболее подходящими морфологическими операциями являются операции дилатации и эрозии. Операция дилатации служит для увеличения, «наращивания» контура вокруг выделенного маской региона, а операция эрозии – напротив, служит для уменьшения, «сужения» контура вокруг выделенного маской региона. Таким образом, для устранения не интересующих регионов, первой применяется операция эрозии в два последовательных прохода, а затем – дилатация в четыре последовательных прохода.

Также на этапе локализации к изображению применялся алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера [10], позволяющий уменьшать число точек на кривой, которая аппроксимирована большей выборкой точек. Применение этого алгоритма позволяет фильтровать контуры по форме самих контуров. Таким образом, вначале задается ряд контуров, описывающих интересующие формы контуров, повторяющие формы дорожных знаков – круг, квадрат, треугольник. Затем, с помощью указанного алгоритма каждый из обнаруженных на изображении контуров аппроксимируется и проверяется на схожесть с одним из шаблонных контуров. Если наблюдается совпадение с одним из шаблонов, контур помечается как искомый и остается в выборке контуров, если совпадение ни с одним из шаблонов не наблюдается – контур удаляется из выборки контуров.

3.3. Формирование глобального признакового описания изображения с помощью теории активного восприятия. Исследуемое изображение представлено в виде функции яркости:

$$I(x, y), x \in X, y \in Y,$$

где X и Y – конечные множества. В результате применения к такому изображению U-преобразования вычисляется спектральное представление изображения:

$$D = \{d_i\}, i = \overline{1, M},$$

где M – число сегментов, на которые было разбито исследуемое изображение; d_i – спектральное представление сегмента i, включающее L спектральных коэффициентов (L – число фильтров, используемых на этапе дифференцирования); $d_i\{k\}$ – k-й спектральный коэффициент представления сегмента I.

Формирование исходного описания с позиции теории активного восприятия изображения понимается как операция интегрирования, и включает в себя два следующих этапа:

- нормирование изображения;
- вычисление матрицы «визуальных масс».

Нормирование изображения происходит путем вычитания из каждого элемента матрицы минимального элемента матрицы, а затем деления каждого элемента матрицы на максимальный элемент матрицы.

Для получения матрицы «визуальных масс» необходимо выполнить так называемое в теории активного восприятия, Q-преобразование.

Q-преобразование выполняется по формуле:

$$B_{kl} = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2} A_{kl}[i,j], k = \overline{1,4}, l = \overline{1,4}.$$

Формирование системы признаков с позиции теории активного восприятия изображения понимается как операция дифференцирования. Результатом операции дифференцирования является вектор «спектральных коэффициентов» $\mu = (\mu_0, \mu_1, \mu_2, ..., \mu_{15})$. Операция дифференцирования реализуется по средствам 16 фильтров (рисунок 2), применяемых к матрице визуальных масс, где темный элемент означает умножение исходного элемента матрицы визуальных масс на -1, светлый элемент – умножение исходного элемента матрицы визуальных масс на +1. Все полученные в результате применения фильтра к матрице значения суммируются между собой, а результирующая сумма называется спектральным коэффициентом.

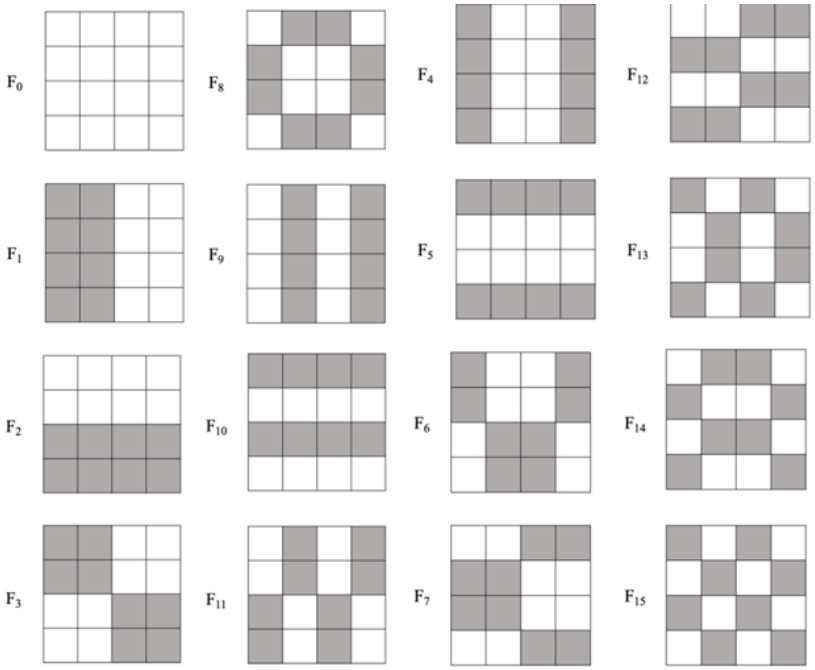


Рис. 2. Фильтры, использующиеся для вычисления U-преобразования

3.4. Принятие решения. Этап принятия решения заключается в получении соответствия между обнаруженным объектом и одним из эталонных объектов, известных системе. С этой целью в пространство признаков, полученное по глобальному признаковому описанию объектов-эталонов, вносится глобальное признаковое описание объекта, полученное после его обнаружения на изображении. Далее, необходимо вычислить ближайшее признаковое описание эталонного объекта к обнаруженному объекту. В качестве меры близости целесообразно использовать евклидово расстояние:

$$(p,q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \cdots + (p_n - q_n)^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n}(p_k - q_k)^2}.$$

В результате вычисления евклидова расстояния от глобального признакового описания обнаруженного объекта до глобального признакового описания каждого из эталонных объ-

ектов получается числовой вектор, минимальный элемент которого представляет собой искомое минимальное евклидово расстояние. Этот элемент указывает на эталонный объект, который оказался в признаковом пространстве ближе всего к обнаруженному объекту.

4. Вычислительный эксперимент. Для проведения эксперимента была сформирована база изображений объектов. Как было отмечено выше, в роли объектов выступают дорожные знаки. В базе содержатся изображения 156 различных дорожных знаков, в качестве которых взяты наиболее основные и часто встречающиеся в реальных дорожных условиях. Каждый объект в базе имеет четыре шаблона, которые используются непосредственно при обнаружении данного объекта на изображении. Каждый из шаблонов такого рода отличается погодными условиями и условиями освещения, при которых проведена съемка объекта.

Для проведения вычислительного эксперимента была использована Российская база изображений автодорожных знаков [11], известная так же, как Russian Traffic Sign Dataset (RTSD). Примеры кадров из этой базы представлены на рисунке 3. Данная база содержит:

- 179138 размеченных кадров с авторегистратора, содержащих дорожные знаки;
- 156 типов дорожных знаков;
- 104358 изображений знаков (полученных путем кадрирования).

Рис. 3. Примеры кадров из базы изображений RTSD

4.1. Постановка вычислительного эксперимента. Для проведения вычислительного эксперимента из базы RTSD случайным образом были отобраны 10000 изображений, сделанных в разное время суток, при разной погоде, в разные сезоны года.

Кроме того, для усложнения задачи и внесения дополнительной объективности в проведение эксперимента и апробацию предлагаемого подхода, были искусственно созданы две дополнительные выборки изображений на основе базы RTSD. Первая синтезированная выборка состоит из изображений, к которым дополнительно добавлен шум различной степени. Вторая выборка включает в себя изображения, дорожные знаки на которых повернуты под различными углами. Каждая из выборок включает в себя 10000 изображений. Таким образом, итоговые выборки для проведения вычислительного эксперимента сформированы следующим образом:

– Выборка изображений из базы RTSD;

– Выборка изображений из базы RTSD с добавлением шума различной интенсивности: ОСШ = 20дБ, 10дБ, 0дБ;

– Выборка изображений из базы RTSD с поворотом искомых объектов: Угол поворота = 15°, 30°, 45°.

Оценка точности работы системы проводилась следующим образом: в первую очередь, оценивалась точность результатов работы локализатора с различными параметрами, без дальнейшей классификации. Цель – выявление оптимального набора параметров локализатора, при котором точность локализации максимальна. Далее, проводилась оценка точности классификации по следующему принципу: к локализатору применился оптимальный набор параметров, оценка классификации выполнялась только при условии, что на этапе локализации не было допущено ошибок.

4.2. Анализ результатов вычислительного эксперимента. В таблицах, содержащих результаты работы локализатора, отражены варьируемые параметры, такие, как цветовой диапазон различных компонентов в пространстве HSV и количество итераций применения морфологический операций Erosion и Dilation к изображению, а также показатели точности локализации в процентах.

В таблице 1 приведены три варианта установки цветового диапазона для каждого из целевых цветов в цветовом пространстве HSV.

Таблица 1. Варианты установки границ цветового диапазона

Номер цветового диапазона	Синий цвет	Желтый цвет	Красный цвет
1 H	95-130	19-37	160-20
1 S	140-255	130-255	135-255
1 V	100-255	110-255	115-255
2 H	99-125	23-34	170-10
2 S	155-255	141-255	141-255
2 V	115-255	124-255	124-255
3 H	105-115	25-31	175-5
3 S	165-255	150-255	152-255
3 V	125-255	136-255	135-255

Для каждого из этих наборов проводился вычислительный эксперимент, в котором варьировалось количество итераций морфологических операций Erosion и Dilation.

В таблице 2 приведены результаты вычислительного эксперимента с локализатором, проведенного с изображениями из базы RTSD. В таблицу включены комбинации параметров, при которых итоговая точность локализации составляла не менее 70%.

Таблица 2. Результаты вычислительного эксперимента с локализатором для выборки из базы RTSD

Номер цветового диапазона	Итераций Erosion	Итераций Dilation	Точность
1	2	2	76.43%
1	3	4	79.64%
1	4	1	74.12%
2	3	4	89.78%
2	4	3	90.33%
2	4	2	94.71%
2	2	2	86.52%
3	2	3	83.46%
3	4	4	79.12%
3	3	4	81.83%

Из таблицы 2 видно, что наилучшей комбинацией параметров локализатора является второй (средний) цветовой диапазон из трех описанных выше, и следующие параметры ал-

горитмов применения морфологических операций – 4 итерации для Erosion, 2 итерации для Dilation.

Результаты вычислительного эксперимента с локализатором, проведенного с изображениями из базы RTSD с добавлением шума различной интенсивности, приведены в таблице 3. В таблицу включены комбинации параметров, при которых итоговая точность локализации составляла не менее 70%.

Как видно из таблицы 3, добавление искусственного шума к изображению ухудшает качество работы локализатора. С ростом значения отношения сигнала к шуму, точность локализации снижается. Однако, наилучший результат показывает второй (средний) цветовой диапазон с пятью итерациями Erode и тремя итерациями Dilate.

Результаты вычислительного эксперимента с локализатором, проведенного с изображениями из базы RTSD с поворотом искомых объектов, приведены в таблице 4. В таблицу включены комбинации параметров, при которых итоговая точность локализации составляла не менее 70%.

Таблица 3. Результаты вычислительного эксперимента с локализатором для выборки из базы RTSD с добавлением шума различной интенсивности

Номер цветового диапазона	Итераций Erosion	Итераций Dilation	Точность		
			ОСШ = 20дБ	ОСШ = 10дБ	ОСШ = 0дБ
1	4	2	90.11	85.21%	70.41%
2	2	2	89.81	86.52%	71.90%
2	5	3	91.26%	87.46%	72.91%
3	4	4	88.28%	81.12%	72.14%
3	3	4	87.92%	84.61%	70.76%

Как видно из таблицы 4, поворот изображения искомого объекта на любой из заданных углов никак не влияет на качество работы локализатора. Это обусловлено тем, что алгоритм локализации ориентируется только на цвет, а не на положение объекта в кадре. Стоит отметить, что результаты локализации с приведенными комбинациями параметров из таблицы 4 хорошо согласуются с результатами локализации из таблицы 2 – аналогичные наборы параметров выдают аналогичные результаты. Наилучший результат показывает второй (средний) цветовой диапазон с четырьмя итерациями Erode и двумя итерациями Dilate. Именно такой набор параметров локализатора был принят как оптимальный и использован в дальнейших вычислительных экспериментах с классификатором.

Таблица 4. Результаты вычислительного эксперимента с локализатором для выборки из базы RTSD с поворотом искомых объектов

Номер цветового диапазона	Итераций Erosion	Итераций Dilation	Точность		
			УП = 15°	УП = 30°	УП = 45°
2	4	3	90.33%	90.33%	90.33%
2	3	4	89.78%	89.78%	89.78%
2	4	2	94.71%	94.71%	94.71%
1	3	4	79.64%	79.64%	79.64%
3	2	3	83.46%	83.46%	83.46%

В таблицах, содержащих результаты работы классификатора, отражены показатели точности в процентах, уровень накладываемого шума в децибелах, угол поворота изображения объекта в градусах, а также отражено наличие либо отсутствие экспериментальной функциональности во время проведения эксперимента – АРДП (алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера).

Результаты вычислительного эксперимента с классификатором, проведенного с изображениями из базы RTSD, приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты вычислительного эксперимента с классификатором для выборки из базы RTSD

АРДП	Точность
Да	98.53%
Нет	96.07%

Как видно из таблицы 5, применение алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера увеличивает точность результатов.

Результаты вычислительного эксперимента с классификатором, проведенного с изображениями из базы RTSD с добавлением шума различной интенсивности, приведены в таблице 6. Как видно из этой таблицы, с увеличением интенсивности накладываемого шума, снижается точность распознавания. При этом корреляция между результатами работы системы с включенным и выключенным АРДП остается такой же, как и в эксперименте, проводимом на изображениях без шума.

Таблица 6. Результаты вычислительного эксперимента с классификатором для выборки из базы RTSD с добавлением шума различной интенсивности

АРДП	ОСШ	Точность
Да	20 дБ	91.67%
Да	10 дБ	87.32%
Да	0 дБ	81.12%
Нет	20 дБ	89.71%
Нет	10 дБ	84.59%
Нет	0 дБ	78.97%

Результаты вычислительного эксперимента с классификатором, проведенного с изображениями из базы RTSD с поворотом искомых объектов, приведены в таблице 7.

Таблица 7. Результаты вычислительного эксперимента с классификатором для выборки из базы RTSD с поворотом искомых объектов

АРДП	УП	Точность
Да	15°	97.87%
Да	30°	97.34%
Да	45°	96.91%
Нет	15°	95.17%
Нет	30°	94.76%
Нет	45°	94.23%

Как видно из таблицы 7, наличие угла поворота вплоть до 45° не оказывает существенного влияния на точность распознавания. Это говорит о том, что глобальное признаковое описание на основе теории активного восприятия является инвариантным и к масштабу, и к повороту объекта.

Пример работы локализатора и классификатора представлен на рисунке 4. Розовым прямоугольником отмечена область, обнаруженная локализатором, результат работы классификатора представлен в дополнительном окне.

Рис. 4. Результат работы локализатора и классификатора

В таблице 8 представлены результаты работы известных методов локализации объектов на изображении. Сравнивая данные из таблицы 8 и полученные результаты тестирования алгоритма в различных условиях, можно сделать вывод о том, что разработанный метод имеет точность обнаружения объектов на изображении, сопоставимую с точностью рассмотренных известных методов, а в ряде случаев точность предложенного подхода оказывается выше. Также стоит отметить ряд преимуществ разработанного метода.

Во-первых, U-преобразование имеет минимально возможную вычислительную сложность, в отличие от стандартных преобразований, требующих реализации свертки, а на уровне весовых коэффициентов – операции арифметического умножения.

Во-вторых, описанные в пункте 2.3 преобразования – это операции с целыми числами, и поэтому исчезает проблема накопления ошибки при округлениях.

В-третьих, за счёт применения U-преобразования к изображению дорожного знака целиком, учитываются только низкочастотные компоненты изображения. В этом случае детали мелки, а шумы и помехи исчезают.

Таблица 8. Точность работы известных методов обнаружения объектов

Метод	Точность
GIST	93-96%
HOG	89-94%
CoHOG	95-98%
Моменты Ху	94-98%

Заключение. Был разработан алгоритм решения задачи поиска объекта на изображении, который заключается в новой комбинации подходов для решения задачи на разных ее этапах, а также использовании нового способа формирования глобального признакового описания на этапе формирования признакового описания. В данной работе таким подходом является использование инструментария теории активного восприятия.

При анализе результатов тестирования были выбраны параметры, дающие наибольшую точность работы системы. Полученная точность, порядка 94-96%, при сравнении с точностью существующих методов показала, что разработанный метод работает аналогично известным методам. Кроме того, включая дополнительную функциональность в виде алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера, предоставляется возможным повысить точность распознавания на 3-5%.

Список источников

1. Oliva A., Torralba A. Modeling the shape of the scene: A holistic representation of the spatial envelope. Int. J. Comput. Vis., 2001, vol. 42, no. 3, pp. 145-175.

2. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. In CVPR, 2005.
3. Watanabe T., Ito S., Yokoi K. "Co-occurrence histograms of oriented gradients for pedestrian detection". PSIVT, 2009.
4. Hu M.K. Visual Pattern recognition by moment invariants, IRE trans. Info. Theory, 1962, vol. IT-8, pp.179-187.
5. Абрамов Н.С. Определение расстояний на основе системы технического зрения и метода инвариантных моментов / Н.С. Абрамов, В.П. Фраленко // Информационные технологии и вычислительные системы, 2012. − № 4. − С. 32-39.
6. Роджерс Д. Математические основы машинной графики / Д. Роджерс, Дж. Адамс // М.: Машиностроение, 1980. − 240 с.
7. Утробин В. А. Элементы теории активного восприятия изображений / В. А. Утробин // НГТУ, 2001. – 64 с.
8. Kondratiev V.V., Zhevnerchuk D.V. Application of methods of self-organization theory to problems of profiling and configuring computational systems. Doklady Mathematics, Pleiades Publishing, Ltd., 2014, vol. 90, no. 3, pp. 788-190, ISSN 1064-5624.
9. Haddad R.A., Akansu A.N. A class of fast gaussian binomial filters for speech and image processing. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1991, vol. 39, pp 723-727.
10. Ramer Urs. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. Computer graphics and image processing, 1972, no. 1(3), pp. 244-256, DOI: 10.1016/S0146-664X(72)80017-0.
11. Шахуро В. Российская база изображений автодорожных знаков / В. Шахуро, А. Конушин // Компьютерная оптика, 2016.

Гай Василий Евгеньевич. *Инженер, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, AutorID: 531326, ORCID: 0000-0002-3644-5234, iamuser@inbox.ru, Россия, Нижний Новгород, ш. Казанское, 21, 170.*

Смирнов Александр Вадимович. *Магистр кафедры Вычислительные системы и технологии, старший инженер по разработке графических систем А/О Интел АО, ORCID: 0000-0002-4852-8184, mrroman152@gmail.com, Россия, Нижний Новгород, ш. Казанское, 21, 170.*

Баринов Роман Олегович. *Магистр кафедры Вычислительные системы и технологии, ИРИТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, инженер ООО «СКБ «Связь и локация»», ORCID: 0000-0002-0269-3205, barinovr@list.ru, Россия, Нижний Новгород, ш. Казанское, 21, 170.*

Поляков Игорь Владимирович. *Ассистент, аспирант кафедры Вычислительные системы и технологии, ИРИТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, AuthorID: 879102, ORCID: 0000-0002-1492-9350, polyakovigor92@gmail.com, Россия, Нижний Новгород, ш. Казанское, 21, 170.*

Голубенко Владимир Андреевич. *Магистр кафедры Вычислительные системы и технологии, ИРИТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, практикант-разработчик ПО А/О Интел АО, ORCID: 0000-0002-4683-3249, fullmoonshrine@gmail.com, Россия, Нижний Новгород, ш. Казанское, 21, 170.*

Кузнецов Георгий Дмитриевич. *Магистр кафедры Вычислительные системы и технологии, ИРИТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, инженер ООО «СКБ «Связь и локация»», ORCID: 0000-0001-5564-045X, gd.smith@yandex.ru, Россия, Нижний Новгород, ш. Казанское, 21, 170.*

UDC 004.932.72

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.016

Object recognition system using theory of active perception

Vasily E. Gai, Alexander V. Smirnov, Roman O. Barinov, Igor V. Polyakov, Vladimir A. Golubenko, Georgy D. Kuznetsov

Nizhny Novgorod State Technical University,

Russia, Nizhny Novgorod, *barinovr@list.ru*

Abstract. In this paper we propose a method for detecting an object in an image based on a global feature description. An information model is described and implementation options for each of the stages of the image object detection task are proposed. For the image preprocessing stage, the available options, including normalization, calculation of brightness function and application of Gaussian filter are given. The stage of forming a global feature description of an object is based on active perception theory (U-transformation). Object localization is performed based on the minimum Euclidean distance from the detected object to the reference objects from the database. Images from the Russian Traffic Sign Dataset database and their modified copies (images with superimposed noise, images with rotation of the objects searched for) were used for testing. When

analyzing the test results, the parameters that give the highest accuracy for the proposed method of object detection in the image have been selected. In the presence of noise in the image, the localization accuracy of the proposed method was more than 70%. The proposed image object detection method is robust to rotation of the objects being searched. The resulting accuracy of about 94-96%, when compared with the accuracy of existing methods, showed that under normal conditions the developed method works similarly to existing methods.

Keywords: image processing, object detection, theory of active perception

References

1. Oliva A., Torralba A. Modeling the shape of the scene: A holistic representation of the spatial envelope, Int. J. Comput. Vis., 2001, vol. 42, no. 3, pp. 145-175.
2. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. In CVPR, 2005.
3. Watanabe T., Ito S., Yokoi K. "Co-occurrence histograms of oriented gradients for pedestrian detection". PSIVT, 2009.
4. Hu M.K. Visual Pattern recognition by moment invariants, IRE trans. Info. Theory, 1962, vol. IT-8, pp.179–187.
5. Abramov N.S., Fralenko V.P. Opredeleniye rasstoyaniy na osnove sistemy tekhnicheskogo zreniya i metoda invariantnykh momentov [Determination of distances based on the technical vision system and the method of invariant moments]. Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy [Information technologies and computational systems], 2012, no. 4, pp. 32-39.
6. Rodzhers D., Adams Dzh., Matematicheskiye osnovy mashinnoy grafiki [Mathematical Foundations of Computer Graphics]. M.: Mashinostroyeniye [Mechanical engineering], 1980, 240 c.
7. Utrobin V. A. Elementy teorii aktivnogo vospriyatiya izobrazheniy [Elements of the theory of active image perception]. Izvestiya Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University], 2001, 64 p.
8. Kondratiev V.V., Zhevnerchuk D.V. Application of methods of self-organization theory to problems of profiling and configuring computational systems. Doklady Mathematics, Pleiades Publishing, Ltd., 2014, vol. 90, no. 3, pp. 788-190, ISSN 1064-5624.
9. Haddad R.A., Akansu A.N. A class of fast gaussian binomial filters for speech and image processing. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1991, vol. 39, pp 723-727.
10. Ramer Urs. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. Computer graphics and image processing, 1972, no. 1(3), pp. 244-256, DOI: 10.1016/S0146-664X(72)80017-0.
11. Shakhuro V., Konushin A. Rossiyskaya baza izobrazheniy avtodorozhnykh znakov [Russian database of images of road signs]. Komp'yuternaya optika [Computer Optics], 2016.

Vasily Evgenievich Gai. *Engineer, Associate Professor, NSTU, AuthorID: 531326, ORCID: 0000-0002-3644-5234, iamuser@inbox.ru, Russia, Nizhny Novgorod, sh. Kazanskoe, 21, 170.*

Alexander Vadimovich Smirnov. *Master of the Department of Computing Systems and Technologies, Senior Engineer for the Development of Graphic Systems of A/O Intel JSC, ORCID: 0000-0002-4852-8184, mrroman152@gmail.com, Russia, Nizhny Novgorod, sh. Kazanskoe, 21, 170.*

Roman Olegovich Barinov. *Master of the Department of Computing Systems and Technologies, IRIT, NSTU, engineer of SKB Svyaz and Location LLC, ORCID: 0000-0002-0269-3205, barinovr@list.ru, Russia, Nizhny Novgorod, sh. Kazanskoe, 21, 170.*

Igor Vladimirovich Polyakov. *Assistant, postgraduate student of the Department of Computing Systems and Technologies, IRIT, NSTU, AuthorID: 879102, ORCID: 0000-0002-1492-9350, polyakovigor92@gmail.com, Russia, Nizhny Novgorod, sh. Kazanskoe, 21, 170.*

Vladimir Andreevich Golubenko. *Master of the Department of Computing Systems and Technologies, IRIT, NSTU, Intern-Software Developer at JSC Intel JSC, ORCID: 0000-0002-4683-3249, fullmoonshrine@gmail.com, Russia, Nizhny Novgorod, sh. Kazanskoe, 21, 170.*

Georgy Dmitrievich Kuznetsov. *Master of the Department of Computing Systems and Technologies, IRIT, NSTU, engineer of SKB Svyaz and Location LLC, ORCID: 0000-0001-5564-045X, gd.smith@yandex.ru, Russia, Nizhny Novgorod, sh. Kazanskoe, 21, 170.*

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 07/14/2022; approved after reviewing 09/14/2022; accepted for publication 09/19/2022.

УДК 004.82
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.017

Метод поиска и логического вывода экспертной информации в ориентированном циклическом мультиграфе знаний

Зайцев Анатолий Федорович
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
Россия, Улан-Удэ, *lordsadler2010@mail.ru*

Аннотация. В настоящее время многие современные задачи прикладной математики и информатики решаются с применением теории графов. В виде графов можно представлять и описывать различные сложные системы, например, нейросети или базы знаний. Наиболее часто встречающимися задачами с применением теории графов являются: поиск кратчайшего пути, определение максимального потока в сети, поиск минимальных остовных деревьев и другие. В то же время, существует достаточно много нерешенных проблем. Актуальность работы вызвана повышением интереса к областям искусственного интеллекта и инженерии знаний, методы которых заключаются в возможности трансформации полученных предметных моделей в логико-математические, в виде компьютерных программ, осуществляющих компьютерное или имитационные моделирование исследуемых систем. В представленной работе описан процесс разработки специального математического и алгоритмического обеспечения для систем анализа и обработки экспертной информации с целью автоматизированного поиска, и синтеза решений задач моделирования и идентификации динамических систем. Сформулирована проблема поиска и логического вывода синтезированных решений задач на графах знаний. Представлена модель базы знаний выбранной предметной области в виде мультиграфа знаний, а также новый модифицированный метод поиска и логического вывода решений задач, с их программной реализацией на языке программирования Python. Представленный метод поиска слабосвязанных подграфов и синтеза решений задач реализован с применением теоретико-множественного анализа, а также элементов теории графов. Для демонстрации работоспособности метода приводится его реализация в виде алгоритма на языке программирования Python и результаты вычислительных экспериментов. Новизна и практическая значимость работы заключаются в том, что предложенный метод и алгоритмы могут быть использованы при практической реализации баз знаний, механизмов логического вывода и обработки экспертной информации в различного рода экспертных, расчетно-логических и гибридных интеллектуальных системах, замещающих собой зарубежные аналоги.

