

Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)

ISSN 2313-1039 (E)

ОНТОЛОГИЯ

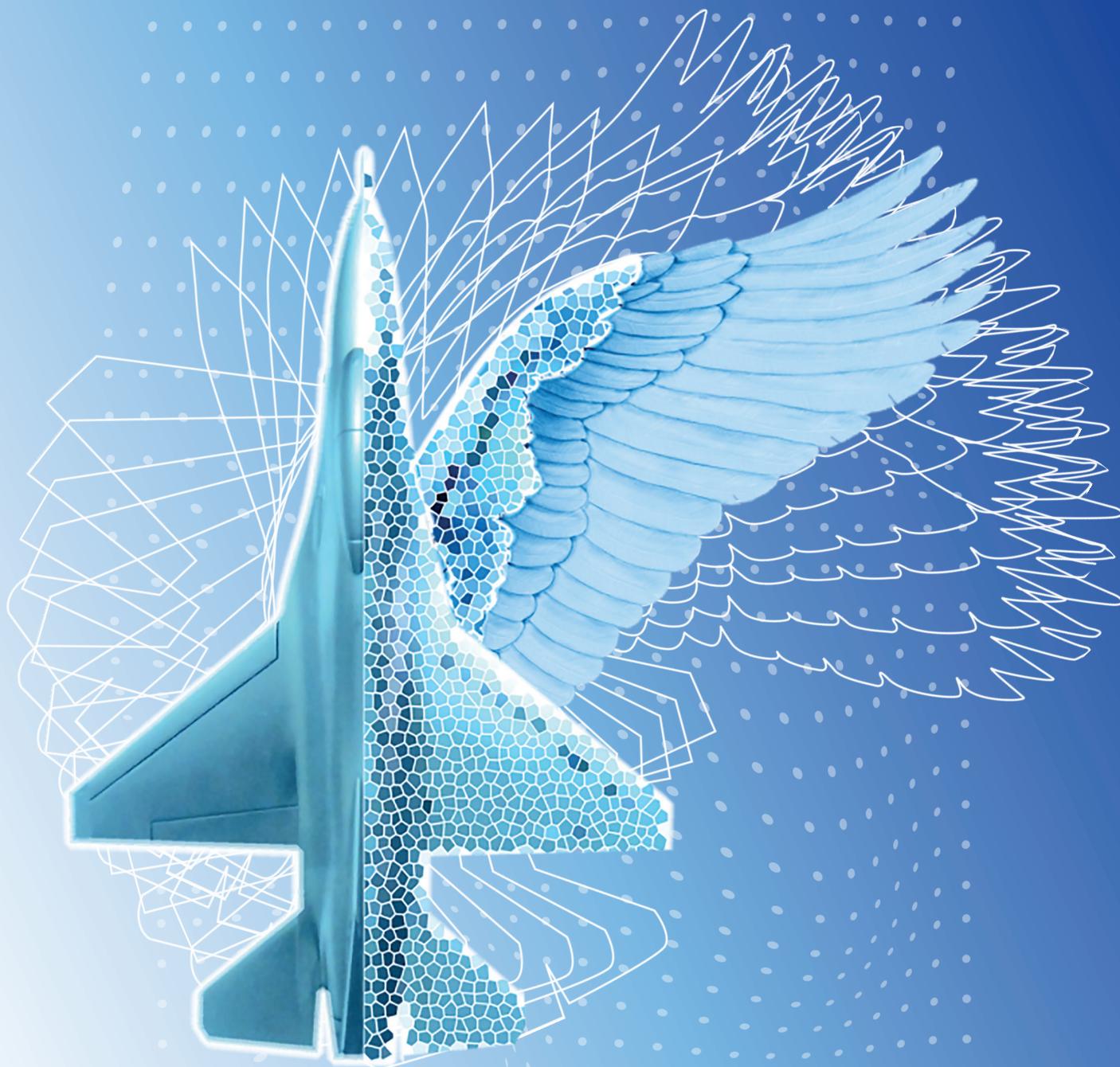
Vol 14

2024

№2

Научный журнал -
Scientific journal

ПРОЕКТИРОВАНИЯ



300 лет
Российской
1724 - 2024 академии наук



Передовые
инженерные
школы

Scientific journal

Volume 14

№ 2

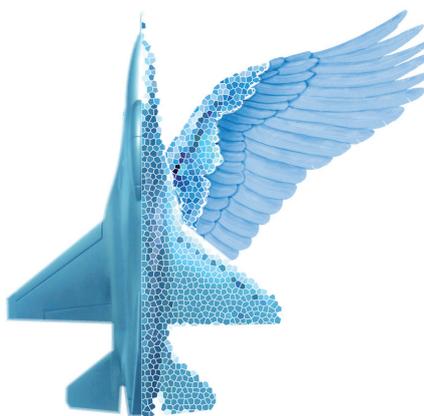
ОНТОЛОГИЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 14