Ключевые слова: системный анализ, логический вывод, поиск на графах, мультиграф, экспертная система, база знаний, граф знаний, Python

Цитирование: Зайцев А.Ф. Метод поиска и логического вывода экспертной информации в ориентированном циклическом мультиграфе знаний / А.Ф. Зайцев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 213-222. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.017.

Введение. В представленной работе описан процесс разработки специального математического и алгоритмического обеспечения для систем анализа и обработки информации с целью автоматизированного поиска и синтеза решений задач моделирования и идентификации динамических систем. Подобные экспертные системы должны содержать базу знаний о некоторой предметной области, а также метод логического вывода и обработки экспертной информации.

В качестве предметной области для базы знаний выбрана область механики, в рамках которой может быть выполнено решение множества различных задач. В качестве математической основы для базы знаний используется описание понятий и величин из области механики, представленное в виде формальной грамматики [1, 2]. Базу знаний в определенный момент можно пополнять, внося новые правила и функции. Чем больше правил содержится в базе, тем больший круг задач она способна решить в рамках выбранной предметной области. В представленной работе база знаний трансформируется и представляется в виде ориентированного, невзвешенного, циклического мультиграфа знаний. Графы знаний отличаются от классических графов тем, что они, как правило представляют собой направленные мульти-

графы с типизированными ребрами. Подробнее о графах знаний можно узнать в работах [3-6].

В работе рассматривается проблема поиска и логического вывода синтезированных решений задач на графе знаний. Известно, что для задач поиска остовных деревьев для неориентированных взвешенных графов существуют алгоритмы Прима, Крускала и Борувки [7, 8]. Также существует задача нахождения строго минимального остовного дерева Штейнера [9, 10]. Для нахождения слабосвязанных подграфов в неориентированных взвешенных графах, с положительным или отрицательным весом ребер применяется алгоритм Флойда–Уоршелла и его модификации [7]. Данные методы и их алгоритмы не подходят для решения рассматриваемой проблемы, так как её отличие заключается в ориентированности, невзвешенности и цикличности исходного мультиграфа знаний, а также в том, что правильный найденный подграф (или дерево), представляющий собой решение, может быть как строго, так и нестрого минимальным. Проблема поиска и логического вывода синтезированных решений задач на графах знаний – является NP-трудной.

В представленной работе предложен новый модифицированный метод поиска и логического вывода синтезированных решений задач на графе знаний, с его программной реализацией на языке программирования Python. Предложенный метод решения рассматриваемой проблемы и его алгоритм могут быть использованы при реализации механизмов логического вывода в различных экспертных, расчетно-логических и гибридных интеллектуальных системах.

1. Цель исследования. Целью исследования является решение проблемы поиска и логического вывода синтезированных решений задач в ориентированном, невзвешенном, циклическом мультиграфе знаний. Полученные решения должны представлять собой ациклические слабосвязанные подграфы (или деревья), состоящие из определенных подмножеств указанных известных (терминальных) вершин, а также некоторых неизвестных (нетерминальных) вершин, соединяющих между собой известные.

2. Материалы и методы исследования. В качестве материалов исследования используются: компьютеры и инструментальные средства программного обеспечения, язык программирования Python.

В процессе исследования задействованы следующие методы: анализ, синтез, формализация, моделирование, алгоритмизация, вычислительный эксперимент, элементы теории множеств и теории графов.

3. Формальное описание базы знаний. Имеется исходная формальная модель базы знаний (KB), описанная следующей грамматикой:

$$KB = \{Vt, Vn, P, S, F\},$$

где Vt – множество терминальных символов, обозначающих изначально известные величины, используемые в процессе поиска решения какой-либо задачи; Vn – множество нетерминальных символов, обозначающих неизвестные величины в решаемой задаче; P – множество правил вывода:

$$\{\ Spd2 \to Spd1, Accl, Time; \qquad Spd2 \to Accl, Dist, Spd1;$$
$$Spd2 \to KinEn2, Mass; \qquad Spd1 \to Spd2, Accl, Time;$$
$$Spd1 \to Dist1, Time, Accl; \qquad Spd1 \to Spd2, Accl, Dist;$$
$$Spd1 \to KinEn1, Mass; \qquad Dist \to Spd1, Time, Accl, Time;$$
$$Dist \to Spd2, Spd1, Accl; \qquad Dist \to OpPull, FrPull;$$
$$Dist \to OpFric, FrFric; \qquad Time \to Spd2, Spd1, Accl;$$
$$Time \to Spd1, Accl, Dist; \qquad Accl \to Spd2, Spd1, Time;$$
$$Accl \to Dist, Spd1, Time; \qquad Accl \to Spd2, Spd1, Dist;$$
$$Accl \to FrPull, FrFric, Mass; \qquad Mass \to FrPull, FrFric, Accl;$$
$$Mass \to FrFric, CfFric, Accl; \qquad Mass \to KinEn2, Spd2;$$
$$Mass \to KinEn1, Spd1; \qquad FrPull \to FrFric, Mass, Accl;$$

$FrPull \rightarrow OpPill, Dist;$ $FrFric \rightarrow FrPull, Mass, Accl;$
$FrFric \rightarrow Cfg, CfFric, Mass;$ $FrFric \rightarrow OpFric, Dist;$
$CfFric \rightarrow FrFric, Mass, Cfg;$ $KinEn2 \rightarrow Mass, Spd2;$
$KinEn2 \rightarrow OpPull, OpFric, KinEn1;$ $KinEn1 \rightarrow Mass, Spd1;$
$KinEn1 \rightarrow KinEn2, OpPull, OpFric;$ $OpPull \rightarrow FrPull, Dist;$
$OpPull \rightarrow KinEn2, KinEn1OpFric;$ $OpFric \rightarrow FrFric, Dist;$
$OpFric \rightarrow OpPull, KinEn2, KinEn1; \};$

S – нетерминальный символ из множества Vn, означающий то, что нужно найти в процессе решения; F – множество функций, ассоциативно связанных с подмножествами правил вывода P, необходимых для синтеза математических выражений и вывода решений задач. Множество правил вывода P фактически включает в себя полный алфавит всех используемых символов.

Обозначения символов алфавита грамматики следующие: «*Dist*» – расстояние; «*Time*» – время; «*Spdl*» – начальная скорость; «*Spd2*» – конечная скорость; «*Accl*» – ускорение; «*Mass*» – масса; «*kinEnl*» – начальная кинетическая энергия; «*kinEn2*» – конечная кинетическая энергия; «*FrPull*» – сила тяги; «*FrFric*» – сила трения; «*OpPull*» – работа силы тяги; «*OpFric*» – работа силы трения; «*CfFric*» – коэффициент трения; «*Cfg*» – ускорение свободного падения.

Так как правила грамматики имеют строго заданную направленную последовательность вывода, то множество правил вывода P можно преобразовать в направленный (ориентированный) мультиграф, представив его в виде списков смежности. В таком случае, например, правило «*Spd2 → Spd1, Accl, Time*» будет означать то, что из вершины «*Spd2*» исходят связанные с ней вершины: «*Spd1*», «*Accl*» и «*Time*».

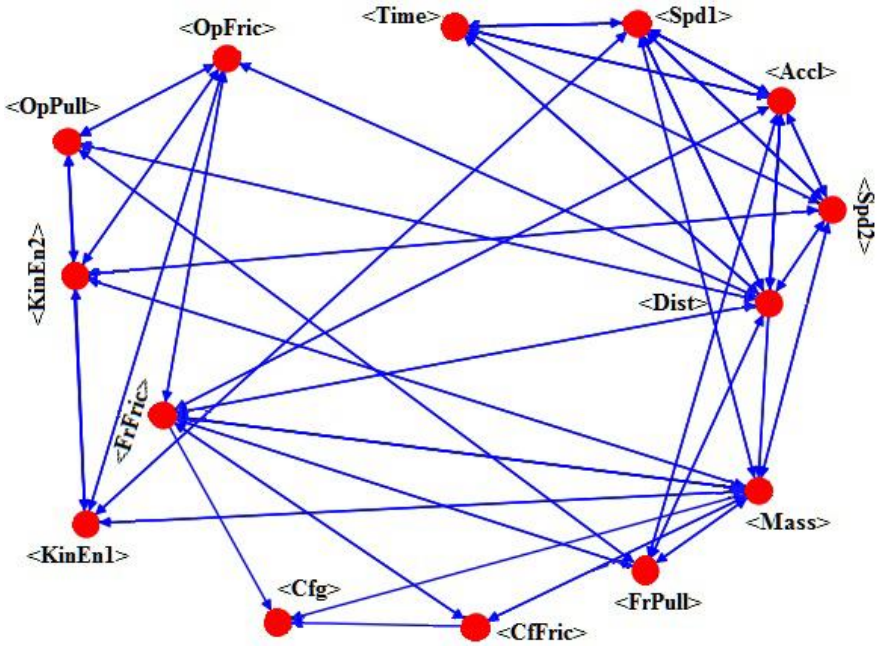


Рис. 1. Ориентированный циклический мультиграф знаний

Используя данный принцип, после преобразования всех правил получим мультиграф знаний $G(V, E)$, в котором V – множество всех вершин, символически описывающих понятия и величины выбранной предметной области, а E – множество связей между вершинами и подмножествами других вершин, сформированных на основе преобразования из правил вывода P. Мультиграф знаний $G(V, E)$ изображен на рисунке 1.

Модифицированную формальную модель базы знаний (KB), можно представить следующем образом:

$$KB = \{Vt, G(V, E), S, F\}$$

Теперь, в мультиграфе знаний $G(V,E)$, описывающем понятия из области механики, можно будет выполнять поиск и синтез решений задач. Рассмотрим вышеизложенное на примере решения конкретной задачи. Пусть в решаемой задаче дано: расстояние «*Dist*», начальная кинетическая энергия «*KinEn1*», конечная кинетическая энергия «*KinEn2*», сила тяги «*FrPull*». При этом требуется найти силу сопротивления «*FrFric*». Из данной постановки задачи становятся известны пять величин, которые являются некоторым подмножеством множества всех вершин V, мультиграфа G.

Известно, что для решения представленной в качестве примера задачи сначала необходимо найти работу силы тяги «*OpPull*», умножив силу тяги «*FrPull*» на расстояние «*Dist*», а затем вычислить работу силы сопротивления «*OpFric*» равную: «*OpPull*» – «*KinEn2*» + «*KinEn1*». После этих действий можно будет найти силу сопротивления «*FrFric*», разделив работу силы сопротивления «*OpFric*» на расстояние «*Dist*». Из этого следует, что необходимый подграф, кроме заданных пяти величин, должен включать в себя еще и две ранее неизвестные величины: силу тяги «*OpPull*» и силу сопротивления «*OpFric*».

Формально, синтез решения данной задачи будет представлять собой поиск в мультиграфе знаний $G(V,E)$ такого ациклического слабосвязанного подграфа, который должен содержать в себе подмножество указанных известных (терминальных) вершин, а также подмножество некоторых неизвестных (нетерминальных) вершин, соединяющих между собой известные.

Если такой подграф будет найден, то это будет означать, что задача имеет решение. В противном случае задача будет считаться не имеющей решения. В итоге, найденный слабосвязный подграф, представляющий собой решение задачи, будет иметь вид (рисунок 2).

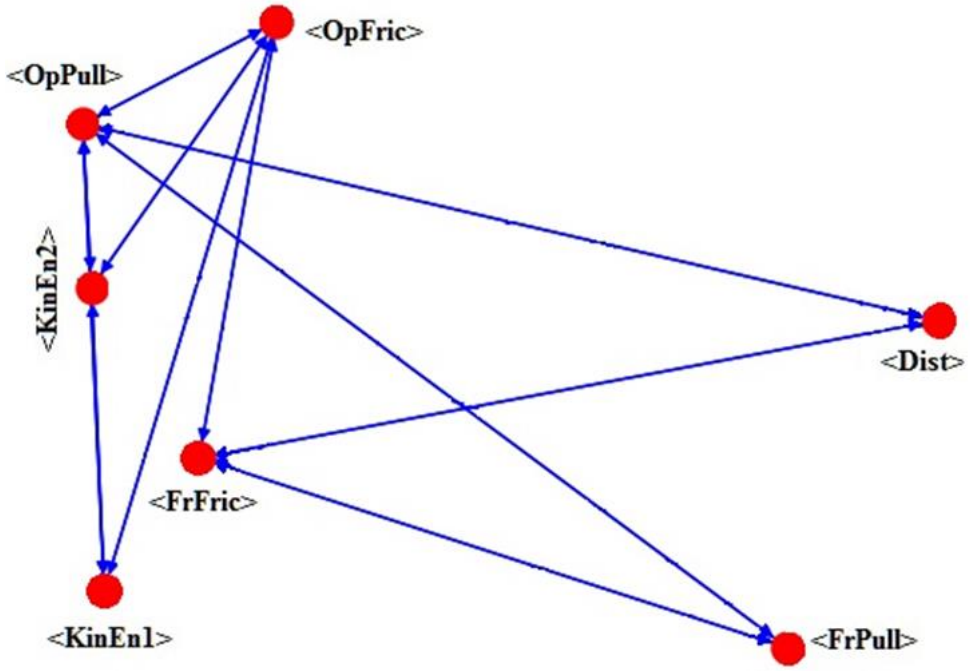


Рис. 2. Пример слабо-связного подграфа

Проанализировав полученный слабо-связный подграф, можно отметить, что между всеми объединенными его вершинами имеются двунаправленные связи, а между найденными ранее неизвестными (нетерминальными) вершинами существует некоторая последовательность (путь).

Таким образом, можно предположить, что синтез правильного решения рассматриваемой задачи будет представлять собой строгую последовательность (путь), состоящую из нетерминальных вершин, которая обязательно должна начинаться с вершины, обозначенной в задаче как то, что требуется найти. В приведенном примере такой вершиной является

«*FrFric*» и правильной последовательностью будет считаться: «*FrFric*» → «*OpFric*» → «*OpPull*».

4. Формальное описание метода. Имеется ориентированный, невзвешенный, циклический мультиграф знаний $G(V,E)$, представленный в виде списков смежности. Предлагается следующий метод поиска в нем нужного слабо-связного подграфа, представляющего собой решение некоторой задачи.

На первом этапе необходимо избавиться от некоторого количества циклов в исходном графе. Для этого необходимо удалить из графа однонаправленные исходящие связи от терминальных вершин Vt, которые становятся известны из постановки задачи. Это можно сделать путём удаления терминальных вершин Vt из множества всех вершин V графа $G(V,E)$, используя операцию разности множеств:

$$G = \{\, V = (V \backslash Vt), E \,\} \tag{1}$$

На следующем этапе для каждой вершины, начиная с вершины-аксиомы, выполняется циклический обход графа, в процессе которого осуществляется проверка наличия связей всех найденных нетерминальных вершин с терминальными. На каждой итерации обхода будет доступен постоянно пополняющийся список всех посещенных терминальных и нетерминальных вершин *VR*, а также осуществляются дополнительные проверки на присутствие в нем вершины-аксиомы, чтобы избежать бесконечно повторяющегося обхода.

$$VR = \left\{\left\{U_{i=1}^{n} G(V,E)_i\,, \{G(E)_i\}, \{S\}, \{i\}\right\} | G(V)_i = S\right\}, \tag{2}$$

где i – индекс выбранной вершины с подмножествами ее связей, n – кол-во всех вершин в графе.

После первого обхода и заполнения списка *VR*, циклический обход повторяется еще n раз, но уже по списку *VR*. На данном этапе вновь проверяются связи всех найденных подмножеств нетерминальных вершин с терминальными и пропускаются ранее посещенные вершины.

$$VR = \left\{VR_{[i][1]} = \cup_{j=1}^{n}(Item_j = \cup_{i=1}^{n} VR_{[i][1]})_j | Item_j \notin Vt, Item_j \in G(V), Item_j \notin VR_{[i][2]}\right\},$$

$$VR = \left\{\cup_{k=1}^{n} G(\cup_{j=1}^{n}(Item_j = \cup_{i=1}^{n} VR_{[i][1]})_k, E), \{G(E)_k\}, \{Item_j\}, \{j\} | G(V)_k = Item_j\right\}, \tag{3}$$

где i, j, k – индексы выбранных связанных вершин, $Item_j$ – j-я выбранная вершина из подмножеств связей, удовлетворяющая заданным условиям, n – кол-во всех вершин.

На последнем этапе происходит операция вычисления разницы между множеством известных терминальных вершин Vt и множеством элементов из списка всех посещенных терминальных и нетерминальных вершин *VR*. Если все терминальные вершины будут обнаружены в списке посещенных вершин, то осуществляется переход к выводу правильной последовательности (пути) из нетерминальных вершин и синтеза решения задачи.

Стоит отметить, что обход графа может быть выполнен не полностью и может завершиться раньше, как только будут найдены связи обнаруженных нетерминальных вершин со всеми терминальными вершинами. Обход графа завершается успешно при условии, если были найдены связи со всеми терминальными вершинами. Если в процессе полного обхода не будут найдены связи со всеми терминальными вершинами, то процесс поиска завершается, а задача помечается как не имеющая решения.

5. Реализация метода в виде алгоритма. Для реализации алгоритма был выбран язык программирования Python [11]. Данный язык довольно популярен в настоящее время и часто используется для разработки различных алгоритмов, за счет простого и краткого синтаксиса, а также наличия всех необходимых структур обработки данных. Для представления графа в виде списков смежности в языке Python была использована структура данных «OrderedDict» из стандартного модуля «collections».

Структура «OrderedDict» представляет собой упорядоченный словарь множества пар, вида: «ключ ↦ значение». В качестве ключа в такой структуре можно задавать вершины графа, а в качестве значений – связанные с ними множества вершин. Подобные структуры также называют ассоциативными массивами или хеш-таблицами [7]. В основе реализации таких структур применяются методы хеширования, которые используются для более быстрого поиска элементов в массиве.

Графы могут быть очень большого размера, с миллиардами вершин. Процесс поиска каких-либо вершин в графах с подобной размерностью может стать очень медленным. В то же время при использовании хеширования, если сохранить информацию по уже известному вычисленному хеш-ключу (индексу), то в будущем можно будет всегда находить её за наименьшее (константное) время. Данные хранятся с использованием пар: «ключ ↦ значение». Каждому значению присваивается уникальный хеш-ключ (индекс), который вычисляется с помощью некоторой хеш-функции (f). Имя ключа (k) преобразуется в целое число (h) и используется в будущем для доступа к связанному с ним значению. Например: $h = f(k)$, где k – имя ключа, h – целое число (хеш-ключ), а f – некоторая хеш-функция.

Хеш-функция осуществляет отображение $k \mapsto h$, по некоторому закону. Например, ключ строки с названием «*FrFric*» может быть преобразован к её численному значению путем суммирования числовых кодов каждого символа и деления по модулю на какое-либо число:

$$h = (971 + 982 + 993 + 1004 + 1015 + 1026) \% 2069$$

В различных языках программирования алгоритмы хеширования реализованы поразному для большей эффективности и избежания коллизий данных. В языке Python хеширование реализовано с использованием связных и двусвязных списков для дополнительного хранения порядка вставленных элементов.

Ниже приведен фрагмент кода, иллюстрирующий пример работы со структурой «OrderedDict» (листинг 1).

Листинг 1. Пример кода, использующего структуру «OrderedDict»

```
##
  G = OrderedDict()
  G['<FrFric>'] = [['f1','<FrPull>','<Mass>','<Accl>'],
  ['f12','<OpFric>', '<Dist>'],
  ['f3','<Cfg>','<CfFric>','<Mass>']]
  …
##
```

Приведенный пример показывает, что с вершиной «*FrFric*» связаны вершины «*FrPull*», «*Mass*», «*Accl*», «*Cfg*», «*CfFric*» и «*Mass*». Для удобства обработки информации, в дополнение к множествам, содержащим вершины графа, добавлены названия функций, принимающих данные элементы множеств, как аргументы для осуществления в последующем различных вычислений. Заданные функции, например, *f12,* также хранятся в базе знаний и описываются в виде лямбда-функций: *f12 = lambda x,y: (x / y)*. Где x, y – аргументы лямбда-функции.

После заполнения базы знаний необходимой информацией и добавления всех необходимых функций для вычислений можно начинать работу с системой. Сам алгоритм поиска подграфа реализован в виде одной основной функции с именем «dfa», а также двух вспомогательных функций: «inputs» – для ввода информации и «buid» – для синтеза математических выражений и выполнения дальнейших вычислений. Ниже приведен фрагмент кода, реализующий ввод данных (листинг 2).

Листинг 2. Пример кода функции, реализующей ввод данных

```
##
  def inputs():
  S = input("Введите аксиому::")
  print("\r\n Введите данные в формате::
  {'<Accl>':0.3,'<Time>':20,'<Spd1>':4}")
  D = eval(input())
  VT = list(D.keys())
##
```

Для ввода информации необходимо использовать определенный формат:

```
{'<Accl>':0.3,'<Time>':20,'<Spd1>':4}
```

Он состоит из формальных названий терминальных вершин и принадлежащих им фактических числовых значений, взятых из постановки исходной задачи. Такой формат ввода был выбран не случайно, так как он чаще всего используется при передаче информации в сети Интернет между различными веб-сервисами.

Функция синтеза математических моделей работает в два этапа. В начале строится символьное представление модели, которое составляется из подмножеств вершин графа, заключаемых в скобки, в соответствии с определенным порядком. Затем вместо символьных обозначений вершин подставляются введенные фактические (численные) значения. Порядок подвыражений определяется в процессе поиска подграфа на этапе обхода вершин графа G. Для подробного ознакомления блок-схема работы основного алгоритма поиска подграфа доступна в виде электронного ресурса в сети Интернет [12].

6. Вычислительный эксперимент и результаты исследования. Проведем вычислительный эксперимент, подтверждающий работоспособность программной реализации описанного выше метода. Для этого решается задача из пособия под авторством Голубевой О.В. – «… За какое время автомобиль, двигаясь с ускорением 0,4 м/с^2, увеличит свою скорость с 12 до 20 м/с ? …» [13].

Для запуска программы на языке Python использован стандартный, официальный интерпретатор – CPython. Это бесплатный программный инструмент, исходный код которого доступен для изучения и загрузки на сайте GitHub [14]. В качестве операционной системы используется Windows 10.

Запуск программы осуществляется путем вызова интерпретатора и передачи ему файла с кодом программы через утилиту командной строки (cmd.exe). Далее запущенная программа просит ввести исходные данные по решаемой задаче: аксиому и известные величины в необходимом формате. Листинг 3 отображает процесс запуска и ввода данных в программу.

Листинг 3. Процесс запуска и ввода данных в программу

```
>
>python spF.py
>
Введите аксиому::
<Time>
Введите данные в формате:: {'<Accl>':0.3,'<Time>':20,'<Spd1>':4}
{'<Accl>':0.4,'<Spd1>':12,'<Spd2>':20}
>
```

После ввода необходимых обозначений величин (терминальных вершин) и соответствующих им числовых значений начинается процесс поиска слабо-связного подграфа. Если будет найден подграф, включающий в себя подмножество всех необходимых терминальных вершин, то будет выведено соответствующее сообщение. Далее все вершины подграфа выводятся на экран в виде линейной суперпозиции функций, в которой нетерминальные вер-

шины заменяются именами ассоциативно связных с ними функций, а связанные с ними терминальные вершины обрамляются круглыми скобками. Таким образом, терминальные вершины становятся аргументами функций и при подстановке фактических числовых значений происходит вычисление результата. Вывод результатов решения задачи отображается ниже (листинг 4).

Листинг 4. Вывод результатов решения из программы

```
>
Подграф найден!
f8(<Spd2>,<Spd1>,<Accl>)
Ответ = 20.0
>
```

Если будут введены недопустимые данные или по введенным данным не удастся осуществить поиск подграфа ввиду неполноты базы знаний, то будет выведено сообщение об отсутствии решения.

Как можно видеть, результаты решения задач и ответы действительно соответствуют таковым. Работоспособность описанного выше метода и алгоритмов была проверена при решении десятков различных задач из области механики. Кроме того, был проведен сравнительный анализ эффективности алгоритмов реализации данного метода на разных языках программирования, который показал, что текущая реализация с использованием хеширования на языке Python более эффективна [15].

Заключение. В результате проделанной работы было разработано специальное математическое и алгоритмическое обеспечение, в виде программного модуля для систем анализа и обработки экспертной информации с целью автоматизированного поиска и синтеза решений задач моделирования и идентификации динамических систем.

Решена проблема поиска и логического вывода синтезированных решений задач на графе знаний. Представлена модель базы знаний выбранной предметной области в виде мультиграфа знаний. На основе теоретико-множественного анализа и элементов теории графов предложен новый модифицированный метод поиска и логического вывода синтезированных решений задач. Для демонстрации работоспособности предложенный метод реализуется программным алгоритмом, а алгоритм реализуется кодом на языке программирования Python.

Предложенные метод и алгоритмы могут быть использованы при практической реализации баз знаний, механизмов обработки и логического вывода экспертной информации в различного рода экспертных, расчетно-логических и гибридных интеллектуальных системах, замещающих собой зарубежные аналоги. Кроме того, с привлечением экспертов из разных предметных областей появится возможность составить новые базы знаний для решения большого круга других разнообразных задач. В подобных программных системах можно будет реализовать более удобный графический интерфейс для пополнения баз знаний, а также возможность их функционирования в сети Интернет.

Список источников

1. Кравченко В.А. Моделирование поиска решения с помощью функциональных грамматик / В.А. Кравченко // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика, 2012. – № 9. – С. 33-41.
2. Кравченко В.А. Формальное описание функционального логико-математического моделирования динамических систем / В.А. Кравченко, Д.Ш. Ширапов, Д.Н. Чимитов // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика, 2017. – № 3. – С. 32-39. – DOI:10.18101/2304-5728-2017-3-32-39.
3. Апанович З.В. Эволюция понятия и жизненного цикла графов знаний / З.В. Апанович // Системная информатика, 2020. – № 16. – С. 57-74. – DOI:10.31144/si.2307-6410

4. Бхатт Ш. Графы знаний как средство улучшения искусственного интеллекта / Ш. Бхатт, Ц. Чжао // Открытые системы, СУБД, 2020. – № 3. – С. 24-26.
5. Пилецкий И.И. Граф знаний и машинное обучение как базис методологии искусственного интеллекта в обучении / И.И. Пилецкий // Big Data and Advanced Analytics, 2021. – №7-1. – С. 198-210.
6. Лаврищева Е.М. Технология моделирования физических и математических задач предметных областей знаний / Е.М. Лаврищева // Евразийское Научное Объединение, 2021. – №1-1(71). – С. 35-43.
7. Кормен Т.Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т.Х. Кормен, Ч.И. Лейзерсон, Р.Л. Ривест, К. Штайн // М.: «Вильямс», 2019. – 1328 с. – ISBN 978-5-9071-1411-1.
8. Седжвик Р. Алгоритмы на С++. Анализ структуры данных. Сортировка. Поиск. Алгоритмы на графах / Р.Седжвик // М.: «Вильямс», 2019. – 1056 с. – ISBN 978-5-8459-2070-6.
9. Promel H.J., Steger A. The Steiner tree problem: a tour through graphs, algorithms, and complexity. Springer Science & Business Media, 2012.
10. Pajor T., Uchoa E., Werneck R.F. A robust and scalable algorithm for the Steiner problem in graphs. Math. Program. Comput, 2017, DOI:10.1007/s12532-017-0123-4.
11. Van Rossum G. Python Tutorial: Release 3.6.4. Pub: 12th Media Services, 2018, 156 p., ISBN-13:978-1680921601.
12. Зайцев А.Ф. Flowchart of the main algorithm for finding a subgraph in a directed, unweighted, cyclic multigraph. – URL: https://github.com/Toljanchiman/lispVSpython/blob/master/img/PyFlowChart.png (дата обращения: 13.06.2022).
13. Голубева О.В. Механика: учебное пособие / О.В. Голубева, С.Г. Жигаленко, О.И. Гаммершмидт // Липецк: Липецкий ГПУ, 2018. – 99 с. – ISBN 978-5-88526-928-5
14. Van Rossum G. The Python programming language interpreter. Available at: https://github.com/python/ cpython (accessed: 13.06.2022).
15. Зайцев А.Ф. Анализ эффективности алгоритмов вычисления в информационной системе логико-математического моделирования / А.Ф. Зайцев, В.А. Кравченко, Д.Ш. Ширапов // Вестник Бурятского государственного университета: Математика, информатика, 2020. – № 2. – С. 3-14. – DOI:10.18101/2304-5728-2020-2-3-14.

Зайцев Анатолий Федорович. *Преподаватель кафедры электронно-вычислительных систем, ФГБОУ ВО Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, AuthorID: 1037054, SPIN: 9938-9462, ORCID: 0000-0002-0960-9061, lordsadler2010@mail.ru, Россия, Улан-Удэ, ул. Смолина 26.*

UDC 004.82
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.017

Method of search and logical inference of expert information in a directed cyclic knowledge multigraph

Anatoly F. Zaytsev

East Siberian state university of technology and management,
Russia, Ulan-Ude, *lordsadler2010@mail.ru*

Abstract. Currently, many modern problems of applied mathematics and computer science are solved using graph theory. Various complex systems, such as neural networks or knowledge bases, can be represented and described as graphs. The most common problems using graph theory are: finding the shortest path, determining the maximum flow in the network, finding the minimum spanning trees and others. At the same time, there are quite a lot of unresolved problems. The relevance of the work is due to increased interest in the fields of artificial intelligence and knowledge engineering, the methods of which are the possibility of transforming the obtained subject models into logical and mathematical, in the form of programs for computers that carry out computer or simulation modeling of the systems under study. In the presented work the process of development of the special mathematical and algorithmic software for system of the analysis and processing of the expert information for the purpose of the automated search and modeling of decisions of problems for identification of dynamic systems is described. The problem of search and logical inference of synthesized solutions of problems on knowledge graphs is formulated. The model of knowledge base of the selected subject area in the form of knowledge multigraph is presented, as well as the method of search and logical inference of solutions of problems, with their software implementation in the programming language Python. The presented method of search of weakly connected subgraphs and synthesis of problem solutions is implemented by using theoretical-multiple analysis, as well as elements of graph theory. To demonstrate the performance of the method, its implementation in the form of an algorithm in the Python programming language and the results of

computational experiments are given. The novelty and practical significance of the work lies in the fact that the proposed method and algorithms can be used in the practical implementation of knowledge bases, logical inference mechanisms and processing of expert information in a variety of expert, calculation-logical and hybrid intelligent systems, replacing their foreign analogues.

Keywords: system analysis, logical inference, graph search, multigraph, expert system, knowledge base, knowledge graph, Python

References

1. Kravchenko V.A. Modelirovanie poiska reshenija s pomoshh'ju funkcional'nyh grammatik [Modeling the search for solutions using functional grammars]. Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika, informatika [Bulletin of the Buryat State University. Mathematics Informatics], 2012, no. 9, pp. 33-41.
2. Kravchenko V.A., Shirapov D. Sh., Chimitov D.N. Formal'noe opisanie funkcional'nogo logiko-matematicheskogo modelirovanija dinamicheskih sistem [Formal description of functional logical and mathematical modeling of dynamic systems]. Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika, informatika [Bulletin of the Buryat State University. Mathematics Informatics], 2017, no. 3, pp. 32-39, DOI:10.18101/2304-5728-2017-3-32-39.
3. Apanovich Z.V. Jevoljucija ponjatija i zhiznennogo cikla grafov znanij [Evolution of the concept and life cycle of knowledge graphs]. Sistemnaya informatika [System Informatics], 2020, no. 16, pp. 57-74, DOI:10.31144/si.2307-6410.
4. Bkhatt SH., CHzhao TS. Grafy znanij kak sredstvo uluchshenija iskusstvennogo intellekta [Knowledge graphs as a means to improve artificial intelligence]. Otkrytyye sistemy, SUBD [Open Systems DBMS], 2020, no.3, pp. 24-26.
5. Piletskij I.I. Graf znanij i mashinnoe obuchenie kak bazis metodologii iskusstvennogo intellekta v obuchenii [The Knowledge Graph and Machine Learning as the Basis for Artificial Intelligence Methodology in Learning]. Big Data and Advanced Analytics, 2021, no. 7-1, pp. 198-210.
6. Lavrishheva E.M. Tehnologija modelirovanija fizicheskih i matematicheskih zadach predmetnyh oblastej znanij [Technology of modeling physical and mathematical problems of subject areas of knowledge]. Yevraziyskoye Nauchnoye Ob"yedineniye [Eurasian Scientific Association], 2021, no. 1-1(71), pp. 35-43.
7. Kormen T.KH., Lejzerson CH.I., Rivest R.L., SHtajn K. Algoritmy: postroenie i analiz [Algorithms: construction and analysis. 3rd ed]. M.: Williams, 2019, 1328 p., ISBN 978-5-9071-1411-1.
8. Sedzhvik R. Analiz struktury dannyh. Sortirovka. Poisk. Algoritmy na grafah [Algorithms in C++. Data structure analysis. Sorting. Search. Algorithms on graphs]. Moscow: Williams, 2019, 1056 p., ISBN 978-5-8459-2070-6.
9. Promel H.J., Steger A. The Steiner tree problem: a tour through graphs, algorithms, and complexity. Springer Science & Business Media, 2012.
10. Pajor T., Uchoa E., Werneck R.F. A robust and scalable algorithm for the Steiner problem in graphs. Math. Program. Comput, 2017, DOI:10.1007/s12532-017-0123-4
11. Van Rossum G. Python Tutorial: Release 3.6.4. Pub: 12th Media Services, 2018, 156 p., ISBN-13:978-1680921601.
12. Zaytsev A.F. Flowchart of the main algorithm for finding a subgraph in a directed, unweighted, cyclic multigraph [Electronic resource]. Available at: https://github.com/Toljanchiman/lispVSpython/blob/master/ img/ Py-Flow- Chart.png (accessed: 13.06.2022).
13. Golubeva O.V. Mekhanika: uchebnoe posobie [Mechanics: tutorial]. Lipetsk: Lipetskij GPU, 2018, 99 p., ISBN 978-5-88526-928-5
14. Van Rossum G. The Python programming language interpreter. Available at: https://github.com/python/cpython (accessed: 13.06.2022).
15. Zaytsev A.F., Kravchenko V.A., Shirapov D.Sh. Analiz jeffektivnosti algoritmov vychislenija v informacionnoj sisteme logiko-matematicheskogo modelirovanija [Analysis of the efficiency of calculation algorithms in the information system of logical and mathematical modeling]. Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika, informatika [Bulletin of the Buryat State University. Mathematics Informatics], 2020, no. 2, pp. 3-14, DOI:10.18101/2304-5728-2020-2-3-14.

Anatoly Fedorovich Zaytsev. *Lecturer, department of electronic-computing systems, East Siberian State University of Technology and Management, AuthorID: 1037054, SPIN: 9938-9462, ORCID: 0000-0002-0960-9061, lordsadler2010@mail.ru, Russia, Ulan-Ude, 26 Smolina St.*

Статья поступила в редакцию 15.06.2022; одобрена после рецензирования 06.10.2022; принята к публикации 01.11.2022.
The article was submitted 06/15/2022; approved after reviewing 10/06/2022; accepted for publication 11/01/2022.

УДК 004.8: 17
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.018

К вопросу о формализации этики поведения коллаборативного робота

Карпов Валерий Эдуардович[1], Королева Мария Николаевна[2]
[1]НИЦ «Курчатовский институт»,
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Россия, Москва, *maria.svyatkina@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы создания механизмов, позволяющих коллаборативному роботу считаться моральным агентом. Показано, что в условиях принципиально неустранимых противоречий и неполноты использование логических схем и различных неклассических логик не решают проблему формализации моральных учений и этики поведения. На примере показано, что задача моральных схем или систем суждений заключается не только и не столько в том, чтобы определить или оценить действие (поведение) агента, а в том, чтобы реализовывать объяснительный компонент поведения. В качестве этических теорий, закладываемых в основу поведения робота, рассматриваются утилитаризм в понимании И. Бентама и Дж. С. Милля в комбинации с аксиологической системой правил гедонизма. Для качественного анализа применяются когнитивные карты. В работе сформулированы три фундаментальные утверждения морального поведения робота: 1) поведение (выбор действия, реализация поведенческой процедуры) агента определяется текущими актуальными потребностями и состоянием его системы восприятия; 2) в основе моральности поведения лежит результат сопоставления конспецификов с «Я», т.е. определение степени «свой-чужой»; 3) схема моральных представлений нужна для того, чтобы определить значимость потребностей и особенности системы восприятия, а главное – обосновать (оправдать) выбранное агентом поведение.

Ключевые слова: этика, коллаборативный робот, неклассические логики, моральный агент, анимат, эмоционально-потребностная архитектура, эмпатия

Цитирование: Карпов В.Э. К вопросу о формализации этики поведения коллаборативного робота / В.Э. Карпов, М.Н. Королева // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 223-233. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.018.

Введение. Одним из векторов развития популярного междисциплинарного направления «Объяснимый искусственный интеллект» является формирование системы методов и технологий для поддержки пользователей (естественных агентов) в плане понимания ими своих искусственных интеллектуальных партнёров и формирования у людей доверия к их решениям. Примером партнёрских систем является коллаборативная робототехника, в которой рассматриваются вопросы взаимодействия, понимания, объяснения и интерпретации поведения системы «человек-робот». Эти проблемы подробно рассмотрены в работе В.Б. Тарасова [1]. При этом взаимное понимание и доверие во многом определяются этическими аспектами взаимодействия. По сути, этическая оценка поведения говорит нам о субъекте – насколько он определяется как свой или чужой, можем ли мы ему доверять, действуем ли мы с ним в рамках некой единой системы ценностей. В данной работе, продолжая исследования В.Б. Тарасова, остановимся на вопросе формализации этики поведения искусственных агентов в партнёрских системах. Коллаборативный робот – это робот, непосредственно взаимодействующий с человеком при выполнении совместных работ. Отсюда – требование к тому, чтобы поведение робота отвечало этическим представлениям человека-оператора. Причина в том, что функционирование осуществляется в естественной, недетерминированной среде, когда технические регламенты и ограничения не всегда позволяют роботу выбирать требуемое поведение. Существуют ситуации, когда рациональный выбор действия не будет предпочтительным с точки зрения человека-оператора. Второй аспект необходимой моральности поведения заключается в том, что при тесном контакте человек наделяет робота-партнёра свойствами морального агента, что требует необходимости принятия решений роботом, исходя из неких представлений о морали.

В работе мы, согласно Р.Г. Апресяну [2], будем полагать термины «этика», «мораль» и «нравственность» синонимами. Кроме того, согласно тому же Р.Г. Апресяну, мы будем считать, что основная задача морали – это разрешение конфликтов. Основным же конфликтом будем полагать наличие неоднозначности при принятии решений (конфликтное множество правил в инженерии знаний). Здесь же отметим, что для решения нашей задачи – формализации этики поведения – не достаточен подход В. Лефевра из его «Алгебры совести» [3]. Этическая система строится им на наборе правил перехода от элементарных ценностей к их комплексам, которые, в свою очередь, определяются только бинарными оценками «добро-зло». В конечном счете, такая этическая система дает лишь бинарную оценку действия, но не способна объяснить и оправдать поведение.

На основе очевидных для гуманитарных сфер проблем, перечислим особенности формализации этики:

1. Слабо и плохо формализуемые понятия.
2. Неизбежные противоречия.
3. Изолированные участки формализации: схема понятий, причинно-следственные связи не всегда образуют целостную систему.
4. Многое «объясняется» примерами, частными случаями, прецедентами (язык притч).

В этой работе мы рассмотрим один из подходов к формализации этического аспекта поведения робота с сугубо прагматической, технической точки зрения.

1. Постановка инженерной задачи. Пусть перед неким гипотетическим инженером стоит задача создания искусственного агента (для наглядности – робота), который должен не только функционировать в естественной человеческой среде, но и выполнять вместе с человеком некоторую работу, т.е. функционировать в социуме самым непосредственным образом. Предположим, что наш инженер смог определить базовую функциональность робота, определив множество его поведенческих программ, например, по выполнению тех или иных технологических операций. Далее, наш инженер понимает, что сложная среда функционирования подразумевает неоднозначность реакций робота. Неоднозначность обычно разрешается путем введения оценок возможных действий, а вот сами оценки определяются техническими, правовыми и моральными соображениями. Если принимаемое решение не может быть однозначно определено, исходя из технических (нажать на тормоз) и правовых (причинение минимального вреда) требований, то должны быть применены некие дополнительные фильтры в виде эвристик (сделать так, чтоб было «хорошо»). Такими эвристиками и являются моральные соображения. Условно это можно изобразить так:

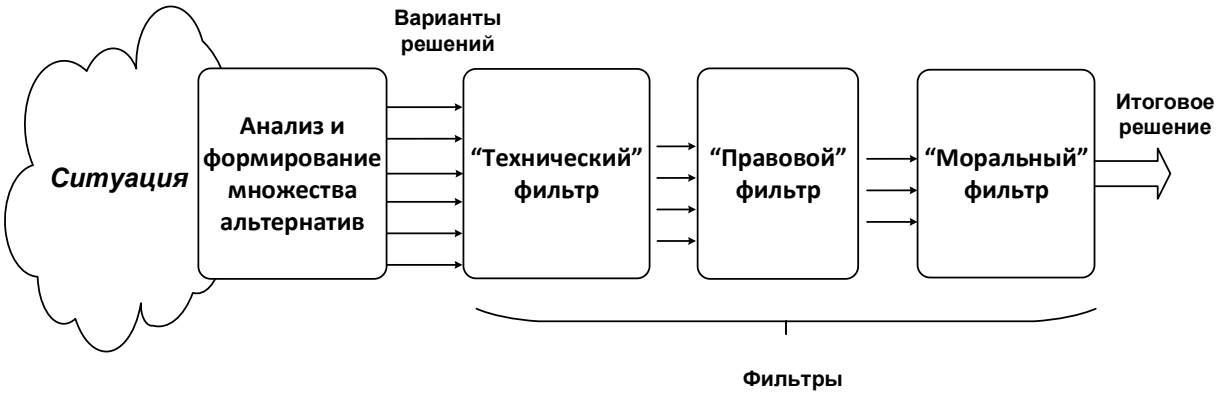


Рис. 1. Моральный выбор как способ разрешения неоднозначности (по мотивам [4])

Итак, итоговая оценка некоторого действия *Д* может быть представлена в виде:

$$Оценка\ (Д) = Техническая_оценка(Д) + Правовая_оценка(Д) + \mathbf{Моральная_оценка}(Д) \quad (1)$$

Итак, предположим, что среди множества этических теорий, закладываемых в основу поведения робота, был выбран утилитаризм в понимании И. Бентама и Дж. С. Милля [5]. Это понимание несколько ближе к инженерному подходу в силу того, что, во-первых, речь у них идет о рационализации хотя бы экономического, а не сугубо гуманитарного поведения, а, во-вторых, Дж. С. Милль, прежде всего, – логик. К тому же, именно поведение – основной аспект утилитаризма. Итак, пусть имеется некое множество постулатов утилитаризма:

У1. Счастье, как получение удовольствия и избавление от страданий, является смыслом деятельности человека (под счастьем подразумевается удовольствие и отсутствие боли).

У2. Полезность человека и его дел для общества – это самый значимый критерий оценки всех явлений.

У3. Главный критерий нравственности – принцип полезности в виде стремления к достижению счастья для наибольшего числа людей.

У4. Удовольствие может проистекать из дружбы и симпатии.

У5. Основная цель развития человечества – стремление к расширению всеобщей пользы через гармоничное сочетание интересов (счастья) каждого индивидуума с общими интересами.

Полнота этого перечня, корректность формулировок для нас принципиально не существенна. Очевидно, что для инженера здесь явно не хватает оценочных суждений. Нужны явные критерии, системы оценок или хотя бы то-то такое, что оперировало бы некими ценностями. К счастью, наш гипотетический инженер слышал что-то о существовании теории ценностей – аксиологии. Добавим к постулатам У1-У4 что-нибудь из таких аксиологических учений, например, гедонизм. Тем более что гедонизм – это основа утилитаризма. И тогда мы получим такую дополнительную систему правил [6]:

Г1. Смысл человеческих действий и основа счастья – стремление к удовольствию и отвращение от страдания (эквивалентно У1).

Г2. Следует поступать всегда так, чтобы можно было непосредственно удовлетворять свои потребности и испытывать как можно большее наслаждение.

Г3. Запреты и предписания (влияние социума) – это препятствие к достижению удовольствия.

Наши рассуждения о морали будут иметь качественный характер. Изобразим эти правила-постулаты в некотором наглядном, качественном виде, пригодном, к тому же, для последующего анализа.

Когнитивные карты. Одним из механизмов качественного анализа являются когнитивные карты. Далее мы будем опираться на работы О.П. Кузнецова и А.А. Кулинича, см., например, [7, 8]. Когнитивная карта – это ориентированный граф, ребрам которого поставлены в соответствие веса. Вершины графа соответствуют факторам (концептам), определяющим ситуацию, ориентированные ребра – причинно-следственным связям между факторами. Веса определяют силу влияния этих факторов. Положительный вес означает, что увеличение фактора-причины приводит к увеличению значения фактора-следствия, отрицательный – к соответствующему уменьшению.

Если веса графа принимают значение +1 и –1, то мы имеем дело со знаковым графом. Важная задача в анализе таких графов – это анализ его циклов. Положительный цикл – это контур положительной обратной связи. Увеличение значения некоторого фактора в этом цикле приведет к его дальнейшему неограниченному росту, т.е. к потере устойчивости. Отрицательный цикл противодействует отклонениям от начального состояния и способствует его устойчивости. Знак цикла определяется знаком произведения его ребер.

Когнитивная карта, соответствующая правилам У1-У5 и Г1-Г3, изображена на рис. 2.

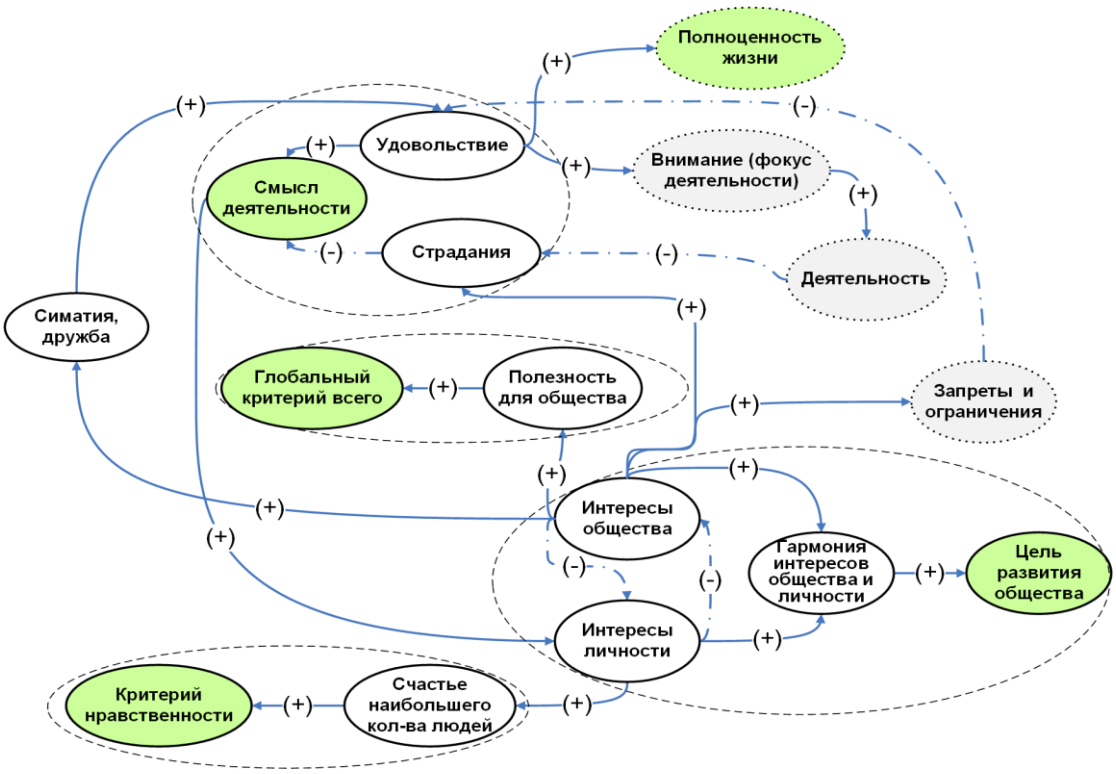


Рис. 2. Фрагмент когнитивной карты этической системы

Пока не будем обращать внимание на то, что на этой карте есть «висящие» вершины-понятия, а ряд вершин вполне можно объединить или, напротив, следует представить в более подробном виде. Наша задача – определить суть технологии.

На этой карте есть некие «противоречия». Например, говорится, что влияние общества (на схеме «Интересы общества») в виде запретов и ограничений отрицательно, т.е. уменьшает удовольствие (Г3). С другой стороны, влияние общества в виде симпатии/дружбы повышает удовольствие.

Формально мы получаем утверждение вида:

$$\textit{Интересы общества} \vdash \textit{Удовольствие}$$

$$\textit{Интересы общества} \vdash \neg\textit{Удовольствие}$$

Или, если полагать, что здесь вполне можно воспользоваться правдоподобностью, интерпретировать это как $\{\textit{Интересы общества}, \neg\textit{Интересы общества}\} \vdash \textit{Удовольствие}$. Здесь $\vdash$ – знак логической выводимости.

Разумеется, здесь есть и более серьезные сложности. Например, определение семантики используемых сущностей, определение того, как это будет представлено в картине мира робота и т.п., но пока ограничимся лишь проблемой явных внешних противоречий.

Очевидно, что появление высказывания $\{\alpha, \neg\alpha\} \vdash \beta$ приводит нас к выводу о необходимости применения специального класса логических исчислений, в которых логический принцип *«из противоречия следует все что угодно»* (*"ex contradictione (sequitur) quodlibet" – ECQ*), не имеет места. Это – область т.н. *паранепротиворечивых логик*. Мы не беремся утверждать, что при описании философских конструкций достаточно лишь паранепротиворечивых логик. Возможно, здесь могут потребоваться *подлинно паранепротиворечивые логики*, в которых отвергается не только принцип *ECQ*, но отвергается и закон непротиворечия (*NC*): $\neg(\alpha \wedge \neg\alpha)$, см. [9].

Существуют различные способы опровержения и ограничения принципа *ECQ*, более того, паранепротиворечивых логик бесконечно много, однако среди их множества нас интересуют т.н. *релевантные логики*. В релевантной логике доказуема не каждая формула, глав-

ный знак которой – импликация, а антецедент противоречив. Существуют различные семантические подходы, показывающие паранепротиворечивость релевантных логик, например, *семантика возможных миров* С. Крипке. В классическом понимании возможных миров полагается [10]: 1) ни в каком мире w, никакая пропозициональная переменная α не встречается одновременно со своим отрицанием (условие непротиворечивости); 2) во всяком мире w, любая пропозициональная переменная α встречается либо сама, либо с отрицанием (условие полноты). При этом доказуемыми являются те и только те формулы, которые являются истинными во всех возможных мирах. Здесь главным вопросом является интерпретация отрицания. С каждым миром w ассоциируется мир w^*, при этом α истинно в w тогда и только тогда, когда α ложно не в w, а в w^*, т.е. если α истинно в w, но ложно в w^*, то $(\alpha \wedge \neg\alpha)$ истинно в w [11].

На самом деле, использование какого-либо вида паранепротиворечивой логики не сможет решить нашу проблему. Дело в том, что нас не интересует, каким образом можно переформулировать нашу систему этических представлений, выраженных в виде ряда правил-высказываний. Она противоречива принципиально. Модификация моральной схемы, введение новых сущностей, разрешение семантических неоднозначностей – это уход от проблемы, точнее, это – просто перенос проблемных вопросов на другой уровень. Не решит проблему формализации и переход к вероятностным или нечетким рассуждениям. Нам необходимо оставаться в рамках системы явных правил-высказываний. Это связано с тем, что:

1. Схема принятия этического решения или этической оценки ситуации должна быть предельно наглядна, интерпретируема и, главное, объяснима.
2. Все модификации, расширения моральной схемы осуществляются именно в форме явных языковых высказываний.
3. Схема должна быть компактной в силу необходимости ее анализа на каждом шаге принятия решения или выбора действия агентом.