№ 2



Editorial Board - Редакционная коллегия

Nikolay M. **Borgest***, Ph.D., Associate Professor, Samara University, Member of IAOA, AAAl. Samara, Russia
 Stanislav N. **Vasiliev***, Doctor of Phys. and Math. Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
 Tatiana A. **Gavrilova***, Doctor of Technical Sciences, Professor, GSOM SPbU, St.-Petersburg, Russia
 Vladimir G. **Gainutdinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, KNITU-KAI, Kazan, Russia
 Vladimir V. **Golenkov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, BSUIR, Minsk, Belarus
 Vladimir I. **Gorodetsky***, Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC «EVRIKA», St. Petersburg, Russia
 Valeriya V. **Gribova***, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAS, Senior Researcher, IAPU of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia
 Yury A. **Zagorulko***, Ph.D., Senior Researcher, ISI of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia
 Valery A. **Komarov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Vladik **Kreinovich**, Ph.D., Professor, University of Texas at El Paso, El Paso, USA
 Venedikt S. **Kuzmichev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Dmitry V. **Lande***, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, IPRI NASU, Kiev, Ukraine
 Paulo **Leitao**, Professor at Polytechnic Institute of Bragança, Bragança, Portugal
 Vladimir **Marik**, Professor, Scientific Director of the CIIRC of the Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic
 Lyudmila V. **Massel***, Doctor of Technical Sciences, Professor, ISEM of the Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia
 Aleksandr Yu. **Nesterov**, Doctor of Philosophy, Professor, Samara University, Samara, Russia
 Dmitry A. **Novikov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
 Alexander V. **Palagin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the NASU, Ins. of Cybernetics, Kiev, Ukraine
 Yury M. **Reznik**, Doctor of Philosophy, Professor, Institute of Philosophy of RAS, Moscow
 George **Rzevski**, Professor, Open University, London, UK
 Peter O. **Skobelev***, Doctor of Technical Sciences, FRC Samara Science Center of RAS, Samara, Russia
 Sergey V. **Smirnov***, Doctor of Technical Sciences, ICCS RAS, member of IAOA, Samara, Russia
 Dzhavdet S. **Suleymanov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the AS of the RT, Kazan, Russia
 Boris E. **Fedunov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia
 Andrei A. **Cherepashkov***, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Samara State Technical University, Samara, Russia
 Altynbek **Sharipbay***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Artificial Intelligence, Astana, Kazakhstan

Боргест Николай Михайлович*, к.т.н., доцент, Самарский университет, член IAOA, AAAl. Самара, Россия
Васильев Станислав Николаевич*, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИПУ РАН, Москва, Россия
Гаврилова Татьяна Альбертовна*, д.т.н., профессор, ВШМ СПбУ, Санкт-Петербург, Россия
Гайнутдинов Владимир Григорьевич, д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
Голенков Владимир Васильевич*, д.т.н., профессор, БГУИР, Минск, Беларусь
Городецкий Владимир Иванович*, д.т.н., профессор, АО «Эврика», Санкт-Петербург, Россия
Грибова Валерия Викторовна*, д.т.н., член-корреспондент РАН, г.н.с., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Россия
Загорюлько Юрий Алексеевич*, к.т.н., с.н.с., ИСИ СО РАН, Новосибирск, Россия
Комаров Валерий Андреевич, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Креинович Владик, профессор, Техасский университет Эль Пасо, Эль Пасо, США
Кузьмичев Венедикт Степанович, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Ландэ Дмитрий Владимирович*, д.т.н., с.н.с., ИПРИ НАН Украины, Киев, Украина
Лейтао Пауло, профессор, Политехнический институт Браганса, Браганса, Португалия
Марик Владимир, профессор, научный директор ЧИИРК Чешского технического университета, Прага, Республика Чехия
Масель Людмила Васильевна*, д.т.н., профессор, ИСЭМ СО РАН, Иркутск, Россия
Нестеров Александр Юрьевич, д.филос.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Новиков Дмитрий Александрович, д.т.н., профессор, академик РАН, ИПУ РАН, Москва, Россия
Палагин Александр Васильевич, д.т.н., профессор, академик НАН Украины, Ин-т кибернетики, Киев, Украина
Резник Юрий Михайлович, д.филос.н., профессор, Институт философии РАН, Москва, Россия
Ржевский Георгий, профессор, Открытый университет, Лондон, Великобритания
Скобелев Петр Олегович*, д.т.н., ФИЦ СамНЦ РАН, Самара, Россия
Смирнов Сергей Викторович*, д.т.н., ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, член IAOA, Самара, Россия
Сулейманов Джавдет Шекветович*, д.т.н., профессор, академик АН РТ, Казань, Россия
Федунов Борис Евгеньевич*, д.т.н., профессор, ГосНИИ авиационных систем, Москва, Россия
Черепашков Андрей Александрович*, д.т.н., доцент, СамГТУ, Самара, Россия
Шарипбай Алтынбек*, д.т.н., профессор, Ин-т искусственного интеллекта, Астана, Казахстан

* - members of the Russian Association of Artificial Intelligence - члены Российской ассоциации искусственного интеллекта - http://www.raai.org/about/about.shtml?raai_list

Executive Editorial Board - Исполнительная редакция

Chief Editor **P.O. Skobelev** Samara, Russia
 Deputy Chief Editor **S.V. Smirnov** Samara, Russia
 Executive Editor **N.M. Borgest** Samara, Russia
 Editor **D.M. Kozlov** Samara, Russia
 Technical Editor **D.N. Borgest** Samara, Russia
 Executive Secretary **S.A. Vlasov** Samara, Russia

Главный редактор Скобелев П.О. ФИЦ СамНЦ РАН, Самара, Россия
 Зам. главного редактора Смирнов С.В. ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, Самара, Россия
 Выпускающий редактор Боргест Н.М. Самарский университет, Самара, Россия
 Редактор Козлов Д.М. Самарский университет, Самара, Россия
 Технический редактор Боргест Д.Н. Самарский университет, Самара, Россия
 Ответственный секретарь Власов С.А. Самарский университет, Самара, Россия

The journal has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Publishing, the world's leading aggregator of full text journals, magazines and eBooks. The full text of JOURNAL can be found in the EBSCOhost™ databases. The journal has been successfully evaluated in the evaluation procedure for the **ICI Journals Master List 2014-2019** and journal received the ICV (Index Copernicus Value).

Журнал размещен в коллекции «Издания по естественным наукам» на платформе **EastView**.

Журнал включён в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук (Перечень ВАК с 01.12.2015) по научным специальностям 1.2.2., 2.3.1., 2.3.4., 2.3.5., 2.3.7., 2.3.8., 2.5.1., 2.5.13., 2.5.15., 5.12.4.

Журнал включен в список журналов, входящих в базу данных **Russian Science Citation Index (RSCI)** на платформе **Web of Science**. Пятилетний импакт-фактор РИНЦ **1.280** (2015), **1.083** (2016), **0.993** (2017), **1.205** (2018), **0.835** (2019), **1.060** (2020), **0.977** (2021), **0.895** (2022).

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-70157 от 16.06.2017 г. (ранее выданное свидетельство ПИ № ФС 77-46447 от 07.09.2011 г.)

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ

Когнитивный консонанс в онтологиях 161-166

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С.В. Микони 167-180

Моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы

А.В. Соловов, А.А. Меньшикова 181-195

Когнитивное моделирование процессов адаптивного обучения

Н.А. Скобелина 196-204

Онтология институционального дизайна современных общественных движений

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

И.А. Фролов 205-216

Онтологический подход в управлении адаптивной подготовкой групп специалистов

Г.Ф. Малыхина, П.С. Жиракова, А.В. Милицын 217-229

Проектирование интеллектуальной противопожарной системы

В.В. Гурьев, О.А. Шабалина, Н.П. Садовникова, А.А. Воронина, С.В. Косяков, Н.М. Дмитриев 230-242

Технология сквозной разработки мобильных приложений для людей с ограниченными интеллектуальными возможностями

О.С. Исаева 243-255

Построение онтологии для систематизации характеристик сети Интернета вещей

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

М.А. Шищенко 256-269

Подходы к автоматизации работ с онтологическими ресурсами

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Д.Р. Богданова, Г.Р. Шахмаметова, А.М. Ниязгулов 270-278

Структура информационного хранилища системы поддержки принятия клинических решений

В.В. Грибова, Ю.Н. Кульчин, А.И. Никитин, В.А. Тимченко 279-300

Ансамбль онтологических моделей для обеспечения интеллектуальной поддержки лазерных аддитивных технологических процессов

Журнал ориентирован на учёных и специалистов, работающих по научным направлениям: онтологические аспекты общих вопросов формализации проектирования, прикладные онтологии проектирования, инжиниринг онтологий, методы и технологии принятия решений.

Правила подготовки рукописей статей размещены на сайте журнала «Онтология проектирования»:

http://agora.guru.ru/scientific_journal/, а также на <https://www.ontology-of-designing.ru/>.

Контент журнала распространяется по лицензии CC-BY 4.0 (Creative Commons Attribution 4.0 International License).



Контакты учредителей

ИПУСС РАН – СамНЦ РАН: 443020, Самара, ул. Садовая, 61, тел./факс.: +7 (846) 333 27 70, Смирнов С.В., smirnov@iccs.ru.

Самарский университет: 443086, Самара, Московское шоссе 34, корп. 10, тел.: +7 (846) 267 46 47, Боргест Н.М., borgest@yandex.ru.

ООО «Новая техника» (издательство): 443010, Самара, ул. Фрунзе, 145, тел.: +7 (846) 332 67 84, факс: +7 (846) 332 67 81.

CONTENTS

EDITORIAL

Cognitive consonance in ontologies 161-166

GENERAL ISSUES OF FORMALIZATION IN THE DESIGNING: ONTOLOGICAL ASPECTS AND COGNITIVE MODELING

S.V. Mikoni 167-180
Modeling deviations of object quality indicators from the norm

A.V. Solovov, A.A. Menshikova 181-195
Cognitive modeling of adaptive learning processes

N.A. Skobelina 196-204
Ontology of institutional design of modern social movements

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

I.A. Frolov 205-216
Ontological approach to managing adaptive training for specialist groups

G.F. Malykhina, P.S. Zhirakova, A.V. Militsyn 217-229
Design of an intelligent fire protection system

V.V. Guryev, O.A. Shabalina, N.P. Sadovnikova, A.A. Voronina, S.V. Kosyakov, N.M. Dmitriev 230-242
End-to-end mobile application development technology for people with intellectual disabilities

O.S. Isaeva 243-255
Building an ontology to systematize the characteristics of the Internet of Things network

ONTOLOGY ENGINEERING

M.A. Shishenkov 256-269
Approaches to automating processes of working with ontological resources

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

D.R. Bogdanova, G.R. Shakhmametova, A.M. Niiazgulov 270-278
The structure of the CDSS information repository based on the ontological approach

V.V. Gribova, Yu.N. Kulchin, A.I. Nikitin, V.A. Timchenko 279-300
An ensemble of ontological models for intelligent support of laser additive manufacturing processes

The journal is aimed at scientists and specialists working in the following research areas: ontological aspects of general issues of design formalization, applied design ontologies, ontology engineering, methods and technologies of decision making.