Рассмотрим некую модификацию (или развитие) схемы, приведенной на рисунке 2. Будем полагать, что наша задача – определить, какое действие (или поведение) должен реализовать агент. Предположим, что среди множества возможных действий в некоторый момент времени агенту доступны два – *«Отдыхать»* и *«Работать»* (рис. 3).

Действие *«Работать»*, согласно фрагменту схемы, приведет, с одной стороны, к получению удовольствия, а с другой – к его отрицанию через ограничения, накладываемые социумом. Формально это означает наличие нескольких путей из вершины *«Работать»* в вершину *«Удовольствие»* с разными знаками. Или:

$$\textit{Работать} \vdash \textit{Удовольствие}$$

$$\textit{Работать} \vdash \neg\textit{Удовольствие}$$

Мы не будем оценивать эти пути, вводя различные веса переходов, коэффициенты значимости и т.п. Повторим, что это в конечном итоге – тоже уход от проблемы. Нам надо понять, как действовать именно в условиях неустранимых противоречий. В данном случае, агенту необходимо определить, что делать – отдыхать или работать. И здесь мы приходим к выводу, что на самом деле задача наших моральных схем, систем суждений и т.д. совершенно не в том, чтобы определить или оценить действие (поведение) агента. Как будет показано ниже, задача моральной системы лишь в том, чтобы реализовывать объяснительный компонент поведения.

Рассмотрим далее вопрос о том, что лежит в основе поведения искусственного агента. Будем далее иногда вместо совершенно общего и абстрактного термина агент использовать термин *анимат*, подчеркивая, что нас интересует некая модель, претендующая на описание поведения если не человека, то животного [12].

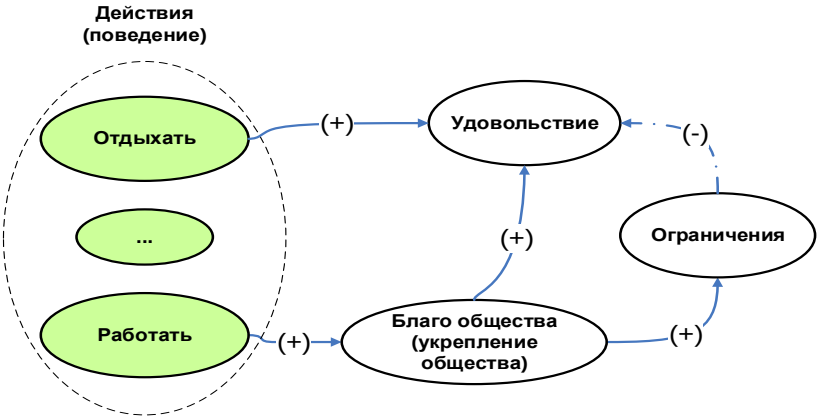


Рис. 3. Выбор действия в условиях противоречий

2. Базовое поведение анимата. Поскольку мы говорим о поведении искусственного агента – робота, то неизбежно встает вопрос об архитектуре его системы управления, причем, начиная с самого нижнего уровня. Будем полагать, что среди множества возможных архитектур мы остановились на следующей (рис. 4).

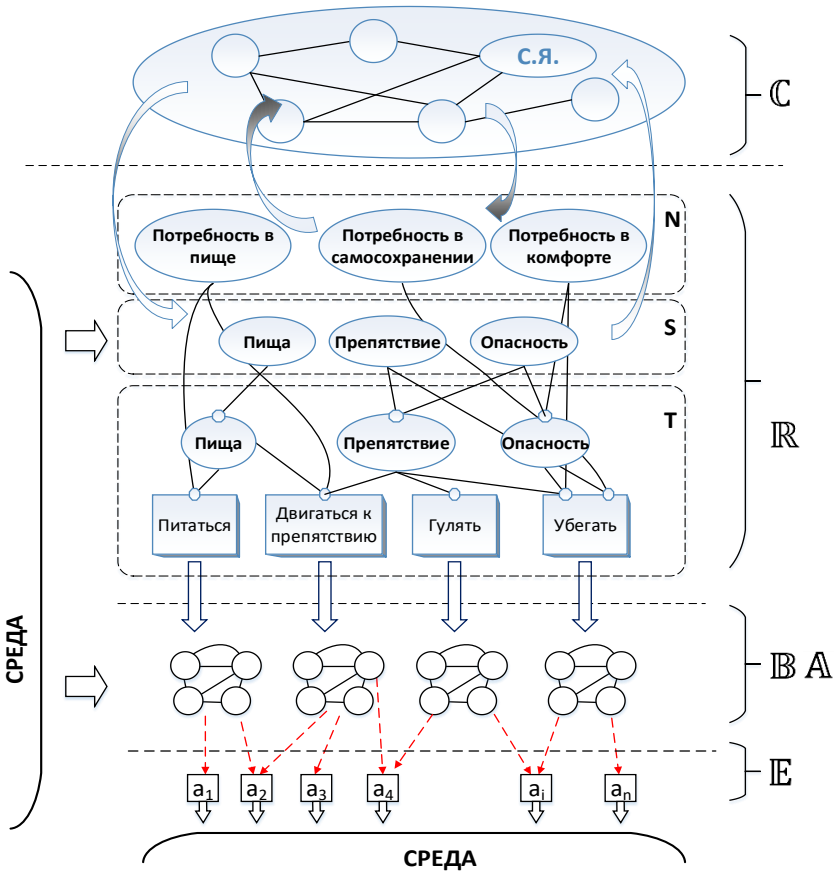


Рис. 4. Схема обобщенной архитектуры системы управления анимата

Непосредственное общение со средой (датчики, сенсорные подсистемы, эффекторы) осуществляется на уровне $\mathbb{E}$. Уровень $\mathbb{BA}$ – это уровень поведения (от простого до сложного, вплоть до поведенческих комплексов). Поведенческий уровень может быть реализован на базе, например, мета-автоматной логики. $\mathbb{R}$ – это основной регуляторный уровень. На этом уровне осуществляется запуск поведенческих процедур, причем выбор того или иного поведения основан на имеющихся у агента актуальных потребностей (N), информации от сенсорной системы (S) и эмоционального состояния агента. Механизм эмоций отвечает за устойчивость поведения агента, контрастирование его восприятия и за кратковременную память. Это то, что лежит в основе стабилизирующей части (T). Фактически, на уровне $\mathbb{R}$ мы имеем дело с т.н. эмоционально-потребностной схемой.

Уровни $\mathbb{E}, \mathbb{BA}$ и $\mathbb{R}$ относятся к рефлекторному – нижнему – уровню управления. На рисунке 4 для наглядности условно приведены обозначения потребностей и абстрактных сигналов сенсорной системы (подсистемы восприятия).

На самом верху располагается когнитивный уровень $\mathbb{C}$, часть, ответственная за отображение сенсорных и потребностных элементов. Этот уровень называется моделью мира, здесь формируется мотивация и целеполагание, осуществляется планирование и т.п. Реализуется этот уровень, например, семиотическими моделями. Формально работа такой системы управления агента может быть определена следующим образом.

Пусть Y_{eff} – вектор выходных эффекторных воздействий анимата на среду. Его формирование определяется результирующим выходом последовательности $n+1$ мета-автоматов M^k, $k=0...n$.

$$Y_B \overset{a}{\Rightarrow} M_i^n \overset{a}{\Rightarrow} M_j^{n-1} \overset{a}{\Rightarrow} \dots \overset{a}{\Rightarrow} M_k^0 \overset{a}{\Rightarrow} Y_{eff}.$$

Здесь Y_B – вектор активации мета-автомата, определяющего выбранное актуальное поведение, $\overset{a}{\Rightarrow}$ – отношение непосредственного автоматного управления, задаваемое соответствующими функциями выхода автоматов λ: $Y^k = \lambda(Q^k, S^k)$, $S^k = X \cup f(Q^{k-1})$. Здесь Q^k, S^k – состояния и входной алфавит мета-автомата уровня k соответственно. При этом S^k определяется как объединение внешних сигналов (сигналов среды) и текущего состояния подчиненного автомата уровня k-1.

Вектор активации поведения Y_B задается функционированием регуляторного уровня $\mathbb{R}$:

$$Y_B = \mathbb{R}(S, N, G),$$

где S, N, G – сенсорные сигналы, потребности и вентильные элементы эмоционально-потребностной схемы соответственно. Подробное описание «эмоционального» компонента систему управления выходит за рамки настоящей работы. Отметим здесь лишь то, что в его основе – информационная теория эмоций П. Симонова [13, 14]. Согласно ей, интегральная оценка ситуации определяется оценкой баланса между необходимыми и имеющимися средствами удовлетворения актуальных потребностей. Оценочная, качественная формула Симонова выглядит так:

$$E = f\,(N, p(I_{need}, I_{has})), \qquad (2)$$

где E – эмоция, ее величина и знак (качество); N – сила и качество текущей необходимости; $p\,(I_{need}, I_{has})$ – оценка возможности удовлетворить потребность на базе врожденного и полученного жизненного опыта; I_{need} – информация о способе удовлетворения потребности; I_{has} – информация об имеющихся у агента средствах, (ресурсах), требуемых для удовлетворения актуальных потребностей. «Технически» оценка (2) формируется контурами обратной связи между действием, направленным на удовлетворение актуальной потребности и интегрирующим сенсорные и потребностные сигналы элементы-вентили G.

Задача когнитивного уровня $\mathbb{C}$ – формировать целенаправленное поведение агента, при этом воздействие на регуляторный уровень осуществляется опосредованно, через элементы G (сенсорика и потребности – это фиксированный, «аппаратный» уровень архитектуры): $G = \mathbb{C}(S, N)$. В итоге получаем:

$$\mathbb{R}\big(S, N, \mathbb{C}(S, N)\big) \Rightarrow^M Y_{eff}. \qquad (3)$$

Здесь $\Rightarrow^M$ – транзитивное замыкание отношения автоматного управления $\overset{a}{\Rightarrow}$.

Все эти рассуждения необходимы лишь для того, чтобы обосновать наличие конструктивной схемы управления, определяющей поведение анимата. Итак, мы можем сформулировать достаточно очевидное утверждение:

Утверждение №1. Поведение (выбор действия, реализация поведенческой процедуры) анимата определяется текущими актуальными потребностями и состоянием его системы восприятия.

Перейдем далее к основаниям морального поведения.

3. Основания морального поведения. Наиболее явным механизмом, имеющим теснейшую связь с моральными аспектами поведения, является эмпатия – способность к отзывчивости на эмоциональные состояния окружающих индивидов разной степени близости (в животном мире это свойство называется симпатической индукцией). Эмпатия определяет склонность к сотрудничеству и проявлению альтруизма. Реализуется этот механизм на основе процедуры отождествления (определения степени близости) наблюдаемого другого агента с образом «Я». При этом удобной формой представления и описания процедуры сопоставления является использование семиотической модели, в которой понятие «Я» рассматривается как знак, обладающий смыслом, значением и образом (перцепт знака). Будем называть далее наблюдаемых других агентов конспецификами, т.е. представителями одного вида. При этом предполагается, что аниматы способны наблюдать и идентифицировать эмоциональное состояние конспецификов. Очевидно, что эта семиотическая модель реализуется на уровне $\mathbb{C}$ рассмотренной выше архитектуры анимата.

Определяемая степень близости с конспецификами – это основа для разделения «своих» и «чужих». Здесь нам приходится вернуться к т.н. золотому правилу морали [15], которое задает целевую функцию морального поведения. Это правило может быть дано в позитивной (поступать по отношению к другим так, как желаете, чтобы поступали по отношению к вам) и негативной (непричинение вреда другим) формах. При этом моральность поведения целиком и полностью определяется схемой сопоставления конспецификов с «Я». Если агент определяет конспецика как своего, то, в силу наличия ассоциативных связей между компонентами знаков семиотической системы, формируются возбуждения, определяющие поведенческую реакцию на состояние конспецифика: помощь, подражание, обучение и т.п. Для «чужого» реакция будет обратной. Например, в работе [16] описываются эксперименты, в которых варьировалась «склонность к симпатии» агента. При этом, воспринимая окружающих как «своих», агенты проявляли то, что называется альтруизмом. Если склонность была отрицательна (все – «чужие»), то агент проявлял к конспецификам агрессивность, воспринимая их как угрозу или источник пищи. Это – достаточно очевидно в силу того, что если конспецифик – свой, т.е. почти «Я», то ни о каком причинении вреда по отношению к «Я»-«своему» речи не идет, а поведение по отношению к «своему» в определенном смысле является зеркальным к «Я».

При таком подходе мы вновь приходим к тому, что основная задача морали – это разрешение внутренних конфликтов в социуме. Итак, сформулируем следующее утверждение:

Утверждение №2. В основе моральности поведения лежит результат сопоставления конспецификов с «Я», т.е. определение степени «свой-чужой».

Поднимемся уровнем выше. Рассмотрим теперь, каким образом соотносятся между собой когнитивная карта этической системы (рис. 2) с нашими представлениями об устройстве системы управления анимата.

4. Схема морального поведения. Основная задача когнитивного уровня $\mathbb{C}$ с точки зрения управления поведением – это изменение значимости тех или иных потребностей, влияние на систему восприятия и оценок, подмена «реальных» сигналов рефлекторного уровня $\mathbb{E}$- $\mathbb{AB}$-$\mathbb{R}$. На том же уровне $\mathbb{C}$ реализуется и система этических правил. При этом роль этической системы в поведении анимата сводится к двум основным функциям – оценочной и объяснительной.

Оценочная функция. Этическая схема определяет значимость тех или иных потребностей анимата. Основная задача – влиять на результаты сопоставления конспецифика с «Я». Именно эта функция определяет, что для агента все люди равны, близки, одинаково ценны. Или же определяет, кто или что является доминантом агента, т.е. высшим авторитетом, объ-

ектом, по отношению к которому осуществляется максимально подражательное или подчиненное поведение. Согласно Утверждению №1, агент-анимат-робот будет определять поведение, исходя из текущей актуальной потребности и оценки ситуации. При этом, естественно, может возникнуть ситуация конфликта. Мы уже рассматривали ситуацию, в которой анимат оказывался перед выбором – отдыхать или работать. Предположим, что, удовлетворяя потребность в удовольствии (см. рис. 3), анимат выполняет действие *«Отдыхать»*. Вместе с тем, остается невыполненным действие *«Работать»*, связанное с тем же получением удовольствия. Эмоционально-потребностная система управления устроена таким образом, что невыполнение некоторой требуемой поведенческой процедуры приведет к возрастанию абсолютного значения эмоции, связанной с этим действием. Наличие возрастающего сигнала такой обратной эмоциональной связи может привести в конечном итоге к ситуации переключения поведения на то, которое не было реализовано, но было актуально необходимым.

Объяснительная функция. Итак, в ситуации противоречия анимат все равно стабилизирует свое поведение, выбрав что-то одно. Проблема, однако, в том, что поведение коллаборативного робота должно быть предельно прозрачным, т.е. объяснимым, причем на уровне простых и наглядных цепочек рассуждений. Для этого представляется целесообразным воспользоваться концепцией семантики возможных миров С. Крипке, но в самом концептуальном виде. Путь в векторе активации поведения Y_B обнаружены противоречия (α, $\neg\alpha$), например, при α = *«отдыхать»*. Тогда агент формирует когнитивную карту, в которой это противоречие отсутствует (если робот решил отдохнуть, то в такой карте не будет сущности *«работать»*). Это – в некотором смысле миры w и ассоциированный с ним мир w^*. После чего отрабатывается обоснование (обратный вывод) выбранного действия. Если вывод успешен, то это означает, что агент сумел обосновать выбранное поведение. В противном случае его поведение не сможет быть оправдано моральной схемой. Итак, мы формулируем:

Утверждение №3. Схема моральных представлений нужна для того, чтобы определить значимость потребностей и особенности системы восприятия, а главное – обосновать (оправдать) выбранное агентом поведение.

Заключение. Итак, в условиях принципиально неустранимых противоречий и неполноты при формализации моральных учений, основная задача этических схем – это быть основой для объяснения постфактум, а вовсе не быть мотивирующим фактором. Коллаборативный робот как моральный агент – это агент, который должен всегда уметь найти оправдание своему поведению и объяснить его своему партнёру – человеку-оператору. При этом обязательными компонентами системы управления таких агентов являются эмоционально-потребностная схема («психологический» уровень) и когнитивная надстройка. В этом отношении представленная работа является контрапунктом множеству исследований в области той же психологии морального выбора.

Отчасти такая позиция может быть оправдана тем, что здесь речь идет не о человеке и даже не о высших млекопитающих (монополия человека в вопросах морали уже давно под сомнением, см., например, работу Ф. де Вааля [17]). Мы говорим о техническом устройстве, для которого необходимо предложить вполне практические, технически реализуемые схемы поведения, и в частности – формализацию схем поведения, которые оцениваются с точки зрения этичности. Будет коллаборативный робот, этичность которого определяется способностью к оправданию своего поведения действительно моральным агентом, или, напротив, такой образ функционирования будет считаться глубоко аморальным – это уже другой вопрос, выходящий за рамки настоящего исследования.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00770.

Список источников

1. Тарасов В.Б. От объяснимого искусственного интеллекта к «понимающим» когнитивным агентам / В.Б. Тарасов // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов X-й Международной научно-технической конференции (ИММВ-2021, Коломна, 17-20 мая 2021 г.). – Смоленск: Универсум, 2021. – Т.1. – С. 175-189.
2. Апресян Р.Г. Этика: учебник / Р.Г. Апресян // М.: КНОРУС, 2017. – 356 с.
3. Лефевр В. Алгебра совести / В. Лефевр // М.: Когито-Центр, 2003. – 426 с.
4. Karpov V.E. Can a robot be a moral agent? Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), 2020, vol. 12412, pp. 61-70, DOI: 10.1007/978-3-030-59535-7_5.
5. Сушенцова М.С. Утилитаризм И. Бентама и Дж. С. Милля: от добродетели к рациональности / М.С. Сушенцова // Вестник СПбГУ. Экономика, 2017. – Т. 33. – № 1. – С. 17-25.
6. Гусейнов А.А. Этика / А.А. Гусейнов, Р.Г. Апресян // М.: Гардарики, 2000. – 472 с.
7. Кузнецов О.П. Интеллектуализация поддержки управляющих решений и создание интеллектуальных систем / О.П. Кузнецов // Проблемы управления, 2009. – № 3.1. – С. 64-72.
8. Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы / А.А. Кулинич // Проблемы управления, 2010. – № 3. – С. 2-16.
9. Девяткин Л.Ю. О подлинно паранепротиворечивых и подлинно параполных многозначных логиках / Л.Ю. Девяткин // Логические исследования, 2019. – Т. 25. – № 2. – С. 26-45.
10. Сидоренко Е.А. Релевантная логика (предпосылки, исчисления, семантика) / Е.А. Сидоренко // М.: ИФРАН, 2000. – 243 с.
11. Карпенко А.С. Логика паранепротиворечивая / А.С. Карпенко // Гуманитарный портал: Концепты. URL: https://gtmarket.ru/concepts/6976 (дата обращения: 22.05.2022).
12. Wilson S.W. Classifier Systems and the Animat Problem. Machine Learning, 1987, vol. 2, pp. 199-228.
13. Симонов П.В. Потребностно-информационная теория эмоций / П.В. Симонов // Вопросы психологии, 1982. – Т. 6. – С. 44-56.
14. Simonov V.P. Thwarted action and need – informational theories of emotions. International Journal of Comparative Psychology, 1991, vol. 5, iss. 2, pp. 103-107.
15. Апресян Р.Г. Генезис золотого правила / Р.Г. Апресян // Вопросы философии, 2013. – № 10. – С. 39-49.
16. Карпов В.Э. К вопросу о моральных аспектах адаптивного поведения искусственных агентов / В.Э. Карпов, П.С. Сорокоумов // Искусственные общества, 2021. – Т. 16. – № 2.
17. Waal de F. The Bonobo and the Atheist: In Search of Humanism among the Primates. W.W. Norton & Company, 2014, 320 p.

Карпов Валерий Эдуардович. *К.т.н., доцент, начальник лаборатории робототехники, НИЦ «Курчатовский институт», AuthorID: 338997, SPIN: 3735-1511, karpov.ve@gmail.com, 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1*

Королева Мария Николаевна. *К.т.н., доцент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, AuthorID: 712582, SPIN: 6341-2068, maria.svyatkina@gmail.com, 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1*

UDC 004.8: 17
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.018

On the issue of formalization collaborative robot ethical behavior

Valery E. Karpov[1], Maria N. Koroleva[2]
[1] National Research Center "Kurchatov Institute"
[2] Bauman Moscow State Technical University,
Russia, Moscow, *maria.svyatkina@gmail.com*

Abstract. The paper considers the issues of creating mechanisms that allow a collaborative robot to be considered a moral agent. It is shown that in the conditions of fundamentally irremovable contradictions and incompleteness, the use of logical schemes and various non-classical logics does not solve the problem of formalizing moral teachings and ethics of behavior. The example shows that the task of moral schemes is not only and not so much to determine or evaluate the agent action (behavior), but to implement the explanatory behavior component. Utilitarianism in the understanding of I. Bentham and J. S. Mill in combination with the axiological system of hedonism rules are considered as ethical theories of the robot behavior. Cognitive maps are

used for qualitative analysis. Three fundamental statements of the moral behavior of a robot are formulate in the article.

Keywords: ethics, collaborative robot, non-classical logics, moral agent, animat, emotional-needs architecture, empathy

Acknowledgements: The reported study was funded with partial financial support by RFBR, project number 20-07-00770.

References

1. Tarassov V.B. Ot ob″yasnimogo iskusstvennogo intellekta k «ponimayushchim» kognitivnym agentam [From Explainable Artificial Intelligence to "Understanding" Cognitive Agents]. Proceedings of the the 10th International Conference on Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence (IMSC-2021, Kolomna, Russia, May 17-20, 2021), Smolensk, Universum, 2021, vol.1, pp. 175-189.
2. Apresyan R.G. Etika: uchebnik [Ethics: textbook]. M.: KNORUS, 2017, 356 p.
3. Lefebvre V. Algebra sovesti [Algebra of Conscience]. M: Cogito-Center [Cogito-Centre], 2003, 426 p.
4. Karpov V.E. Can a robot be a moral agent? Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), 2020, vol. 12412, pp. 61-70, DOI: 10.1007/978-3-030-59535-7_5.
5. Sushentsova M.S. Utilitarizm I. Bentama i Dzh. S. Millya: ot dobrodeteli k ratsional′nosti [Utilitarianism of J. Bentham and J. S. Mill: from Virtue to Rationality]. Vestnik SPbGU. Ekonomika [Bulletin of St. Petersburg State University. Economy], 2017, vol. 33, iss. 1, pp. 17-25.
6. Guseinov A.A., Apressyan R.G. Etika [Ethics]. M: Gardariki, 2000, 472 p.
7. Kuznetsov O.P. Intellektualizatsiya podderzhki upravlyayushchikh resheniy i sozdaniye intellektual′nykh sistem [Intellectualization of Control Decisions Support and Creation of Intellectual Systems]. Problemy upravleniya [Problems of management], 2009, vol. 3.1, pp. 64-72.
8. Kulinich A.A. Komp′yuternyye sistemy modelirovaniya kognitivnykh kart: podkhody i metody [Computer systems for modeling cognitive maps: approaches and methods]. Problemy upravleniya [Problems of management], 2010, vol. 3, pp. 2-16.
9. Devyatkin L.Yu. O podlinno paraneprotivorechivykh i podlinno parapolnykh mnogoznachnykh logikakh [On genuine paraconsistent and cenuine paracomplete newline many-valued logics]. Logicheskiye issledovaniya [Logical Investigations], 2019, vol. 25, no. 2, pp. 26-45.
10. Sidorenko E.A. Relevantnaya logika (predposylki, ischisleniya, semantika) [Relevant logic (premises, calculus, semantics)]. M.: IFRAN, 2000, 243 p.
11. Karpenko A.S. Logika paraneprotivorechivaya [Paraconsistent logic]. Humanitarian Portal: Concepts. Available at: https://gtmarket.ru/concepts/6976 (accessed: 22.05.2022).
12. Wilson S.W. Classifier Systems and the Animat Problem. Machine Learning, 1987, vol. 2, pp. 199-228.
13. Simonov P.V. Potrebnostno-informatsionnaya teoriya emotsiy [Need-Information Theory of Emotions]. Voprosy Psychologii [Questions of psychology], 1982, vol. 6, pp. 44-56.
14. Simonov V.P. Thwarted action and need – informational theories of emotions. International Journal of Comparative Psychology, 1991, vol. 5, iss. 2, pp. 103-107.
15. Apresyan R.G. Genezis zolotogo pravila [Genesis of the Golden Rule]. Voprosy filosofii [Questions of Philosophy], 2020, vol. 58, no. 2, pp. 109-123.
16. Karpov V.E., Sorokoumov P.S. K voprosu o moral′nykh aspektakh adaptivnogo povedeniya iskusstvennykh agentov [On moral aspects of adaptive behavior of artificial agents]. Iskusstvennyye obshchestva [Artificial Societies], 2021, vol. 16., iss. 2.
17. Waal de F. The Bonobo and the Atheist: In Search of Humanism among the Primates. W.W. Norton & Company, 2014, 320 p.

Valery V. Karpov. *PhD, Head of the Laboratory of Robotics, National Research Center "Kurchatov Institute", AuthorID: 338997, SPIN: 3735-151, karpov.ve@gmail.com, 123182, Russia, Moscow, Akademika Kurchatova Square, 1.*

Maria N. Koroleva. *PhD, Associate Professor of the Computer Systems of Production Automation Department, Bauman Moscow State Technical University, AuthorID: 712582, SPIN: 6341-2068, maria.svyatkina@gmail.com, 105005, Russia, Moscow, 2-nd Baumanskaya, 5, b.1.*

Статья поступила в редакцию 25.07.2022; одобрена после рецензирования 01.11.22; принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 07/25/2022; approved after reviewing 11/01/2022; accepted for publication 11/01/2022.