The current version of the Rules for the preparation of manuscripts of articles for the journal «Ontology of Designing» is on the journal website:



http://agora.guru.ru/scientific_journal/, and <https://www.ontology-of-designing.ru/>.

The content of the scientific journal is distributed under a license **CC-BY 4.0**

(Creative Commons Attribution 4.0 International License)

Contacts of the Founders

Samara Scientific Center of the RAS: 61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russia. Tel.: +7 (846) 333 27 70, S.V. Smirnov, smirnov@iccs.ru

Samara University: 34, Moskovskoye shosse, bldg. 10, Samara, 443086, Russia. Tel.: +7 (846) 267 46 47, N.M. Borgest, borgest@yandex.ru

New Engineering LLC (publishing house): 145, Frunze st., Samara, 443010, Russia. Tel.: +7 (846) 332 67 84, fax: +7 (846) 332 67 81



ОТ РЕДАКЦИИ

Когнитивный консонанс в онтологиях Cognitive consonance in ontologies

«Понимание — начало согласия».
Бenedикт Спиноза

**Дорогой наш читатель,
уважаемые авторы и члены редакционной коллегии!**

Предыдущее обращение «Когнитивный диссонанс: как быть и что делать?»¹ во многом было обусловлено наметившимися процессами в информационном обществе, теми рисками, которые несут создаваемые информационные системы (ИС) в руках некомпетентных и иных лиц, злоупотребляющих возможностями современных инструментов. Ускорение этих процессов растёт благодаря достигнутым успехам в информационно-коммуникационных технологиях и их возможностям, неконтролируемым с позиций морали, нравственности и компетентности их применения. И в прежние времена вопрос истины, достоверности и неизменности содержания и толкования понятий, терминологических соглашений также не решался².

Современное значение ряда древних философских учений противоречит первоначальному их смыслу. Так, скептик - от греческого «размышлять, исследовать», а не «не верить»; стоик - «любить всё и вся», а не «хладнокровное безразличие»; эпикуреец - «ценить простые радости», а не «предаваться роскошным удовольствиям»; софист - «интеллектуальное совершенствование», а не «хитроумный обманщик». Великий Сократ был из софистов, которые много сделали в формировании интеллектуальной культуры древних Афин. Изначально термин «софист» служил для обозначения искусного или мудрого человека, но уже в древности приобрёл уничижительное значение. В современном понимании софистика - это использование благовидных аргументов для искажения действительной природы вещей в угоду целям человека, выдвигающего тот или иной аргумент³.



Выступление Сократа. Луи Жозеф Лебрун,
(Public domain. Wikimedia Commons).

Тема когнитивного моделирования, когнитивного консонанса⁴ особенно близка онтологам, создающим вместе с экспертами и профессионалами в предметных областях (ПрО) свои модели ПрО для ИС. Именно им предстоит сначала договариваться, искать и находить понимание, а затем согласие (см. эпиграф) в содержаниях и обозначениях сущностей, в наборах и значениях их атрибутов, в тех отношениях, которые связывают сущности. Онтолог, как человек познающий, обладающий уникальным индивидуальным сознанием, должен сочетать своё представление о действительности с уже сложившимися в ПрО знаниями и принятыми в ней обозначениями, учитывать традиции и контекст содержания понятий у индивидуумов, которые работают в этой ПрО. Раздвигая границы ПрО и углубляя знания о ней, онтолог должен стремиться к выработке консенсуса в сообществе специалистов, погружённых в эту ПрО и работающих в ней. Только добившись согласия (на некотором этапе развития ПрО) в профессиональном сообществе, можно приступить к формализации и передаче выработанных

¹ От редакции. Когнитивный диссонанс: как быть и что делать? *Онтология проектирования*. 2024, Т.14. №1(51). С.5-8. [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2024_1\(51\)/Ontology_Of_Designing_2024_1_opt-5-8_Editorial.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2024_1(51)/Ontology_Of_Designing_2024_1_opt-5-8_Editorial.pdf).

² От редакции. Что есть истина? *Онтология проектирования*. 2023, Т.13. №4(50). С.469-473. [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2023_4\(50\)/Ontology_Of_Designing_2023_4_opt-469-473_From_Editorial_What_is_truth.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2023_4(50)/Ontology_Of_Designing_2023_4_opt-469-473_From_Editorial_What_is_truth.pdf).

³ Steven Gambardella. The Sophists. Mar 31, 2024. https://sophist.substack.com/p/the-sophists?utm_source=profile&utm_medium=reader2.

⁴ Взаимная согласованность, уравновешенное состояние элементов когнитивной системы; состояние соответствия между ожидаемой и полученной информацией. <https://dic.academic.ru/dic.nsf/business/20734>.

ных представлений о ПрО другой сущности – ИС, которая всегда реплика, далеко не точная авторская копия её разработчиков, обобщающая текущие знания о ПрО репродукция, не отражающая все имеющиеся у индивидуумов представления о ПрО. Почти синхронная эволюция знаний о ПрО и их передача в ИС, моделирующие эту ПрО, показывает, как происходит процесс накопления и передачи знаний и какова роль акторов в этом процессе.

Вопросы, изучаемые когнитивной наукой, становятся особенно актуальными в свете достижений в области искусственного интеллекта (ИИ). Появляются новые научные специальности⁵, спрос на участие в научных конференциях по когнитивной науке резко возрос. Например, число поданных заявок на X Международную конференцию по когнитивной науке⁶, которую планируется провести 26-30 июня 2024 года в Пятигорске, достигло нескольких сотен. Конференция организуется Межрегиональной общественной организацией «Ассоциация когнитивных исследований» и Пятигорским государственным университетом. Цель конференции – обсуждение ключевых проблем междисциплинарных когнитивных исследований (познание, интеллект, мышление, язык и речь, приобретение навыков и знаний и др.). Традиционно в конференции участвует широкий круг специалистов, представляющих различные научные дисциплины (психология, лингвистика, нейрофизиология, биология, педагогика, компьютерные науки, философия и др.).

Одиннадцатая ежегодная конференция⁷, посвящённая когнитивным системам, пройдёт на площадке Итальянского национального исследовательского совета (*National Research Council*) в Палермо (Италия) 17-19 июня 2024 г. Главная тема конференции - объяснение познания в вычислительных терминах и воспроизведение широкого спектра интеллектуального поведения и человеческих способностей в ИС. Термин «когнитивный» относится к любому вычислительному артефакту, который «думает или рассуждает», независимо от того, работает он так же, как люди, или нет. Темы конференции, в том числе, включают: концептуальный вывод и рассуждения; здравый смысл и качественное моделирование; структурное обучение и накопление знаний; понимание и генерация естественного языка; обработка дискурса и диалогов; когнитивные модели и архитектуры; многозадачность и внимание; социальное познание и взаимодействие; когнитивные аспекты эмоций и личности; метапознание и рассуждения на метауровне.

FOIS 2024⁸ - флагманская конференция Международной ассоциации по онтологиям и их приложениям (*IAOA*⁹) - Международная конференция по формальной онтологии в ИС пройдёт в этом году в университете Твенте 8-9 июля (онлайн) и 15-19 июля в Энсхеде (Нидерланды). Группа семантики, кибербезопасности и сервисов этого университета (*The Semantics, Cybersecurity & Services group (SCS) of the University of Twente*) принимает у себя *FOIS 2024*. В рамках этой знаковой для онтологов конференции будет проходить множество различных семинаров. Вот некоторые из них.

CAOS¹⁰: Познание и онтологии - серия семинаров, посвящённых взаимосвязи между познанием и онтологиями с целью моделирования когнитивных явлений для ИИ. В 2024 году восьмой семинар *CAOS* проводится в рамках совместных семинаров по онтологии (*JOWO*¹¹).

⁵ Паспорт научной специальности 5.12.4. «Когнитивное моделирование» <https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=17&name=92259542002&f=15363>.

⁶ X Международная конференция по когнитивной науке. <https://lomonosov-msu.ru/rus/event/8145/>.

⁷ *The Eleventh Annual Conference on Advances in Cognitive System*. <https://www.cogsys.org/conference/2024/>.

⁸ *14th International conference on Formal Ontology in Information Systems (FOIS 2024)*. <https://www.utwente.nl/en/eemcs/fois2024/>.

⁹ *The International Association for Ontology and its Applications*. <https://iaoa.org/>.

¹⁰ *CAOS: Cognition And OntologieS*. <https://caos.inf.unibz.it/>.

¹¹ *JOWO: The Joint Ontology Workshops*. <https://www.iaoa.org/jowo/>.

С внедрением ИИ в повседневную жизнь понятие воплощённого познания и когнитивных вычислений, а также связь между символическими и нейросимволическими методами и когнитивными науками приобретают решающее значение. Конвергенция представления знаний, символических подходов и современных возможностей больших языковых моделей (*LLM*) открывает новые возможности для улучшения понимания когнитивных явлений. Развитие ИИ, понимание когнитивных явлений могут улучшить классические методы представления знаний и онтологии. *CAOS* стремится преодолеть разрыв между когнитивной наукой и формальными методами.

FOMI¹²: Семинар по формальным онтологиям для индустрии.

Международный форум Технического комитета по промышленности и стандартам *IAOA* обсудит вопросы, связанные с методами, теориями, инструментами и приложениями, основанными на формальных онтологиях, моделировании знаний и семантической совместимости в широких промышленных контекстах.

FOUST VIII¹³: Семинар по фундаментальной онтологии.

Фундаментальные онтологии - это попытки систематизировать категории мышления или реальности высокого уровня. Они направлены на понимание и формализацию значения общих терминов, таких как объект, событие, свойство, время, качество, отношение и процесс. Фундаментальные онтологии - важнейший инструмент для решения проблем взаимодействия ИС. Отсутствие консенсуса отражает укоренившиеся дебаты, проистекающие из различных точек зрения на реальность, разум и язык.

KM4LAW¹⁴: Управление знаниями и анализ процессов для юриспруденции.

Цели семинара: классификация правовых источников, юридические онтологии, сходство норм и кластеризация, анализ процессов для соответствия законодательству, полуавтоматическое юридическое толкование, извлечение и классификация информации, обнаружение лингвистических явлений и закономерностей в юридических источниках, многоязычное согласование концепций внутренних и международных правовых источников, извлечение и анализ юридических ссылок и др.