УДК 519.876
DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.019

К вопросу развития гибридного аналитического подхода к моделированию сложных систем, содержащих как слабо структурированные, так и хорошо структурированные подсистемы

Рыков Юрий Германович
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
Россия, Москва, *rykov@keldysh.ru*

Аннотация. В настоящее время методология искусственного интеллекта приобретает все больше и больше применений. Особенно много внимания привлекают нейронные сети (НС). Одна из главных причин этого заключается в том, что технология НС в некотором смысле носит универсальный характер. С другой стороны, некоторые другие компьютерные технологии, имеющие природу искусственного интеллекта, также обладают свойствами универсальности. В контексте настоящей статьи это технологии нечетких когнитивных карт (НКК) и специальных систем дифференциальных уравнений в частных производных, так называемых «систем законов сохранения» (СЗС). Все только что упомянутые подходы используются для разработки моделей сложных систем (СС), т.е. совокупности большого количества элементов со связями между ними различного типа. Специфика теории СЗС, которая способна моделировать совместные балансы различных величин на уровне физических процессов, заключается в наличии нелинейных эффектов, таких, как образование особенностей в решениях. Технология НКК допускает расширение первоначальной концепции Б. Коско с более широким диапазоном интерпретации. В статье представлена иллюстрация того, как эти технологии могут быть объединены в некую единую методологию создания среды моделирования СС на основе подхода НС.

Ключевые слова: сложные системы, информатика, среды моделирования, нечеткие когнитивные карты, взвешенный орграф, разбиение графа по циклам, законы сохранения, вариационное представление, нейронные сети для законов сохранения

Цитирование: Рыков Ю.Г. К вопросу развития гибридного аналитического подхода к моделированию сложных систем, содержащих как слабо структурированные, так и хорошо структурированные подсистемы / Ю.Г. Рыков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 234-247. DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.019.

Введение. Современный этап процесса «цифровизации» подошел к тому моменту, когда в развитых обществах возникает потребность в моделировании не отдельных явлений, или даже классов явлений, а их достаточно широкой взаимосвязанной совокупности. В качестве поясняющего примера можно рассмотреть детальное моделирование жизни города с отражением, в частности, таких факторов, как, например, протекание производственных процессов, и факторов другого рода, например, социальной реакции жителей на работу предприятий с экологической точки зрения. Данный подход к моделированию представлен, в том числе, в сформировавшихся к настоящему моменту концепциях цифровых двойников (digital twin) и метавселенных (metaverse). Хороший иллюстративный материал по этому вопросу содержится, например, в ресурсах компании NVIDIA https://www.nvidia.com/ru-ru/, активно работающей в этом направлении.

В связи со сказанным повышается интерес к совершенствованию и, возможно, синтезу технологий моделирования, позволяющему с единой точки зрения охватить системы, содержащие как слабо структурированные (например, социальные подсистемы при недостатке информации), так и хорошо структурированные подсистемы (например, модели конкретных производств на уровне физических процессов). Такой синтез мог бы способствовать повышению качества мониторинга, анализа, выработки управляющих воздействий для подобных систем. Далее мы будем рассматривать так называемые «сложные системы» (сокращенно: СС), т.е. системы, состоящие из множества взаимосвязанных элементов. При этом природа элементов (групп элементов) может быть различной: это могут

быть факторы, характеризующиеся некоторым числом или функцией, или алгоритмы (например, модели течения газа в производственном процессе) со своей внутренней структурой, которые связаны с СС посредством только входных и выходных данных и т.п. К настоящему времени имеется множество подходов и сред моделирования СС. Рамки настоящей статьи позволяют лишь упомянуть некоторые из них: это модели системной динамики, когнитивные карты, мультиагентное моделирование, регрессионный анализ, методы искусственного интеллекта и т.д., и, соответственно, приводимые ниже ссылки являются иллюстративными, ни в коей мере не отражающими существующее многообразие работ по данной тематике. Основными проблемами при подобном моделировании являются размерность задачи, производительность вычислительных средств и наличие данных в необходимом объеме и должного качества. В работе будет проиллюстрировано на концептуальном уровне утверждение о том, что для преодоления указанных проблем моделирования СС вида, описанного выше, удобно использовать нейронные сети (НС), понимаемые в некотором расширенном смысле, о чем будет сказано ниже в разделе 1. НС обладают достаточной гибкостью в отношении реализации на высокопроизводительных вычислительных средствах, могут быть достаточно большого объема и реализовывать вычислительные технологии, которые могут давать осмысленные результаты и в условиях недостатка данных.

Для указанной выше иллюстрации рассмотрим две технологии: технологию моделирования слабо структурированных систем и ситуаций – нечеткие когнитивные карты (НКК), а также технологию моделирования хорошо структурированных процессов – системы уравнений в частных производных, описывающих некоторые точные физические процессы (в частности, течения газа), например, на производстве. Последнюю технологию рассмотрим в виде более узкого класса уравнений, так называемых «систем законов сохранения» (СЗС).

Непосредственным предшественником технологии НКК, по-видимому, можно считать системную динамику Дж. Форрестера, см., например, [1]. Это направление развилось во многих направлениях, включая использование в социально-экономическом моделировании обыкновенных дифференциальных уравнений, как за рубежом, так и в СССР/РФ, см., например, отечественные публикации [2-4] и интернет-ресурсы ИСА РАН. Еще одним примером данной направленности является школа имитационного моделирования в среде Anylogic, https://www.anylogic.ru/resources/articles, где, в том числе, обсуждаются проблемы комбинации методов системной динамики и агентного моделирования (агентное моделирование активно развивается, например, в ЦЭМИ РАН). Следующий шаг был сделан Б. Коско, который ввел концепцию НКК, [5]. В настоящее время теория и практика НКК интенсивно развиваются, см., например, [6-12], но, в первую очередь, как эмпирический инструмент для моделирования социально-технических проблем в условиях нечеткости. В настоящей работе мы предлагаем уделить основное внимание математическим структурам, которые могут быть использованы в НКК, и их связи с НС. Теория СЗС также является хорошо зарекомендовавшей себя областью исследований, в качестве практического приложения она включает в себя различные проблемы газовой динамики, механики твердого тела, химических процессов и т.д.; см., например, [13-16]. Системы типа СЗС могут быть решены с помощью НС, а также использоваться для создания цифровых двойников, как, например, описано в [15]. Далее в статье на основе вариационного подхода к системам СЗС мы иллюстрируем возможность введения новой нетрадиционной функции ошибки, которая учитывает характерные свойства решений и, вообще говоря, может обеспечить большую робастность метода НС по сравнению с другими численными методами.

Таким образом, оказывается теоретически возможным создать структуру нейросетевого типа для моделирования, например, функционирования городской среды, где сочеталось бы

детальное моделирование разнородных процессов, например, социальных (при недостатке данных) и производственных.

1. Расширенная интерпретация нечетких когнитивных карт. Как правило, НКК представляет собой орграф со значениями (какой-либо природы), присвоенными вершинам (понятиям) и ребрам (отношениям), и правилами для вычисления этих значений. При этом значения (веса) нормализуются для того, чтобы удовлетворять условиям, обычно предъявляемым к функциям принадлежности в нечетких системах.

Понятие веса имеет основу в нечеткой логике. Рассмотрим простейший элемент НКК: две вершины (концепты) A_1 и A_2, соединенные ребром с определенным числовым весом a_{12}. При этом концепты принадлежат определенной предметной области и принимают определенный набор качественных значений, которые выражаются в виде функций принадлежности. Связь интерпретируется как причинно-следственная, и сила этой связи заключается в уровне зависимости между функциями принадлежности. А именно, нечеткие концепты A_1 и A_2 имеют функции принадлежности $A_1(x), A_2(x): X \to [-1,1]$, где $x \in X$ – данная предметная область. Множество нечетких подмножеств A_2 определено, как $\mathbb{F}(A_2) = \{B(x), x \in X : B(x) \le A_2(x), x \in X\}$, но само это множество все еще четкое, и из концепта B (чьей характеристикой является функция принадлежности $B(x)$) концепт A_2 следует четким образом. Иначе говоря, в случае $A_1 \in \mathbb{F}(A_2)$ два нечетких концепта следуют один из другого четким образом, но причинно-следственная связь имеет нечеткий характер, т.е. $A_1 \in \mathbb{F}(A_2)$ с некоторой степенью. Данное наблюдение является базисом для введения понятия нечеткого множества всех подмножеств нечеткого множества A_2 – $\Pi(A_2)$, а именно, $\Pi(A_2)$ определяется как функция на $\mathbb{F}(X)$, т.е. $\Pi(A_2): \mathbb{F}(X) \to [0,1]$ и $\Pi(A_2)(A_1)$ представляет собой некоторую меру того, насколько A_1 является нечетким подмножеством A_2. Конкретные меры могут быть различными, что обусловливает неоднозначность введенного понятия. На практике вводятся различные меры того, насколько сильно график $A_1(x)$ «лежит ниже» графика $A_2(x)$. Наиболее простым способом выразить взаимоотношение между $A_1(x)$ и $A_2(x)$ можно, вводя числовую характеристику a_{12}, которая и есть вес.

Однако с точки зрения структуры СС имеет значение наличие концептов, связей между ними и весов, приписываемых этим объектам, которые, в общем случае, могут иметь как числовую, так и функциональную форму. Конкретный характер связей не так важен. Числовые значения весов используются чаще всего. Как правило, для их получения на практике описанная выше теоретическая конструкция непосредственно не используется. Широко применяются экспертные методы или методы, связанные с введением лингвистических переменных и правил нечеткого вывода с соответствующими процедурами фаззификации и дефаззификации. Другое направление, более близкое к проблематике НС, предполагает получение весов с использованием алгоритмов обучения как с учителем (с входными и выходными наборами данных), так и без учителя (алгоритмы адаптации весов). Мы не будем останавливаться на этом вопросе более подробно.

В рамках данной статьи сосредоточимся на особенностях математической структуры НКК независимо от природы концептов и на связи структуры СС и свойств процедуры вычисления значений (весов) этих концептов (элементов).

Представим СС как набор элементов (вершин) $\boldsymbol{A}=\{A_j, j=1,...,N\}$, которые связаны отношением зависимости. Это отношение определяется как множество $\boldsymbol{E}$ упорядоченных пар $e_{ij}\equiv(A_i, A_j)$. Каждую такую пару назовем ребром. Каждому ребру припишем некоторый числовой вес a_{ij}, то есть рассматриваемая СС представляет собой взвешенный орграф $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{E})$. Отметим кратко, что, вообще говоря, значения весов вершин и ребер не обязательно должны иметь числовой характер. В отличие от традиционных формулировок мы не налагаем в данный момент на значения A_j и a_{ij} каких-либо нормализующих ограничений (как, например, для функций принадлежности или вероятностных мер). Обозначим $V_{A_j}=\{i: e_{ij}\in\boldsymbol{E}\}$ и предположим, что каждой вершине соответствует некоторая функция/функционал $A_j=\Phi_j(\{A_k, a_{kj}\}), k\in V_{A_j}$. Тогда множество Φ_j позволяет рассчитать значения множества вершин A_j, если известны значения вершин, от которых A_j зависит, и веса соответствующих связей. Такую комбинацию орграфа и определенной на нем вычислительной процедуры можно рассматривать как некоторую НС. На типичной НС также определена некоторая вычислительная процедура, но соответствующий граф имеет древовидную структуру. В нашем же случае структура графа может включать и циклы, которые, как будет показано ниже, имеют важное значение для вводимых характеристик СС. Поэтому здесь нас будут интересовать свойства СС, которые можно получить на основе свойств введенной вычислительной процедуры. В качестве иллюстрирующего примера определим последовательно характеристику «степень влияния вершин».

Пусть для некоторых $j=\omega_1,...,\omega_\Omega$ $V_{A_j}=\varnothing$. Это означает, что вершины $A_{\omega_1},...,A_{\omega_\Omega}$ являются входными параметрами, и значения других вершин могут быть, вообще говоря, выражены через значения этих входных вершин, то есть $A_j=F_j(A_{\omega_1},...,A_{\omega_\Omega}),\ j\neq\omega_1,...,\omega_\Omega$. Здесь F_j могут быть как функциями, так и функционалами.

Пусть теперь для простоты все рассматриваемые значения представляют собой действительные числа, то есть F_j являются функциями.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. Назовем СС совместной, если функции F_j определены для всех $j\neq\omega_1,...,\omega_\Omega$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 2. Значение $\left|\partial F_j/\partial A_{\omega_k}\right|$ назовем степенью влияния входной вершины с номером ω_k на вершину с номером j.

Предположим теперь, что Φ_j являются линейными функциями. Тогда вычислительная система на орграфе $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{E})$ выглядит следующим образом:

$$A_j=\sum_{i=1}^{N}a_{ij}A_i\ ,\ j=1,...,N. \tag{1}$$

Пусть для $j=1,...,n_1$ $a_{ij}=0\ \forall i$, то есть для вершин A_j, $j=1,...,n_1$ нет входящих ребер, и, значит, эти вершины являются входными. Выделяя такие вершины, преобразуем (1) к виду

$$A_j=\sum_{i=1}^{n_1}a_{ij}A_i+\sum_{i=n_1+1}^{N}a_{ij}A_i\ ,\ j=n_1+1,...,N. \tag{2}$$

Выполняя простые алгебраические преобразования и, возможно, перенумерацию в (2), приходим к следующим уравнениям:

$$\sum_{i-n_1=1}^{m} \alpha_{ij} A_i = R_j \ , \ j - n_1 = 1,...,m, \tag{3}$$

где $\alpha_{ij} \equiv \delta_{ij} - a_{ij}$, $i, j = n_1 + 1,...,N$; $R_j \equiv \sum_{i=1}^{n_1} a_{ij} A_i$, $j = n_1 + 1,...,N$; $m \equiv N - n_1$. Обозначим также $\{\alpha_{ij}\} \equiv \Lambda$. Тогда в соответствии с Определением 1 СС совместна, если система уравнений (3) разрешима, то есть $\det \Lambda \neq 0$.

Рассчитаем степень влияния входных вершин на другие вершины в соответствии с Определением 2 и продемонстрируем связь этого показателя со структурой СС. Из системы (3) можно получить (при условии разрешимости (3)) выражения для функций F_j, которые при выполнении наших предположений будут линейными. Из стандартных формул Крамера следует, что $A_i = \det \Lambda_i / \det \Lambda$, $i = 1,...,m$, где Λ_i представляет собой матрицу Λ, в которой строка i заменена вектором $\{R_j\}$. Вектор $\{R_j\}$ содержит линейную комбинацию входных вершин, обозначим их через $\bar{A}_l, l = 1,...,n_1$. Тогда можно написать

$$A_i = \frac{\det \Lambda_i}{\det \Lambda} = \sum_{l=1}^{n_1} \frac{F_{il}}{\det \Lambda} \bar{A}_l, \tag{4}$$

где F_{il} представляют собой некоторые коэффициенты, которые зависят от значений матрицы смежности $\{a_{ij}\}$ исходного орграфа. Поэтому в соответствии с Определением 2 величина $|F_{il} / \det \Lambda|$ является степенью влияния входной вершины $\bar{A}_l$ на вершину A_i. Поскольку $\det \Lambda$ в (4) присутствует в характеристике степени влияния для всех i, он может не учитываться при сравнении степеней влияния на разные вершины. Более того, ниже, как правило, будет использоваться нормализованное выражение для степени влияния, а именно, отношение $|F_{il}| / \max_{(i,l)} |F_{il}|$. В этом случае значение $\det \Lambda$ также не важно.

Ниже будет сформулировано правило для вычисления коэффициентов F_{il}, которое зависит от геометрии орграфа, то есть от структуры СС (количество и вес путей, соединяющих две вершины, наличие циклов и их вес). Обоснование этого правила на математическом уровне строгости и детальное описание его использования приведены в [17]. Здесь мы ограничимся эвристическим уровнем изложения.

Обозначим первоначальный граф через $\boldsymbol{A}$, его матрицу смежности – через $\{a_{ij}\}$. Далее построим орграф $\hat{\boldsymbol{A}}$ с матрицей смежности $\{\alpha_{ij}\}$, который состоит из тех вершин $\{A_i, i = 1,...,m\}$ первоначального графа $\boldsymbol{A}$, которые не являются входными. Соответствующие ребра графа $\boldsymbol{A}$ сохраняются и в графе $\hat{\boldsymbol{A}}$, но, кроме того, дополнительно, ввиду соотношений (3) значения $\alpha_{ii}, i = 1,...,m$, вообще говоря, окажутся не нулевыми, то есть каждая вершина $\hat{\boldsymbol{A}}$ соединена сама с собой, представляя собой, таким образом, цикл. Наконец, рассмотрим орграф $\hat{\boldsymbol{A}}_{i+}$, который отличается от $\hat{\boldsymbol{A}}$ тем, что вершина A_i соединена со всеми остальными вершинами, даже если соответствующей связи не было в графе $\hat{\boldsymbol{A}}$. Из последующего будет ясно, что значения весов этих новых ребер не важны, важно только наличие связи.

Для того, чтобы определить коэффициенты F_{il}, которые характеризуют степень влияния входной вершины $\bar{A}_l$ на другую вершину A_i, необходимо воспользоваться следующим Правилом.

ПРАВИЛО. Построим граф $\hat{\boldsymbol{A}}_{i+}$ из графа $\hat{\boldsymbol{A}}$. Найдем все разбиения на циклы вершин графа $\hat{\boldsymbol{A}}_{i+}$. По крайней мере, одно разбиение всегда существует, т.к. в соответствии со структурой графа $\hat{\boldsymbol{A}}$ каждая его вершина представляет собой цикл. Коэффициент F_{il} будет равен сумме мономов весов, каждый из мономов соответствует одному разбиению на циклы. Веса мономов конструируются в два шага: 1) перемножаются веса всех ребер, входящих в данное разбиение на циклы, и этому моному присваивается знак, равный $(-1)^{m+L}$, где m – число вершин в графе $\hat{\boldsymbol{A}}_{i+}$, а L – число циклов в рассматриваемом разбиении; 2) в полученном мономе определяется цикл, содержащий вершину A_i, и значения α_{is} заменяются значениями a_{ls} из матрицы смежности первоначального графа $\boldsymbol{A}$.

Описанный алгоритм позволяет определять степени влияния входных вершин на другие на основе топологии орграфа и понимать, какие входные факторы СС более важны для других факторов. В следующем разделе мы проиллюстрируем характер возможного анализа при помощи понятия степени влияния на нескольких простых примерах.

2. Простые примеры использования характеристики степени влияния. Конкретное приложение описанной выше методики было рассмотрено в [18] на примере влияния распространения вирусной инфекции на модельную социально-экономическую среду. Другое применение для российской экономической структуры содержится в [19]. В этом разделе мы рассмотрим еще два примера простых моделей, касающихся вопросов энергетики и геополитики. На рисунках ниже круги изображают входные факторы, а прямоугольники – другие факторы (отражают элементы функционирования СС, часть может рассматриваться как целевые факторы). Все наборы весов получены при помощи экспертных оценок.

2.1. Глобальная энергетическая система. Вначале рассмотрим модельную систему, связанную с мировой энергетикой, рис. 1. Обозначения: 1 ВВП – фактор экономического развития, характеризуемого ростом ВВП; 2 ППЭ – потребление первичной (непосредственно извлекаемой из окружающей природы) энергии; 3 СПЭ – спрос на первичную энергию; 4 ЧН – численность населения; 5 ФК – факторы качества, отражают не так давно возникшие требования использования чистой, «зеленой», энергии; 6 ВШ – внешний шок, например, эпидемия коронавируса, который ведет к резкому сокращению потребления первичной энергии в краткосрочной перспективе. Система, представленная на рис. 1, является довольно простой, соответствующий граф $\hat{\boldsymbol{A}}$, в дополнение к тривиальному разбиению на циклы (всегда существующему и состоящему из совокупности циклов каждой вершины $\hat{\boldsymbol{A}}$), имеет только одно разбиение, которое включает все вершины $\hat{\boldsymbol{A}}$. Табл. 1 содержит результаты расчетов нормализованной степени влияния для нескольких вариантов значений весов ребер, которые характеризуют различные состояния глобальной энергетической системы.

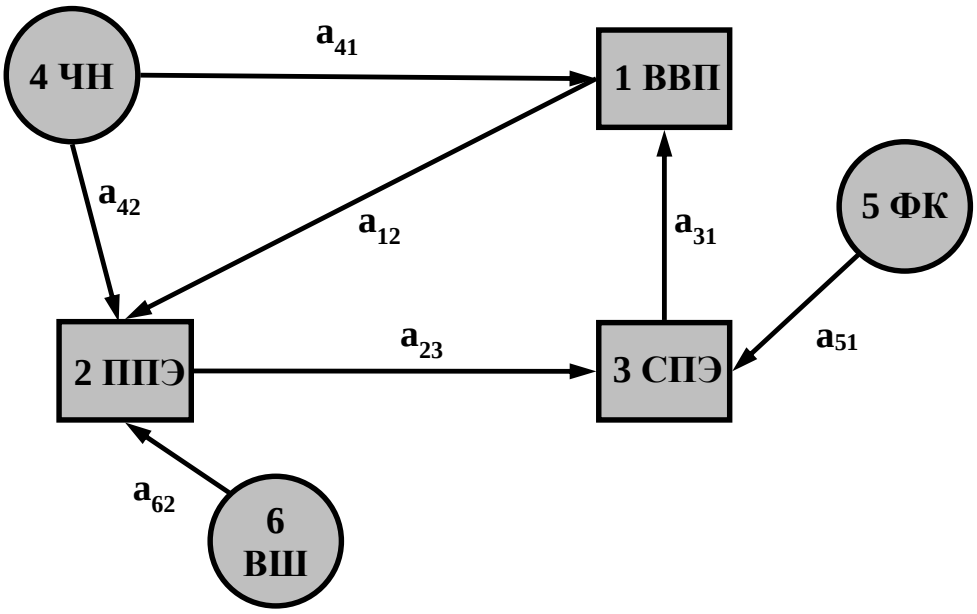


Рис. 1. Основные факторы глобальной энергетической системы

Для энергетической системы конца XX века основное влияние на внутренние компоненты системы оказывает фактор 4 ЧН, т.е. необходимость удовлетворения потребностей растущего населения в энергии. Степень влияния на все три внутренних фактора примерно одинакова, что обеспечивает сбалансированность системы, в частности баланс спроса и предложения энергии.

Таблица 1. Нормализованная степень влияния факторов в системе глобальной энергетики

• Энергосистема конца XX века: a_{31}=0,5; a_{41}=0,5; a_{12}=0,7; a_{42}=0,3; a_{62}=0; a_{23}=0,9; a_{53}=0,1			
•	• 4 ЧН	• 5 ФК	• 6 ВШ
• 1 ВВП	• 0.977	• 0.077	• 0
• 2 ППЭ	• 1.000	• 0.054	• 0
• 3 СПЭ	• 0.900	• 0.154	• 0
• «Зеленая» энергосистема: a_{31}=0,5; a_{41}=0,5; a_{12}=0,7; a_{42}=0,3; a_{62}=0; a_{23}=0,5; a_{53}=0,5			
•	• 4 ЧН	• 5 ФК	• 6 ВШ
• 1 ВВП	• 0.885	• 0.385	• 0
• 2 ППЭ	• 1.000	• 0.269	• 0
• 3 СПЭ	• 0.500	• 0.769	• 0
• «Зеленая» энергосистема и внешний шок: a_{31}=0,5; a_{41}=0,5; a_{12}=0,2; a_{42}=0,3; a_{62}=0,5; a_{23}=0,5; a_{53}=0,5			
•	• 4 ЧН	• 5 ФК	• 6 ВШ
• 1 ВВП	• 1.000	• 0.435	• 0.217
• 2 ППЭ	• 0.696	• 0.087	• 0.870
• 3 СПЭ	• 0.348	• 0.870	• 0.435

В современных условиях («зеленая» энергетическая система) фактор 5 ФК заметно увеличивает свое влияние, что отражает тенденцию к усиленному развитию новой, в частности возобновляемой, энергетики. В этой ситуации нарушается баланс спроса и

предложения энергии. Рост населения, как таковой, не обеспечивает предложения, эквивалентного спросу. Необходимо учитывать фактор качества, который оказывает более сильное влияние на спрос, чем население, то есть может возникнуть ситуация превышения спроса над предложением и наоборот, что может привести к заметным колебаниям цен. В целом система получается нестабильной, но с возможностью регулирования ее поведения путем поиска правильной комбинации входных факторов. Когда к системе добавляется внешний шок, численность населения наиболее сильно влияет на потребность в развитии экономики в целом (фактор 1 ВВП). Спрос и предложение на энергию снова находятся в дисбалансе, и чтобы сбалансировать эти факторы, необходимо повлиять на внешний шок (фактор 6 ВШ), чтобы скорректировать спрос, и на развитие «зеленой» энергетики (фактор 5 ФК), чтобы скорректировать предложение. В то же время становится желательным замедлить рост населения (фактор 4 ЧН).

2.2. Система геополитического равновесия. Теперь кратко рассмотрим систему геополитического равновесия, рис. 2. Здесь важной особенностью является наличие петель у игроков; веса петель характеризуют уровень самодостаточности игрока в проведении собственной политики. Обозначения: 1 Си – фактор сильного геополитического игрока (высокий уровень самодостаточности – вес близок к 1); 2 Ср – фактор геополитического игрока средней силы; 3 Сл – слабый геополитический игрок; 4 ЭБ – фактор существования режима экономического благоприятствования; 5 Рес – фактор доступности сырьевых ресурсов.

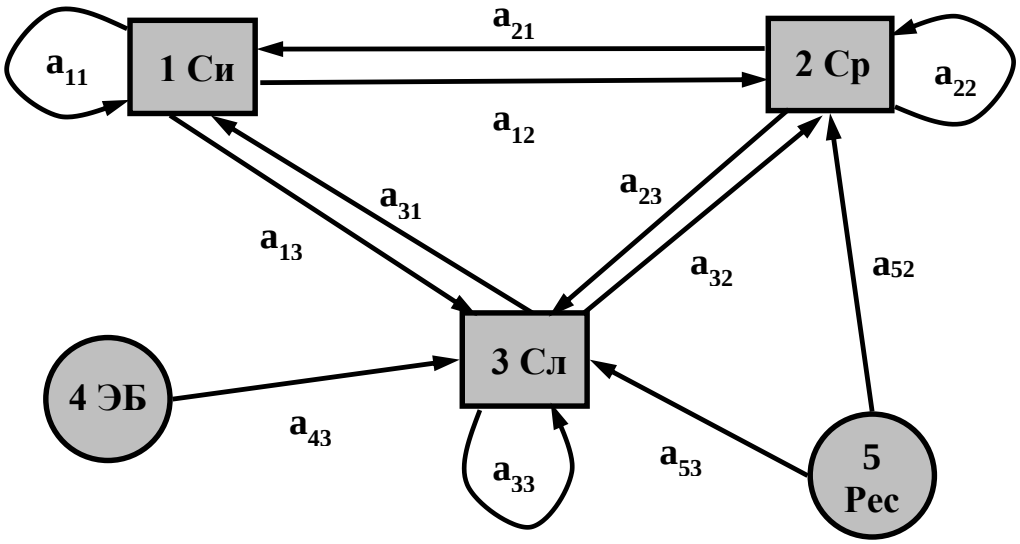


Рис. 2. Схема конфронтации трех геополитических сил

Граф $\hat{\boldsymbol{A}}$ системы на рис. 2 представляет собой полный граф из трех элементов и содержит три разбиения на циклы, в дополнение к тривиальному разбиению. В табл. 2 ниже представлен вариант весов ребер, который характеризует некоторую абстрактную геополитическую систему.