OK4I¹⁵: Онтологии и графы знаний (*Knowledge Graphs, KGs*) для промышленности.

Цель семинара - представить конкретные варианты использования, основанные на *KGs* и онтологиях, и их встроенность в общую корпоративную среду. Особое внимание полезности для бизнеса и воздействия, создаваемого с помощью *KGs* и семантических технологий в решении отраслевых проблем.

OntoCom X¹⁶: Семинар по онтологиям и концептуальному моделированию.

Семинар посвящён практическому и формальному применению онтологий в концептуальном моделировании. Концептуальное моделирование, основанное на онтологиях, становится более фундаментальным из-за присущей ему способности представлять реальность теоретически и семантически согласованным образом. Онтологии обладают потенциалом для решения сложных проблем. Преимущества, которые могут быть получены от применения базовой онтологии, включают улучшенное отображение на ПрО реального мира, повышенный уровень коммуникации и понимания между сторонами, повторное использование моделей, семантическую интеграцию и интероперабельность, а также повышение общей эффективности разработки и эволюции ИС.

ST4DM¹⁷: Семантические технологии для управления данными.

KGs - популярный формат представления данных благодаря гибкой модели данных, которая делает их подходящими для тех задач, где данные, поступающие из нескольких, возможно, разнородных источников,



51-й выпуск нашего журнала благодаря Лауре (*A.W.L. Ligtenberg (Laura) Management/Office-Assistant SCS*) стал заочным участником конференции *FOIS 2024*

¹² *FOMI: 13th International Workshop on Formal Ontologies Meet Industry*. <https://appliedontolab.github.io/fomi2024/>.

¹³ *FOUST VIII: 8th Workshop on Foundational Ontology*. <https://foust.inf.unibz.it>.

¹⁴ *3rd international workshop. KM4LAW – Knowledge Management and Process Mining for Law*. <https://km4law.di.unito.it/>.

¹⁵ *OK4I: Ontologies and Knowledge Graphs for Industry*. <https://www.iai.kit.edu/ok4i>.

¹⁶ *OntoCom X: 10th International Workshop on Ontologies and Conceptual Modeling*.

<https://ontocomworkshops.github.io/OntoCom2024>.

¹⁷ *ST4DM: Semantic Technologies for Data Management*. <https://sites.google.com/diag.uniroma1.it/st4dm>.

должны быть интегрированы для полноценного использования. Общая модель данных *KGs* позволяет представлять знания, данные и содержательную информацию, доступную с помощью онтологий ПрО. *KGs* позволяют обогатить поступающие из источников данные семантической информацией, что улучшает интерпретируемость данных, облегчает доступ и интеграцию.

LLMO¹⁸: Семинар по конвергенции *LLM* и онтологий.

Разработка и внедрение *LLM* привели к росту интереса к использованию онтологий и *KGs* для расширения возможностей *LLM* и устранения ограничений. Объединение онтологий и *KGs* с сильными сторонами *LLM* в области генерации обещает проложить путь к более объяснимым системам ИИ, более надёжным результатам и более глубокому пониманию уязвимостей, возникающих в интегрированных архитектурах.

В рамках **FOIS 2024** следует отметить новый семинар **FOAM¹⁹**, который объединяет ряд семинаров на основе принципов поиска, доступности, взаимодействия и многократного использования онтологий (*FAIR, Findable, Accessible, Interoperable and Reusable*), описывающих набор требований к возможности повторного использования ресурсов и интероперабельности. Цели семинара: объединение новых методов для получения достоверных результатов исследований (данные, программное обеспечение, процессы и т.д.) с помощью онтологий и словарей; обсуждение методов, показателей и рекомендаций по повышению достоверности онтологий и словарей.

Саммит по онтологиям 2024²⁰: Нейросимволические методы для онтологий и *KGs*.

Ежегодная серия мероприятий сообществ онтологов и специалистов, связанных с выбранной темой. В этом году рассматривались методы, сочетающие машинное обучение по нейронным сетям с символическими методами, основанными на онтологиях и *KGs*.

Онтологии - это представления ПрО, которые определяют концепции, взаимосвязи, свойства, аксиомы и правила внутри ПрО, обеспечивая структуру, позволяющую глубоко понимать эту ПрО. *KGs* представляют собой структурированные представления семантических знаний, которые хранятся в виде графа. Онтологии и *KGs* используются для обеспечения машинного рассуждения и семантического понимания, позволяя системе делать выводы и извлекать новую информацию и взаимосвязи между объектами. Нейронные сети и другие модели машинного обучения, такие как *LLM*, обучаются на больших корпусах, изучая шаблоны и связи между словами и изображениями. Их база знаний обширна, но иногда некорректна и/или предвзята, и они явно не «понимают» семантику или взаимосвязи в ПрО. На саммите рассмотрены сходства и различия между онтологиями и *LLM*, способы совместного использования нейронных сетей, онтологий и *KGs*.



WISDOMS²¹ (акроним Мудрость): Международный семинар по интеграции семантики данных, онтологий, моральных и культурных ценностей и их влияния на общество был проведён одновременно с Европейским симпозиумом по семантической сети **ESWC 2024²²** (*European Semantic Web Symposium*) в Херсониссос (Греция) 26-30 мая.

Семинар посвящён проблеме «выравнивания ценностей» — обеспечению того, чтобы системы ИИ, удовлетворяя потребности человека, воплощали общечеловеческие ценности: представление знаний и извлечение моральных, культурных и социальных ценностей; обоснованные модели мира с упором на этику и мораль; морально обоснованное принятие решений и т.д.

43-я Международная конференция по концептуальному моделированию (ER 2024²³) состоится 28-31 октября 2024 года в Питтсбурге (США).

ER 2024 - основной международный форум по обсуждению современного состояния проблем и будущих вызовов в исследованиях и практике в области концептуального моделирования. Темы конференции охватывают весь спектр концептуального моделирования, включая исследования и практику в таких областях, как теории концепций и онтологий, методы преобразования концептуальных моделей в эффективные приложения, методы и инструменты для разработки и передачи концептуальных моделей и др.

¹⁸ *LLMO: Workshop on the Convergence of Large Language Models and Ontologies*. <https://johnbeve.github.io/LLMO-FOIS/>.

¹⁹ *FOAM 2024: FAIR principles for Ontologies a Metadata in Knowledge Management*. <https://onto4fair.github.io/>.

²⁰ *OntologySummit2024: Neuro-Symbolic Techniques for and with Ontologies and Knowledge Graphs*.

<https://ontologforum.com/index.php/Category:OntologySummit2024>.

²¹ *WISDOMS: International Workshop on Integrating the Semantics of Data, Ontologies, Moral and cultural values and their Societal impact*. <https://wisdoms-workshop.github.io>.

²² *ESWC 2024: Fabrics of Knowledge: Knowledge Graphs and Generative AI*. <https://2024.eswc-conferences.org/>.

²³ *Conceptual Modeling, AI, and Beyond*. <https://conceptualmodeling.org/>; <https://resources.sei.cmu.edu/news-events/events/er2024/>.

23-я Международная конференция по семантическому вебу²⁴ пройдёт с 11 по 15 ноября 2024 года в Балтиморе (США). В рамках этого форума пройдёт 19-й Международный семинар по сопоставлению онтологий²⁵.

Сопоставление онтологий - это инструмент обеспечения совместимости в задачах интеграции данных, связанных с проблемой семантической неоднородности. Онтологии принимаются в качестве входных данных для их выравнивания, т.е. набора соответствий между семантически связанными сущностями этих онтологий. Эти соответствия могут использоваться для объединения онтологий, взаимосвязи данных, ответов на запросы или навигации по KGs. Совпадающие онтологии позволяют взаимодействовать знаниям и данным, выраженным с помощью этих онтологий. Уже 20 лет в этом направлении работает *Инициатива по оценке выравнивания онтологий*²⁶. Растущее число доступных методов для сопоставления схем или онтологий требует консенсуса в отношении оценки этих методов. Инициатива по оценке соответствия онтологий - это скоординированная международная инициатива по формированию такого консенсуса.

15-я Международная конференция по вычислительному творчеству (ICCC'24²⁷) пройдёт с 17 по 21 июня 2024 года в Университете Йенчепинга (Швеция).

Вычислительное творчество (*Computational Creativity, CC*) - это дисциплина, связанная с ИИ, когнитивными науками, инженерией, проектированием, психологией и философией. ICC - это ежегодная конференция о системах, которые демонстрируют различную степень творческой автономии, выступают в качестве творческих партнёров для людей, о методологиях создания и оценки систем CC, подходах к преподаванию CC в школах и университетах, содействию общественному восприятию CC как области знаний и технологий и т.д.

4-й Международный семинар по взаимодействию данных с прикладными онтологиями в объяснимом ИИ (DAO-XAI 2024)²⁸ проводится в рамках 27-й Европейской конференции по ИИ (ECAI 2024)²⁹ в Сантьяго-де-Компостела (Испания) 19-20 октября 2024 г.

Объяснимый искусственный интеллект (XAI) фокусируется на разработке новых подходов к объяснению моделей чёрных ящиков. Семинар посвящён роли, которую играют онтологии в XAI, в частности, в отношении создания надёжных и объяснимых систем ИИ, ориентированных на человека, а также в отношении объяснения и уточнения выходных данных LLM.

36-я международная конференция IEEE по инструментам с ИИ (ICTAI 2024³⁰) пройдёт с 30 октября по 1 ноября 2024 года в Херндоне (США).

Среди обсуждаемых: представление знаний и рассуждение; извлечение, управление и обмен знаниями; рассуждения на основе прецедентов и системы, основанные на знаниях; когнитивное моделирование и др.

29 мая 2024 года в Москве свой вклад в когнитивную ясность попытался внести выпускающий редактор журнала «Онтология проектирования» Н.М. Боргест, выступивший с докладом на совместном семинаре РАИИ и Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН «Проблемы ИИ»³¹ на тему «Онтологии и информационные системы»³².

30 мая журнал был представлен на Международной выставке-форуме «Россия». В частности, в павильоне №2 СБЕР у стенда с ИИ робот-художник выполнил портрет выпускающего редактора журнала «Онтология проектирования».



Сотрудник СБЕРа у стенда робота-художника с 50-ым выпуском журнала

²⁴ The 23rd International Semantic Web Conference. <https://iswc2024.semanticweb.org/>.

²⁵ The 19th International Workshop on Ontology Matching. <https://om.ontologymatching.org/2024/>.