Таблица 2. Нормализованная степень влияния факторов в схеме геополитического равновесия

• a_{11}=0,85; a_{21}=0,1; a_{31}=0,05; a_{22}=0,15; a_{12}=0,2; a_{32}=0,05; a_{52}=0,6; a_{33}=0,05; a_{13}=0,1; a_{23}=0,05; a_{43}=0,4; a_{53}=0,4		
	• 4 ЭБ	• 5 Рес
• 1 Си	• 0.212	• 0.866

• 2 Ср	• 0.078	• 1.000
• 3 Сл	• 0.480	• 0.598

Кратко опишем расчетное распределение влияния в системе на рис. 2. Как сильный, так и слабый игрок существенно зависят от баланса обоих входных факторов, зависимость сильного игрока от фактора экономического благоприятствования (4 ЭБ) заметно меньше, чем у слабого игрока. Наиболее стабильное положение у среднего игрока, который зависит в основном только от фактора сырьевых ресурсов (5 Рес), наименее стабильное положение у слабого игрока, для которого совокупность каждого из рассматриваемых входных факторов может привести к серьезным последствиям.

3. Вариационный подход для систем законов сохранения. При моделировании социально-экономической системы структура макроуровня может быть отражена, например, с помощью описанного варианта метода НКК, но, в соответствии с ситуацией, описанной во Введении, мы предполагаем, что необходимо более детально отразить определенные конкретные элементы, особенно для элементов, отвечающих за описание технологических процессов. Часто метод решения дифференциальных уравнений является подходящей методологией. Здесь мы остановимся на одном из популярных представителей – квазилинейных системах СЗС. Решать такие системы методом НС удобно из-за наличия в настоящее время большого количества данных [20] и потому, что это позволяет включить такое решение в общую схему использования НКК и создать единую методологию моделирования совокупной социально-экономической системы. Одной из характерных особенностей решений квазилинейных СЗС является появление особенностей в решениях. Соответствующий НС метод должен учитывать это. Для этого выведем такую функцию ошибки, чтобы она учитывала возможные особенности решения.

Рассмотрим задачу Коши для системы многомерных квазилинейных уравнений общего вида:

$$\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})+\sum_{j=1}^{m}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\boldsymbol{F}_j\left(\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})\right)\right)=0 \quad , \quad \boldsymbol{U}(0,\boldsymbol{x})=\boldsymbol{U}_0(\boldsymbol{x}), \tag{5}$$

где $(t,\boldsymbol{x})\in\Pi_T\equiv\left\{(t,\boldsymbol{x}):(t,\boldsymbol{x})\in[0,T]\times\mathbb{R}^m\right\}$, $\boldsymbol{U}(t,x)=\left(u_1(t,\boldsymbol{x}),...,u_n(t,\boldsymbol{x})\right)$,

$$(t,\boldsymbol{x})\equiv(t,x_1,...,x_m),\ \boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x}):\mathbb{R}^+\times\mathbb{R}^m\to\mathbb{R}^n,$$

и $\boldsymbol{F}_j=\left(f_{1j},...,f_{nj}\right)$ *есть достаточно гладкие вектор-функции* переменных $(u_1,...,u_n)$. Здесь и далее векторные величины в формулах будут выделены жирным шрифтом. Кроме того, многомерные интегралы по пространствам многих переменных и по поверхностям в этих пространствах будут записываться как одинарные или двойные интегралы, чтобы сократить запись, если это не приводит к двусмысленности.

Ввиду возможности присутствия разрывов в системе (5) ее решения понимаются в обобщенном смысле, т.е. должно выполняться следующее интегральное тождество:

$$\iint\limits_{\Pi_T}\left[\boldsymbol{U}\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\sum_{j=1}^{m}\boldsymbol{F}_j(\boldsymbol{U})\frac{\partial\varphi}{\partial x_j}\right]d\boldsymbol{x}dt+\int\limits_{\mathbb{R}^m}\boldsymbol{U}_0\varphi(0,\boldsymbol{x})\,d\boldsymbol{x}=0 \tag{6}$$

для всех бесконечно дифференцируемых $\varphi(t,\boldsymbol{x})$ с компактным носителем по пространственным переменным. Пусть $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$ является непрерывно дифференцируемой функцией за исключением некоторой гиперповерхности $\Omega\subset\mathbb{R}_+\times\mathbb{R}^m$ коразмерности 1 с вектором внешней нормали $(n_0,n_1,...,n_m)$. Предположим также, что вдоль этой гиперповерхности $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$ имеет разрыв и вдоль Ω определены значения $\boldsymbol{U}^{\pm}=\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x}\pm0)$.

Тогда для того, чтобы удовлетворялось (5) в смысле (6), должны выполняться соотношения Ренкина-Гюгонио

$$\left(\boldsymbol{U}^{-}-\boldsymbol{U}^{+}\right)n_0+\sum_{j=1}^{m}\left(\boldsymbol{F}_j\left(\boldsymbol{U}^{-}\right)-\boldsymbol{F}_j\left(\boldsymbol{U}^{+}\right)\right)n_j=0. \tag{7}$$

Дополнительно, для обеспечения единственности решений (5), должно еще выполняться какое-либо энтропийное условие, но мы не будем на этом здесь останавливаться.

Подход, который будет кратко описан ниже, также представлен в [21]. Вначале рассмотрим одномерный случай. Пусть $m=1$, рассмотрим вместо функции $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$ функционал $\boldsymbol{J}:\chi(\tau)\in C_X^1\to\mathbb{R}^n$, $C_X^1\equiv C^1\left([0,T],[-X,X]\right)$

$$\boldsymbol{J}\equiv\int_0^T\boldsymbol{L}(\dot{\chi},\boldsymbol{U})\,d\tau\,;\ \boldsymbol{L}(\dot{\chi},\boldsymbol{U})\equiv\boldsymbol{U}(\tau,\chi(\tau))\dot{\chi}(\tau)-\boldsymbol{F}\circ\boldsymbol{U}(\tau,\chi(\tau)). \tag{8}$$

УТВЕРЖДЕНИЕ 1. Пусть $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$ принадлежит к некоторому удобному классу функций, пусть $\chi_{extr}(t)\in C_X^1$ есть такая траектория, что вдоль нее $\delta\boldsymbol{J}=0$. Тогда в тех точках $x=\chi_{extr}(t)$, где $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$ является гладкой, система (5) удовлетворяется в классическом смысле, в других случаях выполнено соотношение Ренкина-Гюгонио (7), $m=1$. Более того, выражение $\delta^2\boldsymbol{J}$ вдоль $x=\chi_{extr}(t)$ содержит только члены с $(\delta\chi)^2$ (квадратичная форма не содержит члены с $\delta\dot{\chi}$).

Теперь модифицируем функционал $\boldsymbol{J}$. Рассмотрим функцию $\boldsymbol{V}(t,x)\equiv\int^x\boldsymbol{U}(t,p)\,dp$ и функционал $\boldsymbol{I}:\chi(\tau)\in C\left([0,T],\mathbb{R}\right)\to\mathbb{R}^n$

$$\boldsymbol{I}\equiv\int_0^T\boldsymbol{M}(\boldsymbol{U})(\tau,\chi(\tau))\,d\tau\equiv\int_0^T\left[\frac{\partial\boldsymbol{V}}{\partial\tau}(\tau,\chi(\tau))+\boldsymbol{F}\circ\boldsymbol{U}(\tau,\chi(\tau))\right]d\tau. \tag{9}$$

УТВЕРЖДЕНИЕ 2. Пусть $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$ принадлежит к некоторому удобному классу функций, пусть вдоль $\chi_{extr}(t)\in C\left([0,T],\mathbb{R}\right)$ выполнено $\delta\boldsymbol{I}=0$. Тогда в тех точках $x=\chi_{extr}(t)$, где $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$ является гладкой, система (5) удовлетворяется в классическом смысле, в других случаях выполнено соотношение Ренкина-Гюгонио (7), $m=1$. Более того, свойство $\delta\boldsymbol{I}=0$ влечет непрерывность функции $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{U})$ на разрывах $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$, а величина $\delta^2\boldsymbol{I}$ определяется скачком $\partial\boldsymbol{M}(\boldsymbol{U})/\partial\tau$.

УТВЕРЖДЕНИЕ 3. Для обобщенных решений $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$ системы (5) функция $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{U})$ является непрерывной и не зависит от x.

Таким образом, для того, чтобы найти обобщенное решение (5), достаточно найти такую $\boldsymbol{U}(t,\boldsymbol{x})$ (удовлетворяющую начальным условиям), что выражение

$$\sup_t\left\{V_a^b\left(\boldsymbol{M}\circ\boldsymbol{U}(t,x)\right)\right\} \tag{10}$$

принимает свое минимальное значение. Здесь $V_a^b(\boldsymbol{W})$ обозначает вариацию функции $\boldsymbol{W}(t,x)$ по $x, x\in[a,b]$. Функция (10) и является желаемой функцией ошибки; мы рассматриваем вариацию непрерывной функции даже для разрывных решений. Обычно в качестве функции ошибки вычисляется выражение $\partial\boldsymbol{U}/\partial t+\partial\boldsymbol{F}(\boldsymbol{U})/\partial x$ (возведенное в квадрат или взятое по модулю и т.д.). Однако прямое вычисление производных, включенных в эту функцию ошибки, приводит к появлению дельтаобразных членов (поскольку в решении есть скачки),

балансировка которых может быть нетривиальной задачей. Поэтому удобно использовать выражение (10) в качестве функции ошибки. Функция $\boldsymbol{M} \circ \boldsymbol{U}(t,x)$, включенная в (10), не имеет скачков, и ее аппроксимация, так или иначе, может быть дифференцирована, что повышает регулярность функции ошибки.

В многомерном случае, даже и в двумерном, поведение обобщенных решений системы (5) выглядит гораздо сложнее. Тем не менее, описанный выше метод допускает обобщение и для многих пространственных переменных, которое мы проиллюстрируем на примере двумерного варианта системы (5), т.е. при $m=2$, $x_1 \equiv x, x_2 \equiv y, F_1 \equiv F, F_2 \equiv G$.

Пусть для простоты у функции $\boldsymbol{U}(t,x,y)$ имеется единственная непрерывно дифференцируемая поверхность разрыва Ω. Рассмотрим другую «тестовую» поверхность S, пересекающую Ω и заданную в виде $S(\tau,s) \equiv (t=\tau, x=\chi(\tau,s), y=\gamma(\tau,s))$, где s некоторый внутренний параметр. Введем функционал $\boldsymbol{J} : S(\tau,s) \in C^1([0,T]\times[0,1],\mathbb{R}^3) \to \mathbb{R}^n$, являющийся обобщением (8),

$$\boldsymbol{J} \equiv \iint_S \boldsymbol{U} dx \wedge dy + \boldsymbol{F}(\boldsymbol{U}) dy \wedge dt + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{U}) dt \wedge dx. \tag{11}$$

УТВЕРЖДЕНИЕ 4. Пусть $\boldsymbol{U}(t,x,y)$ принадлежит к некоторому удобному классу функций, и пусть непрерывно дифференцируемая поверхность S такова, что $\delta \boldsymbol{J} = 0$ вдоль нее. Тогда в тех точках S, где $\boldsymbol{U}(t,x,y)$ является гладкой, система (5) удовлетворяется в классическом смысле, в других случаях выполнено соотношение Ренкина-Гюгонио (7), $m=2$.

Наконец, рассмотрим обобщение (9). Обозначим $\boldsymbol{V}_1(t,x,y) \equiv \int^x \boldsymbol{U}(t,\omega,y) d\omega$, $\boldsymbol{V}_2(t,x,y) \equiv \int^y \boldsymbol{U}(t,x,\omega) d\omega$ и

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Phi}(t,x,y) &\equiv \frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{V}_1 + \boldsymbol{F}\left(\frac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{V}_1\right) + \frac{\partial}{\partial y}\int^x \boldsymbol{G}\left(\frac{\partial}{\partial s}\boldsymbol{V}_1(t,s,y)\right) ds, \\ \boldsymbol{\Psi}(t,x,y) &\equiv \frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{V}_2 + \boldsymbol{G}\left(\frac{\partial}{\partial y}\boldsymbol{V}_2\right) + \frac{\partial}{\partial x}\int^y \boldsymbol{F}\left(\frac{\partial}{\partial s}\boldsymbol{V}_2(t,x,s)\right) ds. \end{aligned} \tag{12}$$

УТВЕРЖДЕНИЕ 5. Для обобщенных решений системы (5), $m=2$, функция $\boldsymbol{\Phi}(t,x,y)$ непрерывна и не зависит от x, а функция $\boldsymbol{\Psi}(t,x,y)$ непрерывна и не зависит от y.

Функции (12) могут служить ориентиром для построения вариационных формулировок в двумерном случае, а также для поиска представления функционала (11). Свойства постоянства функций (12), то есть минимальности соответствующих вариаций, могут быть использованы при разработке численных алгоритмов для (5) на основе НС подходов.

Заключение. Таким образом, в данном исследовании рассматривается возможность создания подходов к единой методологии моделирования и построения информационной системы для СС, которые включают как слабо структурированные (например, социально-экономические подсистемы при недостатке информации), так и хорошо структурированные (например, модели конкретных физических процессов на уровне предприятия в структуре города или целой экономики) подсистемы. Для достижения такой цели предлагается использовать среду моделирования, представляющую из себя сложную НС, которая допускает в своем составе разнообразные циклы. Рассмотрена модификация технологии НКК для моделирования слабо структурированных подсистем с точки зрения более свободных и общих

принципов, чем это принято в большинстве современных исследований. Эта модификация учитывает топологию орграфа и заданную на нем вычислительную процедуру, позволяя рассматривать НКК как особый вид НС. Рассматривается только одна из многих возможных характеристик – степень влияния входных вершин – и только в относительно простой ситуации линейности основных соотношений. Представляется, что для рассмотрения сложных систем, содержащих сотни, а может быть, и тысячи элементов, такая более свободная интерпретация НКК будет полезна.

С другой стороны, включение уравнений в частных производных (а именно квазилинейных СЗС) в среду моделирования позволяет работать с конкретными элементами НКК, которые представляют собой, например, конкретные технологические процессы, используемые на предприятиях. В последнее время для решения таких систем уравнений активно используют методы искусственного интеллекта, в частности методы НС, несмотря на то, что было разработано большое количество эффективных разностных методов. Это связано с тем, что НС методы хорошо соответствуют методам работы с большими данными, которые теперь могут быть получены непосредственно из экспериментов или тестов. Предлагаемая вариационная постановка задачи нахождения обобщенных решений для квазилинейных гиперболических систем уравнений дает возможность построить специальную функцию ошибки, учитывающую особенности в решениях; таким образом, эта функция ошибки представляется более предпочтительной. Интересным фактом является также то, что такой подход имеет аналог в многомерном случае.

Возможность включения других известных технологий моделирования СС в описанную выше схему не рассматривалась. Это может составить предмет дальнейших исследований.

Благодарности. Автор благодарит А.И. Аптекарева, Б.Н. Четверушкина и В.П. Осипова за полезные обсуждения.

Список источников

1. Forrester J.W. Industrial dynamics. J.W. Forrester, M.I.T. Press, 1961, 464 p.
2. Геловани В.А. Исследование влияния управления на глобальную модель Форрестера, в кн. Проблемы кибернетики, вып. 31 / В.А. Геловани, В.А. Егоров, В.Б. Митрофанов [и др.] // М.: Наука, 1976. – С. 187-224.
3. Фрисман Е.Я. Системная динамика регионального развития: подходы к моделированию блока экономики / Е.Я. Фрисман, М.Ю. Хавинсон, С.В. Аносова [и др.] // Пространственная экономика, 2007. – № 3. – С. 134-146.
4. Резчиков А.Ф. Анализ и прогнозирование характеристик безопасности авиационных транспортных систем на основе уравнений системной динамики / А.Ф. Резчиков, В.А. Кушников, В.А. Иващенко [и др.] // Управление большими системами, 2016. – Вып. 64. – С. 27-48.
5. Kosko B. Fuzzy cognitive maps. International journal of man-machine studies, 1986, v.24, pp. 65-75.
6. Bakhtavar E., Valipour M. et al. Fuzzy cognitive maps in systems risk analysis: a comprehensive review. Complex & Intelligent Systems, 2021, v.7, pp. 621-637.
7. Четверушкин Б.Н. Факторная модель для исследования сложных процессов / Б.Н. Четверушкин, В.А. Судаков // Доклады РАН, 2019. – т. 489, № 1. – С. 17-21.
8. Федулов А.С. Модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт / А.С. Федулов, В.В. Борисов // Системы управления, связи и безопасности, 2016. – №. 1. – С. 66-80.
9. Groumpos P.P. Using fuzzy cognitive maps in analyzing and studying international economic and political stability. IFAC PapersOnLine, 2019, v. 52(25), pp. 23-28.
10. Papageorgiou K., Singh P.K., Papageorgiou E. et al. Fuzzy cognitive map-based sustainable socio-economic development planning for rural communities. Sustainability, 2020, v. 12(1), pp. 305.
11. Salmeron J.L., Palos-Sanchez P.R. Uncertainty propagation in fuzzy grey cognitive maps with Hebbian-like learning algorithms. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, v.49, no 1, pp. 211-220.
12. Заграновская А.В. Системный анализ на основе нечетких когнитивных карт / А.В. Заграновская // Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2018. – №. 4. – С. 152-160.
13. Dafermos C.M. Conservation laws in continuum physics, Volume 325 of Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften [Fundamental Principles of Mathematical Sciences]. Berlin.: Springer-Verlag, 2016, 826 p.

14. Hesthaven J.S. Numerical Methods for Conservation Laws: From Analysis to Algorithms. Philadelphia.: SIAM, 2018, 576 p.
15. Tarkhov D., Vasilyev A. Semi-empirical neural network modeling and digital twins development. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2020, 288 p.
16. Радкевич Е.В. Введение в обобщённую теорию неравновесных фазовых переходов и термодинамический анализ задач механики сплошной среды / Е.В. Радкевич, Е.А. Лукашев, Н.Н. Яковлев [и др] // М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2019. – 349 с.
17. Osipov V.P., Rykov Yu.G. On mathematical aspects of analyzing the structure of complex systems using weighted digraphs. Lobachevskii J Math, 2020, v.41, no. 11, pp. 2231-2238.
18. Осипов В.П. Математические аспекты понятия влияния в концепции когнитивного моделирования / В.П. Осипов, Ю.Г. Рыков, Б.Н. Четверушкин // Искусственный интеллект и принятие решений, 2021. – № 2. – С. 3-10.
19. Dranko O.I., Rykov Yu.G., Karandeev A.A. Structural analysis of large-scale socio-technical systems based on the concept of influence. IFAC-PapersOnline, 2021, v. 54, Issue 13, pp. 738-743.
20. Michoski C., Milosavljevic M., Oliver T. and Hatch D.R. Solving differential equations using deep neural networks. Neurocomputing, 2020, v. 399, pp. 193-212.
21. Rykov Yu.G. On the systems of conservation laws and on a new way to construct for them neural networks algorithms. Lobachevskii J Math, 2021, v. 42, no. 11, pp. 2642-2650.

Рыков Юрий Германович. *Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. AuthorID: 6602529933, SPIN: 3544-2509, ORCID: 0000-0003-1695-6202, rykov@keldysh.ru, 125047, Москва, Миусская пл., 4.*

UDC 519.876
DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.019

On the development of a hybrid analytical approach to modeling complex systems containing both weakly structured and well-structured subsystems

Yuri G. Rykov
Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS,
Russia, Moscow, *rykov@keldysh.ru*

Abstract. Currently, the methodology of artificial intelligence is gaining more and more applications. Neural networks (NN) attract a lot of attention. One of the main reasons for this is that the NN technology is, in a sense, universal. On the other hand, some other computer technologies, having the nature of artificial intelligence or others, also have the properties of universality. In the context of this article, these are technologies of fuzzy cognitive maps (FCM) and special systems of partial differential equations, so called “systems of conservation laws” (CL). All the approaches just mentioned are used to develop models of complex systems (CS), i.e. aggregates of a large number of elements with connections between them of various types. The specificity of the CL theory, which is able to model joint balances of various quantities on the level of physical processes, lies in the presence of nonlinear effects, such as the formation of singularities in solutions. The FCM technology allows for an extension of the original concept by B. Kosko with a wider range of interpretation. The article provides an illustration of how these technologies can be combined into a single methodology for creating a modeling medium for the CS based on the NN approach.

Keywords: complex systems, computer science, modeling media, fuzzy cognitive maps, weighted digraph, graph partitioning by cycles, conservation laws, variational representation, neural networks for conservation laws

Acknowledgements: The author is grateful to A.I. Aptekarev, B.N. Chetverushkin and V.P. Osipov for useful discussions.

References

1. Forrester J.W. Industrial dynamics. J.W. Forrester, M.I.T. Press, 1961, 464 p.
2. Gelovani V.A., Egorov V.A., Mitrophanof V.B., Piontkovski A.A. Issledovanie vliyaniya upravleniya na global’nujy model’ Forestera [Investigation of the influence of management on the global Forrester model]. Problemy kibernetiki [Problems of cybernetics], 1976, v. 31, pp. 187-224.

3. Frisman E.Ya., Havinson M.Yu., Anosova S.V. et all. Sistemnaya dinamika regional'nogo razvitiya: podhody k modelirovaniju bloka ekonomiki [Systemic dynamics of regional development: approaches to modeling the economic block]. Prostranstvennaya ekonomika [Spatial economy], 2007, no. 3, pp. 134-146.
4. Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivaschenko V.A. et all. Analiz i prognozirovanie harakteristik bezopasnosti aviacionnyh transportnyh system na osnove uravnenij sistemnoi dinamiki [Analysis and prediction of safety characteristics of aviation transport systems based on system dynamics equations]. Upravlenie bol'shimi sistemami [Large-scale systems control], 2016, v. 64, pp. 27-48.
5. Kosko B. Fuzzy cognitive maps. International journal of man-machine studies, 1986, v.24, pp. 65-75.
6. Bakhtavar E., Valipour M. et al. Fuzzy cognitive maps in systems risk analysis: a comprehensive review. Complex & Intelligent Systems, 2021, v.7, pp. 621-637.
7. Chetverushkin B.N., Sudakov V.A. Faktornaya model dlya issledovaniya slozhnyh processov [Factor model for the study of complex processes]. Doklady RAN [RAS reports], 2019, v.489, no. 1, pp. 17-21.
8. Fedulov A.S., Borisov V.V. Modeli sistemnoi dinamiki na osnove nechetkih relyacionnyh kognitivnyh kart [Models of system dynamics based on fuzzy relational cognitive maps]. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti [Systems of Control, Communication and Security], 2016, no. 1, pp. 66-80.
9. Groumpos P.P. Using fuzzy cognitive maps in analyzing and studying international economic and political stability. IFAC PapersOnLine, 2019, v. 52(25), pp. 23-28.
10. Papageorgiou K., Singh P.K., Papageorgiou E. et al. Fuzzy cognitive map-based sustainable socio-economic development planning for rural communities. Sustainability, 2020, v. 12(1), 305 p.
11. Salmeron J.L., Palos-Sanchez P.R. Uncertainty propagation in fuzzy grey cognitive maps with Hebbian-like learning algorithms. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, v.49, no. 1, pp. 211-220.
12. Zagranovskaya, A.V. Systemnyi analiz na osnove nechetkih kognitivnyh kart [System analysis based on fuzzy cognitive maps]. Vestnik REU im. I.G. Plekhanova [Vestnik of the Plekhanov RUE], 2018, v. 4, pp. 152-160.
13. Dafermos C.M. Conservation laws in continuum physics, Volume 325 of Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften [Fundamental Principles of Mathematical Sciences]. Berlin, Springer-Verlag, 2016, 826 p.
14. Hesthaven J.S. Numerical methods for conservation laws: from analysis to algorithms. Philadelphia, SIAM, 2018, 576 p.
15. Tarkhov D. and Vasilyev A. Semi-empirical neural network modeling and digital twins development. Cambridge, Massachusetts, Academic Press, 2020, 288 p.
16. Radkevich E.V., Lukashov E.A., Yakovlev N.N. [et al.]. Vvedenie v oboshennuju teoriju neravnoveshyh phazovyh perehodov I termodinamicheskii analiz zadach mechaniki sploshnoi sredy [Introduction to the generalized theory of non-equilibrium phase transitions and thermodynamic analysis of solid environment mechanics tasks]. Moscow, MGU im. Lomonosov MGU [Moscow, Lomonosov Moscow State University], 2019, 349 p.
17. Osipov V.P., Rykov Yu.G. On mathematical aspects of analyzing the structure of complex systems using weighted digraphs. Lobachevskii J Math., 2020, v.41, no. 11, pp. 2231-2238.
18. Osipov V.P., Rykov Yu.G., Chetverushkin B.N. Matematicheskie aspekty ponyatiya vliyaniya v koncepcii kognitivnogo modelirovaniya [Mathematical Aspects of the Concept of Influence in the Cognitive Simulations]. Artificial Intelligence and Decision Making, 2021, no. 2, pp. 3-10.
19. Dranko O.I., Rykov Yu.G., Karandeev A.A. Structural analysis of large-scale socio-technical systems based on the concept of influence. IFAC-PapersOnline, 2021, v. 54, Issue 13, pp. 738-743.
20. Michoski C., Milosavljevic M., Oliver T. and Hatch D.R. Solving differential equations using deep neural networks. Neurocomputing, 2020, v. 399, pp. 193-212.
21. Rykov, Yu.G. On the systems of conservation laws and on a new way to construct for them neural networks algorithms. Lobachevskii sournal of mathematics, 2021, v. 42, no. 11, pp. 2642-2650.

Yuri Germanovich Rykov. *Candidate of Physical and Mathematics, Senior Researcher at the Institute of Applied Mathematics named after M.V. Keldysh RAS. AuthorID: 6602529933, SPIN: 3544-2509, ORCID: 0000-0003-1695-6202, rykov@keldysh.ru, 125047, Moscow, Mius square, 4.*

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 22.11.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 07/14/2022; approved after reviewing 11/22/2022; accepted for publication 11/25/2022.

УДК 004.8:620.9
DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.020

Оценка устойчивости энергетических систем с применением методов машинного обучения

Массель Людмила Васильевна, Массель Алексей Геннадьевич,
Мамедов Тимур Габилович, Гаськова Дарья Александровна,
Цыбиков Алексей Ринчинович, Щукин Никита Игоревич
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *amassel@gmail.com*

Аннотация. В последнее время за рубежом вызывает большой интерес направление, определяемое термином “Resilience”, который переводится на русский язык как «устойчивость» или «упругость». В России исследования в этой области ведутся в основном в области технической устойчивости, в то время как в Западной Европе рассматривают это направление шире и включают в рассмотрение также экологическую, психологическую, социальную и экономическую устойчивость. Большое значение в исследованиях устойчивости имеют вопросы энергетической и экологической безопасности. В статье рассматривается подход к оценке устойчивости энергетических систем в рамках концепции ситуационного управления. Приводится обоснование необходимости применения методов машинного обучения и приводится пример использования этих методов для количественной оценки устойчивости.

Ключевые слова: устойчивость энергетических систем, ситуационное управление, LSTM-сети, прогнозирование параметров, топливно-энергетический комплекс

Цитирование: Массель Л.В. Оценка устойчивости энергетических систем с применением методов машинного обучения / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов, Д.А. Гаськова, А.Р. Цыбиков, Н.И. Щукин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 248-261. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.020.

Введение. В последнее время за рубежом вызывает большой интерес направление, определяемое термином “Resilience”, который переводится на русский язык как «устойчивость» или «упругость». В России исследования в этой области ведутся в основном в области технической устойчивости, в то время как в Западной Европе рассматривают это направление шире и включают в рассмотрение также экологическую, психологическую, социальную и экономическую устойчивость. Концепция устойчивости не имеет уникального определения, из-за ее широкого использования в разных областях с различными значениями и последствиями. Подходы к определению устойчивости (“Resilience”) подробно изложены в [1]. В представленном исследовании авторы придерживаются определения “Resilience”, приведенного Davoudi: «Устойчивость (Resilience) – это способность системы возвращаться к равновесию или устойчивому состоянию после возмущения, такого, как наводнения, землетрясения или другие стихийные бедствия, а также техногенные катастрофы, такие, как банковские кризисы, войны или революции» [2].

Большое значение в исследованиях устойчивости имеют вопросы энергетической и экологической безопасности. Участившиеся природные катаклизмы могут стать причиной чрезвычайных ситуаций, усугубляющихся вероятностью возникновения множественных аварий, в том числе каскадного характера, в энергетике, которая, в свою очередь, является одной из критических инфраструктур, напрямую влияющих на качество жизни населения. В исследованиях устойчивости энергетических систем предложено использовать адаптацию концепции ситуационного управления в аспекте энергетической безопасности [3]. Сама концепция была предложена и развивалась в 80-х гг. 20 столетия Д.А. Поспеловым.

Авторами выполнена интерпретация концепции ситуационного управления для исследований устойчивости энергетических систем [3]. Это дает основания для адаптации и применения в этих исследованиях всего спектра разработанных ранее методов, моделей и инструментальных средств.

1. Оценка устойчивости энергетических систем. Для проведения исследований по оценке устойчивости энергетических систем выполнена адаптация методов ситуационного управления. Приведем основные понятия, принятые в настоящем исследовании. $\{S_0\}$ – начальное или текущее состояние системы т.е. состояние системы до возмущающего воздействия; $\{E_i\}$ – i-й сценарий экстремальной ситуации (ЭкС), включающий факторы, в совокупности описывающие реализацию угрозы энергетической безопасности (ЭБ), т.е. набор возмущающих воздействий; $\{U_i\}$ – вектор управляющих воздействий для i-ого сценария экстремальной ситуации, причем отдельно выделяются $\{A\} = \{A_q, A_o, A_l\}$ – набор превентивных, оперативных и ликвидационных мероприятий, нейтрализующих или смягчающих последствия возмущающих воздействий $\{E_i\}$; $\{S_j\}$ – состояние системы после возмущающих воздействий $\{E_i\}$ с учетом реализации набора мероприятий $\{A_q\}$ и/ или $\{A_o\}$; $\{S_k\}$ – новое устойчивое состояние системы после реализации управляющих воздействий [3].

Оценку устойчивости энергетических систем предлагается осуществлять в рамках исследований энергетической безопасности, где оценка той или иной ситуации включает множество факторов и базируется на индикативном анализе и шкале: «норма» (нормальное функционирование), «предкризис» (критическая ситуация), «кризис» (чрезвычайная ситуация) [4]. Каждая из угроз ЭБ реализуется вследствие сочетания ряда факторов, влияющих на возникновение ЭкС. Качественная оценка ряда факторов, влияющих на возникновение ЭкС, была предложена как предварительная оценка перед проведением расчетов, а формализация постановки задачи когнитивного моделирования для исследований энергетической безопасности представлена в [5]. Индикативный анализ направлен на определение уровня энергетической безопасности, при этом должно выполняться соотношение:

$$I_N \le I_j < I_C, \qquad (1)$$

где I_N – значение индикатора, определяющее нормальный уровень энергетической безопасности, I_j – текущее значение индикатора, I_C – значение индикатора, определяющее кризисный уровень безопасности [5].

Исследования энергетической безопасности направлены, с одной стороны, на долгосрочное бездефицитное обеспечение потребителей требуемыми видами энергоресурсов, а с другой, на создание условий обеспечения энергоресурсами потребителей в условиях экстремальных ситуаций, т.е. ситуаций, вызванных угрозами ЭБ [6]. Эти аспекты охватываются прогнозными исследованиями топливно-энергетического комплекса (ТЭК) с учетом требований энергетической безопасности. Текущее исследование по оценке устойчивости энергетических систем включает второй из перечисленных аспектов. Исследования ТЭК с учетом требований энергетической безопасности в силу невозможности проведения натуральных экспериментов на работающих системах энергетики ТЭК проводятся с использованием экономико-математических моделей ТЭК [6]. В текущем исследовании выполнена адаптация применения комплекса вычислительных программ для поддержки исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса с учетом требований энергетической безопасности ПК «ИНТЭК-А» [7]. ПК «ИНТЭК-А» реализует модель оптимизации балансов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) по регионам России (с выделением субъектов РФ) в условиях возможных возмущений и представляет собой в математическом смысле классическую задачу линейного программирования, в содержательном смысле базируется на традиционной территориально-производственной модели ТЭК с блоками электроэнергетики, тепло-, газо- и углеснабжения, а также нефтепереработки – мазутоснабжения. При формализации ограничения указанной оптимизационной задачи записываются в виде системы линейных уравнений и неравенств [8].

Текущие исследования оценки устойчивости энергетических систем с применением методов ситуационного управления и ПК «ИНТЭК-А» включают описание состояния системы с использованием когнитивного моделирования и построения когнитивных моделей, и вычислительный эксперимент многовариантного сценария ЭкС на основе модели оптимизации балансов ТЭР, т.е. включают качественную и количественную оценку устойчивости энергетических систем. Интеграция качественной и количественной оценки обусловливается с одной стороны, сложностью проведения количественной оценки, основанной, как правило, на применении традиционных программных комплексов для решения таких задач, что характеризуется длительностью подготовки информации, формированием и корректировкой достаточно больших моделей для проведения вычислительных экспериментов. С другой стороны, применение когнитивных моделей, в частности, и семантического моделирования в целом позволяет лицам, принимающим решения, отбирать варианты, для которых необходимы детальное обоснование и количественный расчет, и не проводить расчет всех возможных вариантов. Этапы исследования устойчивости энергетических систем приведены далее.

2. Методика качественной и количественной оценки устойчивости энергетических систем. Исследования устойчивости энергетических систем направлены на выработку множества сценариев, отражающих варианты состояния энергетических систем и оценку устойчивости этого состояния с использованием индикативного анализа. Методика представлена в виде событийной карты [9] (рис. 1), что обусловлено высокой важностью последовательности этапов исследования, являющегося интеграцией качественного и количественного уровней. В этом случае событиями являются этапы методики, описание которых приведено в таблице 1.

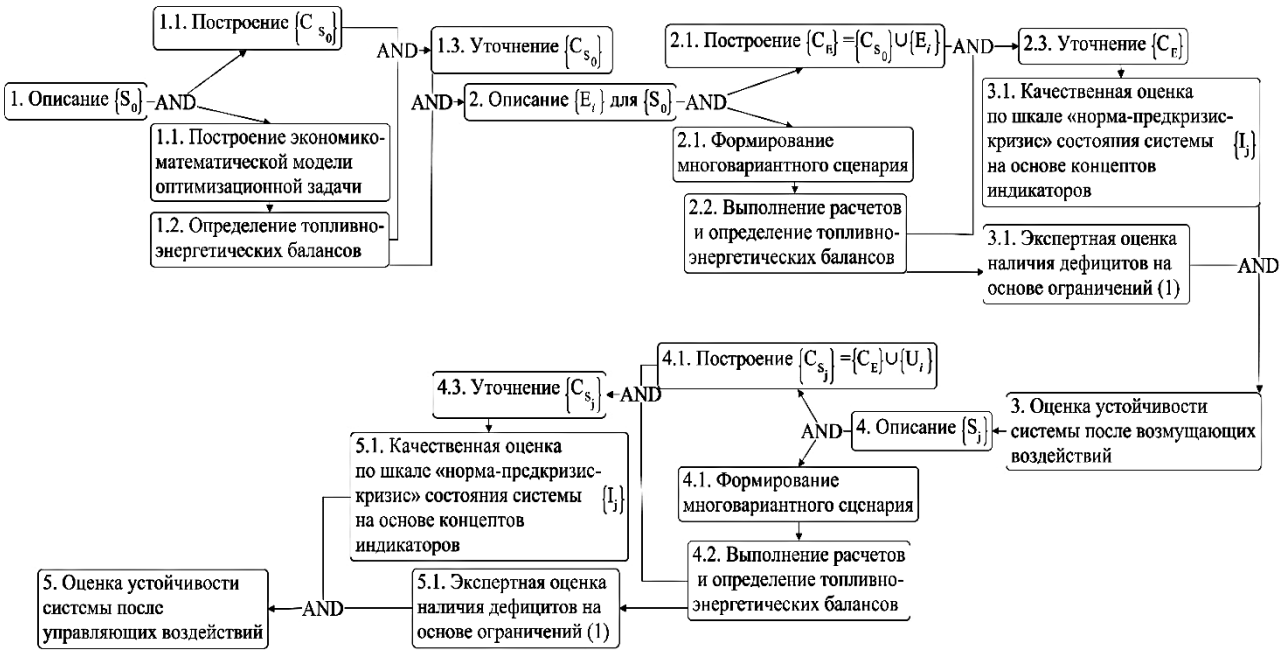


Рис. 1. Событийная карта методики оценки устойчивости энергетических систем

Таблица 1. Этапы методики качественной и количественной оценки устойчивости энергетических систем

№ п/п	Этап	№ п/п	Качественный уровень	№ п/п	Количественный уровень
1	Описание начального (текущего) состояния системы	1.1	Построение когнитивной модели начального (текущего) состояния системы, включающей множество факторов $\{C_{S_0}\}$	1.1	Построение экономико-математической модели оптимизационной задачи [8]

	т.е. формирование $\{S_0\}$	1.3	Уточнение значений факторов $\{C_{S_0}\}$ на основе балансовых таблиц	1.2	Определение топливно-энергетических балансов
2	Описание реализации набора возмущающих событий (угроз ЭБ) $\{E_i\}$для $\{S_0\}$	2.1	Построение когнитивной модели, включающей множество факторов $\{C_{S_0}\}$, $\{E_i\}$ и взаимосвязей между ними $\{C_E\} = \{C_{S_0}\} \cup \{E_i\}$	2.1	Формирование многовариантного сценария
		2.3	Уточнение значений концептов $\{C_E\}$ на основе балансовых таблиц	2.2	Выполнение расчетов и определение топливно-энергетических балансов
3	Оценка устойчивости системы после возмущающих воздействий	3.1	Качественная оценка по шкале «норма-предкризис-кризис» состояния системы на основе концептов индикаторов $\{I_j\}$	3.1	Экспертная оценка наличия дефицитов на основе соотношения (1)
	Переход к следующему этапу обусловлен тем, что соотношение (1) не выполняется				
4	Описание реализации управляющих воздействий т.е. формирование $\{S_j\}$	4.1	Построение когнитивной модели, включающей множество факторов $\{C_E\}$, $\{U_i\}$ ($\{A_i\}$) и взаимосвязей между ними $\{C_{S_j}\} = \{C_E\} \cup \{U_i\}$, $\{A_i\} \subset \{U_i\}$	4.1	Формирование многовариантного сценария
		4.3	Уточнение значений концептов $\{C_{S_j}\}$ на основе балансовых таблиц	4.2	Выполнение расчетов и определение топливно-энергетических балансов
5	Оценка устойчивости системы после управляющих воздействий $\{S_j\}$	5.1	Качественная оценка по шкале «норма-предкризис-кризис» состояния системы на основе концептов индикаторов $\{I_j\}$	5.1	Экспертная оценка наличия дефицитов на основе соотношения (1)
	Система в устойчивом состоянии при возвращении в $\{S_0\}$ либо переходе к $\{S_k\}$. В случае невыполнения соотношения (1) возвращение на этап 4.				

Приведем пояснение к таблице 1. $\{S_0\}$ формируется как оптимизационная модель ТЭК за исследуемый период и описывается факторами когнитивной модели, соответствующими переменным оптимизационной модели ТЭК $\{C_{S_0}\}$, включая $\{I_j\}$. Множество $\{E_i\}$ формируется как совокупность количественных значений ограничений переменных и / или неравенств оптимизационной модели ТЭК и описывается факторами когнитивной модели, соответствующими возмущающим воздействиям, изменения значений которых влияют на параметры модели (ограничения переменных и / или неравенств). Множество $\{U_i\}$ формируется как совокупность количественных значений ограничений переменных и / или неравенств оптимизационной модели ТЭК и описывается факторами когнитивной модели, соответствующими наборам мероприятий, изменения значений которых влияют на параметры модели (ограничения переменных и / или неравенств). Множества $\{S_j\}$ и $\{S_k\}$ формируются как совокупность результатов вычислительного эксперимента оптимизационной модели ТЭК с заданными параметрами и описываются факторами когнитивной модели, соответствующими переменным оптимизационной модели ТЭК, возмущающим воздействиям и наборам мероприятий соответственно.

В рамках исследований устойчивости энергетических систем формируется начальное (текущее) состояние исследуемой энергетической системы для заданного прогнозируемого промежутка времени, соответствующего рассматриваемому промежутку времени возникновения возмущающего воздействия (угрозы ЭБ). Значения ограничений переменных и неравенств, используемых в исследовании, заранее неизвестны. Такими значениями, например, могут быть значения потребности некоторого района в определенном количестве

электроэнергии (э/э). В настоящее время значения этих параметров определяются экспертами, однако, это возможно и с применением методов машинного обучения для прогнозирования значений выбранных параметров исследуемой системы. При помощи когнитивного моделирования определяются концепты, описывающие возмущающие воздействия, влияющие на состояние системы. Влияние таких концептов количественно описывается в ограничениях переменных и неравенств оптимизационной модели ТЭК. Далее формируется и рассчитывается новый вариант состояния системы. Когнитивная модель дополняется факторами, соответствующими набору управляющих воздействий, а в ограничения переменных и неравенств оптимизационной модели ТЭК вносятся количественные значения, отражающие эти зависимости. Оценка устойчивости системы выполняется на основе расчета соответствующего индикатора ЭБ.

Постановка задачи применения машинного обучения в исследованиях устойчивости энергетических систем состоит в прогнозировании параметров (ограничений переменных или неравенств) в оптимизационной модели топливно-энергетического комплекса с целью количественного описания начального состояния системы $\{S_0\}$.

3. Применение машинного обучения в исследованиях энергетики. Методы машинного обучения широко используются при моделировании, проектировании и прогнозировании в энергетическом секторе. Зачастую задачами для машинного обучения в энергетике являются прогнозное моделирование анализа производства, потребления и спроса, а выбор этих методов обусловливается их точностью, эффективностью и скоростью [10]. В статье [10] выделены основные модели машинного обучения, часто используемые в энергетическом секторе для различных задач, в числе которых искусственные нейронные сети, многослойный перцептрон, экстремальное машинное обучение, метод опорных векторов, вейвлет-нейронная сеть, адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода, деревья решений, ансамбли методов и гибридные модели машинного обучения.

В энергетике методы машинного обучения применяются для решения таких задач, как: сокращение выборок данных, с использованием классификации расчетных состояний [11]; построение прогнозов процессов развития новых технологий возобновляемых источников энергии с использованием аппарата кривых обучения [12]; классификация нестационарных потоковых данных на основе модифицированного алгоритма случайного леса [13]; повышение эффективности прогнозирования электропотребления на основе автоматизации задачи коррекции моделей машинного обучения и повышения точности прогноза в условиях случайных эффектов [14, 15]; оперативно-технологическое управление электрическими сетями 10-110 кВ в рамках разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений «Искусственный диспетчер», которая основана на методах машинного обучения с подкреплением [16]; децентрализованное управление вторичным напряжением через преобразователи на основе алгоритма мультиагентного обучения с подкреплением [17]; краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе модели искусственных нейронных сетей и модели, основанной на методе опорных векторов, показавшей лучший результат прогнозирования в рассматриваемом исследовании [18].

Задача прогнозирования потребления электроэнергии с использованием моделей машинного обучения нацелено на повышение энергоэффективности и, следовательно, управление энергопотреблением, и обеспечение устойчивости.

3.1. Выбор модели машинного обучения. В соответствии с постановкой задачи в исследовании требуется прогнозировать временные ряды, соответствующие параметрам оптимизационной модели ТЭК для анализа состояния системы и определения управляющих воздействий. Архитектура искусственной нейронной сети (ИНС) LSTM широко применяется для предсказания временных последовательностей [19-21] и принадлежит к разновидности

архитектуры рекуррентных нейронных сетей (РНС). РНС – это вид нейронной сети, которая направлена на обработку последовательностей [22]. РНС имеет блоки краткосрочной памяти для запоминания информации предыдущих блоков, что и делает ее подходящей для предсказания последовательности данных. Блоки РНС рассматривают все входы как полезные и передают всю информацию следующему блоку, что порождает проблему обучения долгосрочным зависимостям в рекуррентных сетях. Основная проблема РНС при этом заключается в исчезновении или взрывоопасном росте градиента в процессе обучения методом обратного распространения ошибки. Однако, эту проблему удалось обойти при помощи LSTM-сетей [23]. Основным преимуществом LSTM-сети в сравнении с РНС является высокая работоспособность с большой длиной последовательности данных за счет способности различать долговременное и кратковременное состояния с помощью «вентилей» и вектора состояния [24]. Ещё одно преимущество LSTM-сети заключается в решении проблемы долгосрочной зависимости рекуррентной нейронный сети, которая не может сделать предсказание, основываясь на долговременной памяти, но может выдавать точные прогнозы, основанные на последней информации. LSTM-сеть по умолчанию может сохранять информацию в течение длительного периода времени, однако, эффективность использования LSTM-сети не повышается по мере увеличения количества входящих данных [23].

Учитывая достоинства LSTM-сети, она была выбрана в качестве модели машинного обучения для решения поставленной задачи.

4. Оценка устойчивости электроэнергетической системы Сибирского федерального округа (ФО) на примере угрозы маловодья. В качестве экспериментального исследования был выбран следующий пример. Опасным природным явлением, способным нанести существенный ущерб производству электроэнергии в Сибирском ФО, является маловодье на Ангаро-Енисейском каскаде ГЭС [25]. Выработка электроэнергии на этих станциях составляет в среднем 88 тыс МВт·ч в год или 46% от общей выработки электроэнергии в энергосистеме Сибири [26]. В примере рассматривается угроза маловодья, последствием которой является снижение генерации электроэнергии ГЭС на 0,976 млрд кВт·ч в год.

4.1. Расчет ограничений переменной потребления электроэнергии оптимизационной модели ТЭК с применением ИНС. Для проведения эксперимента требуется получить прогнозируемое значение потребления электроэнергии по Сибирскому ФО на период 1,5 года (01.01.2021-27.07.2022), которое необходимо в расчетах с применением программного комплекса «ИНТЭК-А» [6, 7]. Значение получено при помощи LSTM-сети.

Для обучающей выборки взяты исходные данные Системного оператора ЕЭС [27], находящиеся в открытом доступе, которые характеризуют потребление за период с 2017 год по 2021 год по Сибирскому федеральному округу. Обучающая выборка содержит значения суточного потребления электроэнергии в МВт·ч за период с 13.08.2017 по 31.12.2020, что соответствует 1207 объектам для обучения нейронной сети. Тестовая выборка составила 576 объектов. Выборки нормализированы в диапазоне от 0 до 1.

Программная реализация содержит 2 слоя LSTM и полносвязный слой. Первый и второй слои LSTM состоят из 128 нейронов каждый, среднеквадратическая ошибка используется в качестве функции потерь, а для уменьшения потерь используется оптимизатор “Adam”. Средства разработки программной реализации: язык Python. Примеры значений, полученные с помощью LSTM-сети, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты обучения с помощью LSTM-сети

Дата	Реальное значение	Прогнозируемые значения	Отклонение реального от ожидаемого, %
15.01.2021	689858	661115	4,17%
16.01.2021	676302	668687	1,13%
17.01.2021	665061	672160	1,07%
18.01.2021	669898	673462	0,53%
19.01.2021	676145	680864	0,70%
20.01.2021	684840	675875	1,31%
21.01.2021	687282	676024	1,64%
22.01.2021	682453	677059	0,79%
23.01.2021	677718	689504	1,74%
24.01.2021	678406	690401	1,77%
25.01.2021	699951	679903	2,86%
26.01.2021	706203	673599	4,62%
27.01.2021	692620	671048	3,11%
28.01.2021	682805	669570	1,94%

Прогноз потребления электроэнергии с помощью LSTM-сети представлен на рис. 1.

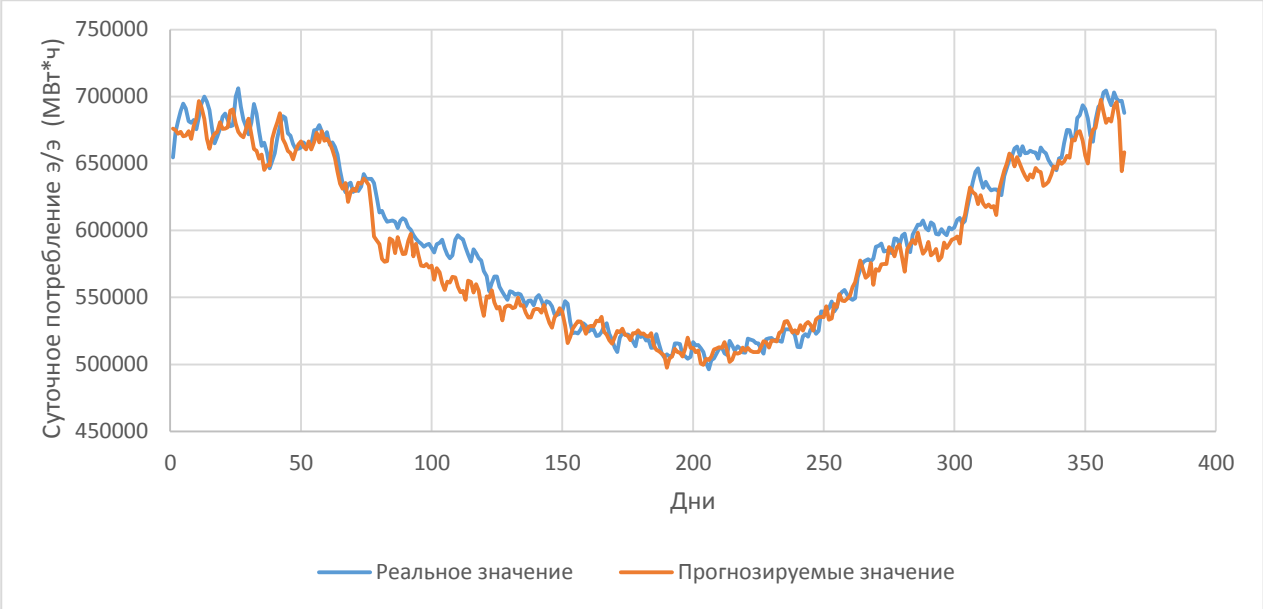


Рис. 1. Прогноз потребления электроэнергии с помощью LSTM-сети

Полученное прогнозируемое значение потребления электроэнергии Сибирским ФО равно 214,491 млрд кВт·ч. Реальное значение потребления за выбранный период равняется 217,546 млрд кВт·ч., при этом среднеквадратичное отклонение (RMSE) составляет 8887.09.

4.2. Применение результатов ИНС в исследованиях оценки устойчивости энергетических систем. Требуется оценить устойчивость электроэнергетической системы Сибирского федерального округа на период 1,5 года (01.01.2021-27.07.2022) в условиях маловодья на Ангаро-Енисейском каскаде ГЭС. Для этого используем методику, описанную в разделе 2. В качестве индикатора для этой задачи выбран индикатор (I_d), соответствующий относительной суммарной недопоставки видов ТЭР по федеральному округу за анализируемый период (электроэнергия), сформированный на основе перечня индикаторов ЭБ [28].

На первом этапе формируется экономико-математическая модель оптимизационной задачи. Модель включает в себя группы переменных, характеризующих производство, экспорт, импорт, межрайонный транспорт и потребление ТЭР по регионам. В исследовании рассматривается переменная:

$$B \in [l_1, l_2],$$

где B − потребление электроэнергии, l_1 – нижнее ограничение переменной, равное нулю; l_2 – верхнее ограничение, отображающее заданную потребность в электроэнергии. С помощью ПК «ИНТЭК-А» выполняется поиск оптимального решения полученного варианта модели состояния ТЭК. Оптимальные значения переменных используются для построения балансовых таблиц, отображающих, в том числе, дефициты по каждому виду ТЭР. Полученное с использованием ИНС значение заданной потребности в электроэнергии в Сибирском ФО устанавливается, как верхнее ограничение соответствующей переменной в модели (l_2 = 214,49 млрд кВт·ч). Начальное состояние электроэнергетической системы Сибирского ФО представлено на рисунке 2, как результат вычислительного эксперимента оценки наличия дефицита электроэнергии в Сибирском ФО, результаты расчетов отображены в когнитивной модели начального состояния ТЭК.

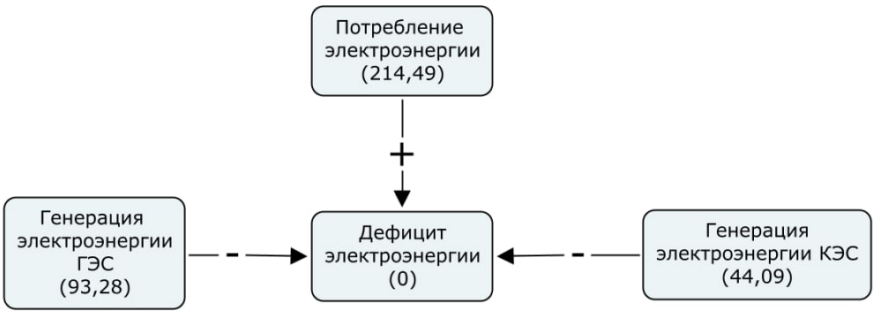


Рис. 2. Когнитивная модель начального состояния системы с уточненными значениями на основе балансовых таблиц

На втором этапе в качестве возмущающего события описывается угроза маловодья на Ангаро-Енисейском каскаде ГЭС, описание угрозы ЭБ для когнитивной модели взято из [5]. В исследовании рассматривается, что в условиях маловодья генерация э/э ГЭС в Сибирском ФО снижено на 0,976 млрд кВт·ч в год, что является фактором $\{E_i\}$ (возмущающим воздействием). Оптимальное значение переменной B отображает прогнозное потребление электроэнергии. Далее накладываются возмущающие воздействия (угроза маловодья), после чего состояние системы отображено, как уточненные значения когнитивной модели для описания реализации набора возмущающего воздействия на рисунке 3.

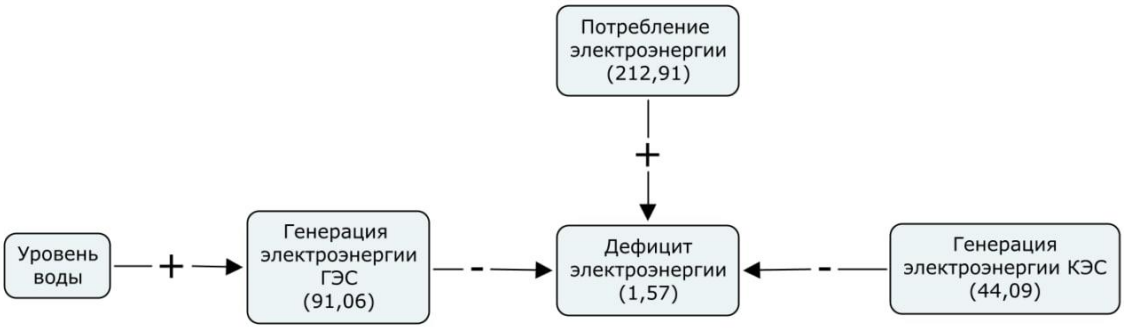


Рис. 3. Когнитивная модель системы реализации набора возмущающих воздействий с уточненными значениями на основе балансовых таблиц

Третий этап: на основе оценки наличия дефицитов проведем оценку устойчивости системы. Соотношение (1) для индикатора I_d для заданной модели не выполняется на этом этапе поскольку $0 < I_d$.

На четвертом этапе определяются управляющие воздействия по результатам расчета многовариантного сценария. В качестве управляющего воздействия выбрано увеличение мощности конденсационных электростанций (КЭС) на территории Сибирского

ФО, что компенсирует последствия угрозы маловодья. На рисунке 4 приведена когнитивная модель реализации управляющих воздействий на основе балансовых таблиц.

На пятом этапе равенство заданной потребности и прогнозного потребления указывает на то, что ТЭК способен обеспечить федеральный округ требуемым количеством дополнительных ТЭР, т.е. соотношение (1) выполняется для I_d за счет того, что генерация э/э КЭС увеличена на 1,57 млн ·ч в год, что компенсирует дефицит электроэнергии. В рассматриваемом примере электроэнергетическая система Сибирского ФО находится в устойчивом состоянии, т.е. система перешла в новое устойчивое состояние.

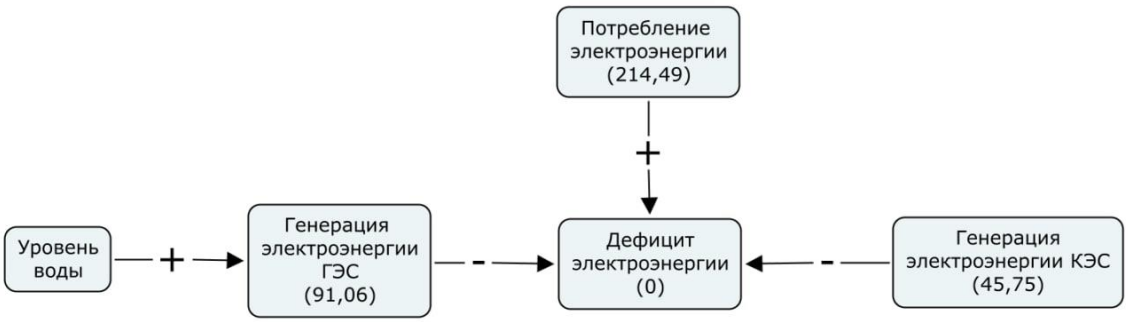


Рис. 4. Когнитивная модель системы реализации набора управляющих воздействий с уточненными значениями на основе балансовых таблиц

Заключение. В статье описана адаптация концепции ситуационного управления и приведена методика качественной и количественной оценки устойчивости энергетических систем на её основе. Выполнена постановка задачи применения методов машинного обучения для проведения таких исследований и приведен пример вычислительного эксперимента и качественной оценки ситуации с применением когнитивных моделей. Дальнейшее направление работы связано с адаптацией концепции ситуационного моделирования для экологических систем и проведения соответствующих вычислительных экспериментов на примере оценки выбросов загрязняющих веществ на территории региона.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-21-00841).

Список источников

1. Массель Л.В. Оценка рисков природных и техногенных угроз устойчивости энергетических, экологических и социальных систем на основе интеллектуальных информационных технологий / Л.В. Массель, Н.П.Комендантова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. – № 4 (16). – С. 31-45. – DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-03.
2. Davoudi S. Resilience: a bridging concept or a dead end. Planning theory and practice, 2012, vol. 13(2), pp. 299-307.
3. Массель Л.В. Подход к исследованиям устойчивости энергетических и экологических систем на основе интеллектуальных информационных технологий / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Н.П. Комендантова // Труды Международной научной конференции «Устойчивое развитие энергетики республики Беларусь: состояние и перспективы». – Минск: Беларус. Навука, 2020. – С. 33-43. – ISBN 978-985-08-2654-1.
4. Пяткова Н.И. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения. Отв. ред. Воропай Н.И. / Н.И. Пяткова, В.И. Рабчук, С.М. Сендеров, М.Б. Чельцов // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 211 с.
5. Массель А.Г. Когнитивное моделирование угроз энергетической безопасности / А.Г. Массель // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), отдельный выпуск №17. – М.: Изд-во «Горная книга», 2010. – С. 194-199.
6. Массель А.Г. Технология вычислительного эксперимента в исследованиях работы энергетических отраслей при реализации угроз энергетической безопасности / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов, Н.И. Пяткова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 3(23). – С. 62-73. – DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.006.

7. Массель А.Г. Адаптация методики реинжиниринга унаследованных программных систем / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 4 (24). – С. 88-99. – DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.009.
8. Сендеров С.М. Анализ перспективных возможностей обеспечения спроса на котельно-печное топливо в условиях резких похолоданий на территориях федеральных округов / С.М.Сендеров, С.В. Воробьев, Н.И. Пяткова // Известия РАН. Энергетика. – № 6. – 2017. – С. 3-11.
9. Массель А.Г., Тюрюмин В.О. Интеграция семантических моделей в исследованиях проблем энергетической безопасности // Известия Томского политехнического университета, 2014. – т. 324. – № 5. – С. 70-78.
10. Mosavi A., Salimi M., Ardabili S.F., Rabczuk T., Shamshirband S., Varkonyi-Koczy A. State of the art of machine learning models in energy systems, a systematic review. Energies, 2019, no. 12(7), 1301, DOI:10.3390/en12071301.
11. Бояркин Д.А. Использование методов машинного обучения при оценке надежности электроэнергетических систем методом Монте-Карло / Д.А. Бояркин, Д.С. Крупенев, Д.В. Якубовский // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование, 2018. – т. 11. – № 4. – С. 146-153. – DOI: 10.14529/mmp180411. – EDN: DFFKLU.
12. Крюков В.А. Прогнозирование процессов развития ветровой энергетики в бассейне Северного моря на базе кривых обучения / В.А. Крюков, А.А. Горлов // Проблемы прогнозирования, 2019. – № 2(173). – С. 93-103. – EDN: MDTQZW.
13. Жуков А.В. Модификация алгоритма случайного леса для классификации нестационарных потоковых данных / А.В. Жуков, Д.Н. Сидоров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование, 2016. – т. 9. – № 4. – С. 86-95. – DOI: 10.14529/mmp160408. – EDN: WZVFUV.
14. Томин Н.В. Повышение эффективности почасового прогнозирования электропотребления с помощью моделей машинного обучения на примере Иркутской энергосистемы. Часть 1 / Н.В. Томин, В.Н. Корнилов, В.Г. Курбацкий // Электроэнергия. Передача и распределение, 2021. – № 6(69). – С. 44-53. – EDN: KNJYON.
15. Томин Н.В. Повышение эффективности почасового прогнозирования электропотребления с помощью моделей машинного обучения на примере Иркутской энергосистемы. Часть 2 / Н.В. Томин, В.Н. Корнилов, В.Г. Курбацкий // Электроэнергия. Передача и распределение, 2022. – № 1(70). – С. 36-42. – EDN: QTLPBV.
16. Томин Н.В. Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений «Искусственный диспетчер» на базе технологии глубокого машинного обучения с подкреплением / Н.В. Томин, В.Г. Курбацкий, А.В. Домышев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики, 2019. – Книга 2. Вып. 70. – С. 305-314. – EDN: OEZQAO.
17. Tomin N., Voropai N., Kurbatsky V., Rehtanz C. Management of voltage flexibility from inverter-based distributed generation using multi-agent reinforcement learning. Energies, 2021, vol. 14, no. 24, DOI: 10.3390/en14248270, EDN: RNIWOC.
18. Kornilov V., Kurbatsky V.G., Tomin N.V. Improving the principles of short-term electric load forecasting of the Irkutsk region. E3S Web of conferences, 2017, vol. 25, 03006, DOI: 10.1051/e3sconf/20172503006, EDN: VWGGBN.
19. Ito K., Iima H., Kitamura Y. LSTM forecasting foreign ex-change rates using limit order book. Finance research letters, 2021, vol. 47, part 1, 102517, DOI: 10.1016/j.frl.2021.102517.
20. Han L., Zhang R., Wang X., Bao A., Jing H. Multi-step wind power forecast based on VMD-LSTM. IET renewable power generation, 2019, vol. 13, Is. 10, pp. 1690-1700, DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5781.
21. Wu C.W., Ji L., He K., Tso G. Forecasting tourist daily arrivals with a hybrid sarima–lstm approach. Journal of hospitality & tourism research, 2020, vol. 45, Is. 1, pp. 52-67, DOI: 10.1177/1096348020934046.
22. Abiodun O. I., Jantan A., Omolara A.E., Dada K.V., Mohamed N.A., Arshad H. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. Heliyon, vol. 4 (11), e00938, DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.
23. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. Neural computation, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, DOI:10.1162/neco.1997.9.8.1735.
24. Wei W., Li P. Multi-channel LSTM with different time scales for foreign exchange rate prediction. Proceedings of the International conference on advanced information science and system, 2019, no. 28, pp. 1-7, DOI: 10.1145/3373477.3373693.

25. Никитин В.М. Ангаро-Енисейский каскад ГЭС в условиях изменяющегося климата / В.М. Никитин, Н.В. Абасов, Т.В. Бережных, Е.Н. Осипчук // Энергетическая политика, 2017. – № 4. – С. 62-71. – EDN: ZXRAVD.
26. Никитин В.М. Гидроэнергетические проблемы озера Байкал: прошлое и настоящее / В.М. Никитин, В.А. Савельев, Т.В. Бережных, Н.В. Абасов // Регион: экономика и социология. 2015. – № 3(87). – С. 273-295.
27. Индикаторы работы ОЭС. Генерация и потребление в ОЭС Сибири (сут.). Системный оператор ЕЭС. – URL: https://www.so-ups.ru/functioning/ees/oes-siberia/oes-siberia-indicators/oes-siberia-gen-consump-day/ (дата обращения: 30.09.2022).
28. Сендеров С.М. Индикаторы оценки доктрины энергобезопасности России по надежности топливо- и энергоснабжения / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук // Энергетическая политика, 2019. – №3(141). – С. 86-95.

Массель Людмила Васильевна. *Доктор технических наук, профессор, зав. отделом Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, massel@isem.irk.ru, Scopus AuthorID: 56440157300, ORCID: 0000-0002-0351-0415, SPIN: 3757-0830, AuthorID: 8466. Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.*

Массель Алексей Геннадьевич. *Кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, amassel@gmail.com, Scopus AuthorID: 57220804764, ORCID: 0000-0002-0351-0415, AuthorID: 173012, SPIN:2940-2510. Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.*

Мамедов Тимур Габилович. *Инженер-исследователь, аспирант отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, mamedowtymur@yandex.ru, SPIN: 2011-2120, AuthorID: 1040958. Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.*

Гаськова Дарья Александровна. *Кандидат технических наук, младший научный сотрудник отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, gaskovada@gmail.com, Scopus AuthorID: 57570221100, ORCID: 0000-0002-1281-2335, SPIN: 5731-7254, AuthorID: 934413. Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.*

Цыбиков Алексей Ринчинович. *Инженер-исследователь, аспирант отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, tsibikow@mail.ru, SPIN: 3424-3032, AuthorID: 1148961. Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.*

Щукин Никита Игоревич. *Инженер-исследователь, аспирант отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, niksha14@mail.ru, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X. Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.*

UDC 004.8:620.9
DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.020

Assessment of the resilience of energy systems using machine learning methods

Liudmila V. Massel, Aleksei G. Massel, Timur G. Mamedov, Daria A. Gaskova, Aleksey R. Tsybikov, Nikita I. Shchukin
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, *amassel@gmail.com*

Abstract. Recently, the direction defined by the term “Resilience” has been of great interest abroad. Research of Russian scientists in this area is conducted mainly in the field of technical sustainability as one of resilience aspect, while Western Europe scientists consider this area more broadly and include environmental, psychological, social and economic resilience. Energy and environmental security issues are of great importance in resilience studies. The article considers an approach to assessing the resilience of energy systems within the framework of the situational management concept. The justification of the need for the use of machine learning methods is given and an example of the use of these methods for the quantitative assessment of resilience is also given.

Keywords: energy systems resilience, situational management, LSTM, parameters prediction, energy sector

Acknowledgements: The reported study was funded by Russian Science Foundation, according to the research project no. 22-21-00841.

References

1. Massel L.V., Komendantova N.P. Ocenka riskov prirodnyh i tehnogennyh ugroz ustojchivosti jenergeticheskih, jekologicheskih i social'nyh sistem na osnove intellektual'nyh informacionnyh tehnologij. [Risk assessment of natural and technogenic threats to resilience of energy, ecology and social systems based on intelligent information technologies]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 4(16), pp. 31-45, DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-03.
2. Davoudi S. Resilience: A bridging concept or a dead end. Planning theory and practice, 2012, vol. 13(2), pp. 299-307.
3. Massel L.V., Massel A.G., Komendantova N.P. Podkhod k issledovaniyam ustoychivosti energeticheskikh i ekologicheskikh sistem na osnove intellektual'nykh informatsionnykh tekhnologiy [Systems analysis of sustainability of energy and socio-ecological systems based on artificial intelligence technologies], Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Ustoychivoye razvitiye energetiki respubliki Belarus': sostoyaniye i perspektivy” [Proceedings of International Scientific conference in Minsk “Sustainable Development of Energy Sector of Belarus: Condition and Perspectives”]. Minsk: Belarus. Navuka [Minsk: Belarusian Science], 2020, pp. 34-43.
4. Pyatkova N.I., Rabchuk V.I., Senderov S.M. Jenergeticheskaja bezopasnost' Rossii: problemy i puti reshenija. [Energy security of Russia: problems and solutions]. Novosibirsk: Nauka [Novosibirsk: Science], 2011, 211 p.
5. Massel A.G. Kognitivnoe modelirovanie ugroz jenergeticheskoj bezopasnosti [Cognitive modelling of threats to energy security]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal) [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], LLC "Gornaya Kniga" (Moscow), 2010, no. 17, pp. 193-199.
6. Massel A.G., Mamedov T.G., Pyatkova N.I. Tehnologija vychislitel'nogo jeksperimenta v issledovanijah raboty jenergeticheskih otraslej pri realizacii ugroz jenergeticheskoj bezopasnosti. [Computational experiment technology in research of power industries when implementing threats to energy security]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 3(23), pp. 62-73, DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.006.
7. Massel A.G., Mamedov T.G. Adaptacija metodiki reinzhiniringa unasledovannyh programmnyh system. [Reengineering Technique Adaptation of Legacy Software Systems]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 4(24), pp. 88-99, DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.009.
8. Senderov S.M., Vorobev S.V., Pyatkova N.I. Analiz perspektivnyh vozmozhnostej obespechenija sprosa na kotel'no-pechnoe toplivo v uslovijah rezkih poholodanij na territorijah federal'nyh okrugov [Analysis of opportunities to ensure the demand of primary energy in terms of extremely cold weather in the federal districts of Russia]. Izvestiya RAN. Energetika [Proceedings of the RAS. Power Engineering], 2017, no. 6, pp. 3-11.
9. Massel A.G., Tyuryumin V.O. Integracija semanticheskih modelej v issledovanijah problem jenergeticheskoj bezopasnosti [Semantic models integration in research of energy security problems]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2014, vol. 324, no. 5, pp. 70-78.
10. Mosavi A., Salimi M., Ardabili S.F., Rabczuk T., Shamshirband S., Varkonyi-Koczy A. State of the art of machine learning models in energy systems, a systematic review. Energies, 2019, no. 12(7), 1301, DOI:10.3390/en12071301.
11. Boyarkin D.A., Krupenev D.S., Iakubovskii D.V. Ispol'zovanie metodov mashinnogo obuchenija pri ocenke nadezhnosti jelektrojenergeticheskih sistem metodom Monte-Carlo [Machine learning in electric power systems adequacy assessment using Monte-Carlo method]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoye modelirovaniye i programmirovaniye [Bulletin of the South Ural state university. Series: Mathematical modelling, programming and computer software], 2018, vol. 11, no. 4, pp. 146-153, DOI: 10.14529/mmp180411. EDN: DFFKLU.
12. Kryukov V.A., Gorlov A.A. Prognozirovanie processov razvitija vetrovoj jenergetiki v bassejne Severnogo morja na baze krivyh obuchenija [Forecasting the development process of wind energy in the North Sea basin based on learning curves]. Problemy prognozirovaniya [Forecasting problems], 2019, no. 2(173), pp. 93-103, EDN: MDTQZW.

13. Zhukov A.V., Sidorov D.N. Modifikacija algoritma sluchajnogo lesa dlja klassifikacii nestacionar-nyh potokovyh dannyh [Modification of Random Forest based approach for streaming data with concept drift]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoye modelirovaniye i programmirovaniye [Bulletin of the South Ural state university. Series: Mathematical modelling, programming and computer software], 2016, vol. 9, no. 4, pp. 86-95, DOI: 10.14529/mmp160408, EDN: MDTQZW.
14. Tomin N.V., Kornilov V.N., Kurbatsky V.G. Povyshenie jeffektivnosti pochasovogo prognozirovanija jelektropotreblenija s pomoshh'ju modelej mashinnogo obuchenija na primere Irkutskoj jenergosistemy. Chast' 1. [Increasing the efficiency of hourly load forecasting using machine learning techniques on the example of the Irkutsk energy state system. Part 1]. Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye [Electric power. Transmission and distribution], 2021, no. 6(69), pp. 44-53, EDN: KNJYON.
15. Tomin N.V., Kornilov V.N., Kurbatsky V.G. Povyshenie jeffektivnosti pochasovogo prognozirovanija jelektropotreblenija s pomoshh'ju modelej mashinnogo obuchenija na primere Irkutskoj jenergosistemy. Chast' 2. [Increasing the efficiency of hourly load forecasting using machine learning techniques on the example of the Irkutsk energy state system. Part 2]. Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye [Electric power. Transmission and distribution], 2022, no. 1(70), pp. 36-42, EDN: QTLPBV.
16. Tomin N.V., Kurbatsky V.G., Domishev A.V. Razrabotka intellektual'noj sistemy podderzhki prinjatija reshenij "Iskusstvennyj dispetcher" na baze tehnologii glubokogo mashinnogo obuchenija s podkrepleniem [Development of an intelligent decision support system "Artificial dispatcher" based on deep machine learning technology with reinforcement]. Metodicheskie voprosy issledovanija nadezhnosti bol'shih sistem energetiki [Methodological issues in the study of the reliability of large energy systems], 2019, ch. 2, no. 70, pp. 305-314, EDN: OEZQAO.
17. Tomin N., Voropai N., Kurbatsky V., Rehtanz C. Management of voltage flexibility from inverter-based distributed generation using multi-agent reinforcement learning. Energies, 2021, vol. 14, no. 24, DOI: 10.3390/en14248270, EDN: RNIWOC.
18. Kornilov V., Kurbatsky V.G., Tomin N.V. Improving the principles of short-term electric load forecasting of the Irkutsk region. E3S Web of conferences, 2017, vol. 25, 03006, DOI: 10.1051/e3sconf/20172503006, EDN: VWGGBN.
19. Ito K., Iima H., Kitamura Y. LSTM forecasting foreign ex-change rates using limit order book. Finance research letters, 2021, vol. 47, pt. 1, 102517, DOI: 10.1016/j.frl.2021.102517.
20. Han L., Zhang R., Wang X., Bao A., Jing H. Multi-step wind power forecast based on VMD-LSTM. IET renewable power generation, 2019, vol. 13, Is. 10, pp. 1690-1700, DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5781.
21. Wu C.W., Ji L., He K., Tso G. Forecasting tourist daily arrivals with a hybrid sarima–lstm approach. Journal of hospitality & tourism research, 2020, vol. 45, Is. 1, pp. 52-67, DOI: 10.1177/1096348020934046.
22. Abiodun O. I., Jantan A., Omolara A.E., Dada K.V., Mohamed N.A., Arshad H. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. Heliyon, vol. 4(11), e00938, DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.
23. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. Neural computation, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, DOI:10.1162/neco.1997.9.8.1735.
24. Wei W., Li P. Multi-channel LSTM with different time scales for foreign exchange rate prediction. Proceedings of the International conference on advanced information science and system, 2019, no. 28, pp. 1-7, DOI: 10.1145/3373477.3373693.
25. Nikitin V.M., Abasov N.V., Berezhnyh T.V., Osipchuk E.N. Angaro-Enisejskij kaskad GJeS v uslovijah izmenjajushhegosja klimata [Angara-Yenisei hydroelectric power chain under changing climate conditions]. Energeticheskaya politika [Energy Policy], 2017, no. 4, pp. 62-71, EDN: ZXRAVD.
26. Nikitin V.M., Savel'ev V.A., Berezhnyh T.V., Abasov N.V. Gidrojenergeticheskie problemy ozera Baikal: proshloe i nastojashhee [Problems in hydropower development of lake Baikal: the past and the present]. Region: ekonomika i sotsiologiya [Region: ekonomica and sotsiologiya], 2015, no. 3(87), pp. 273-295.
27. Indikatory raboty OJeS. Generacija i potreblenie v OJeS Sibiri (sut.) [UES performance indicators. Generation and consumption in the Siberian PSO (daily)]. Sistemnyy operator YEES [Russian Power System Operator], available at: https://www.so-ups.ru/functioning/ees/oes-siberia/oes-siberia-indicators/oes-siberia-gen-consump-day/ (accessed: 30.09.2022).
28. Senderov S.M., Rabchuk V.I. Indikatory ocenki doktriny jenergobezopasnosti Rossii po nadezhnosti toplivo- i energosnabzhenija [Assessment indicators of Russian energy doctrine in regards to the reliability of fuel and energy supply]. Energeticheskaya politika [Energy Policy], 2019, no. 3, pp. 86-95.

Liudmila V. Massel. *D.Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, massel@isem.irk.ru, Scopus AuthorID: 56440157300, ORCID: 0000-0002-0351-0415, SPIN: 3757-0830, AuthorID: 8466. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

Alexey G. Massel. *Ph. D, Senior Research Fellow of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, amassel@gmail.com, Scopus AuthorID: 57220804764, ORCID: 0000-0002-0351-0415, AuthorID: 173012, SPIN:2940-2510. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

Daria A. Gaskova. *Ph. D, Research Fellow of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, gaskovada@gmail.com, Scopus AuthorID: 57570221100, ORCID: 0000-0002-1281-2335, SPIN: 5731-7254, AuthorID: 934413. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

Aleksey R. Tsybikov. *Research engineer of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, tsibikow@mail.ru, SPIN: 3424-3032, AuthorID: 1148961. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

Nikita I. Shchukin. *Research engineer of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, niksha14@mail.ru, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.*

Статья поступила в редакцию 21.11.2022; одобрена после рецензирования 07.12.2022; принята к публикации 08.12.2022.

The article was submitted 11/21/2022; approved after reviewing 12/07/2022; accepted for publication 12/08/2022.