²⁶ Ontology Alignment Evaluation Initiative. <https://oaei.ontologymatching.org/>.

²⁷ The 15th International Conference on Computational Creativity (ICCC'24). <https://computationalcreativity.net/iccc24/>.

²⁸ International Workshop on Data meets Applied Ontologies in Explainable AI. <https://sites.google.com/view/dao-xai2024/>.

²⁹ 27th European Conference On Artificial Intelligence. <https://www.ecai2024.eu/programme/workshops>.

³⁰ The 36th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). <https://ictai.computer.org/2024/>.

³¹ Совместный семинар РАИИ и ФИЦ ИУ РАН «Проблемы искусственного интеллекта». <http://seminar.railab.ru/>.

³² Семинар ПИИ 29.05.2024. <https://rutube.ru/video/9dabad18e2d47d939ed99d31b275c1f8/?r=wd>.



Реализация потенциала *LLM* с помощью *KGs* и метаданных обсуждалась на вебинаре компании Онтотекст³³ 30 мая 2024 года.

KGs и метаданные используются для связывания и обогащения данных контекстом и выявления взаимосвязей. Интеграция разрозненных источников данных и предоставление единой системы обмена информацией, структура данных на основе *KGs* позволяют предприятиям использовать *LLM* для улучшения совместной работы.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Наибольшего успеха в когнитивном консонансе достиг коллектив Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)³⁴, который 19 июня 2024 года отмечает своё 85-летие. С этим замечательным событием редколлегия и редакция журнала искренне поздравляют коллег из ИПУ РАН – членов редколлегии и авторов журнала

«Онтология проектирования». Такие направления научных исследований³⁵, проводимых в ИПУ РАН, как теория систем и общая теория управления; методы управления сложными техническими и человеко-машинными системами; теория управления в междисциплинарных моделях организационных, социальных, экономических, медико-биологических и экологических систем; научные основы интегрированных систем управления и автоматизации технологических процессов управления производством и др. близки к тематике журнала и соответствуют интересам наших читателей. *Желаем коллегам дальнейших успехов!*

Научные сообщества активно ищут методы, которые позволят им приблизиться к когнитивному консонансу как в описании ПрО, так и в методах, которые используются для решения задач в этих ПрО. Наш журнал также стремится внести свою лепту в обсуждение этой проблемы и методов, которые способны быть полезными в построении интероперабельных ИС для различных ПрО. **Онтологии нам всем в помощь!**

В номере

В разделе «Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование» рассмотрены: моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы (**Санкт-Петербург**); проектирование когнитивных моделей адаптивного обучения (**Самара**); онтология институционального дизайна современных общественных движений (**Волгоград**).

В разделе «Прикладные онтологии проектирования» рассмотрены: подход к управлению адаптивной подготовкой групп специалистов (**Смоленск**); проектирование интеллектуальной противопожарной системы (**Санкт-Петербург**); технология сквозной разработки мобильных приложений (**Волгоград**); онтологии для систематизации характеристик сети Интернет вещей (**Красноярск**).

В разделе «Инжиниринг онтологий» представлен обзор подходов к автоматизации работ с онтологическими ресурсами (**Москва**).

В разделе «Методы и технологии принятия решений» рассмотрены структура информационного хранилища системы поддержки принятия клинических решений (**Уфа**) и ансамбль онтологических моделей для обеспечения интеллектуальной поддержки лазерных аддитивных технологических процессов (**Владивосток**).

Ontologists and designers of all countries and subject areas, join us!

各國各學科領域的本體論者與設計師，加入我們吧！

³³ Realize LLM Potential: A Knowledge Graph, Metadata & Data Fabric Approach. May 30, 2024.

<https://www.ontotext.com/knowledgehub/webinars/realize-llm-potential-knowledge-graph-metadata-data-fabric/>.

³⁴ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Научные направления. – М.: ИПУ РАН, 2019. – 312 с.

³⁵ Фундаментальные исследования ИПУ РАН. <https://www.ipu.ru/science/fundamental-research>.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 597.97

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180



Моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы

© 2024, С.В. Микони

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Обсуждается понятие нормы на шкале показателя качества объекта в задачах определения наиболее предпочтительного объекта или его состояния. Используются понятия допустимого и предельно допустимого отклонения от нормы. Предельно допустимые отклонения от нормы принимаются как границы шкалы показателя. За основной вариант нормы принимается отрезок на шкале показателя, не включающий границы шкалы. Точечная и полуинтервальные («не более», «не менее») нормы принимаются за частные случаи интервальной нормы. Полуинтервальная норма отражает совпадение границы исходной интервальной нормы с границей шкалы показателя. Для некоторых показателей отклонение в одну из сторон от нормы считается не только допустимым, но и полезным. Показатель, отвечающий этому условию, называется оптимизируемым, а показатель с нежелательными отклонениями от обеих границ нормы – нейтральным. В модели принадлежности норме выделяются три класса: «норма», «не более» и «не менее» нормы. Предлагаются кусочно-линейная и нелинейная функции принадлежности классам. В нелинейном варианте границы интервальной нормы расширяются до допустимых границ, что влечёт пересечение функций принадлежности смежным классам. Классификация объекта на три класса выполняется отдельно по нейтральным и оптимизируемым показателям. Трактовка отклонений от нормы, как неприемлемых, так и приемлемых, влечёт необходимость введения двух фиктивных классов: «хуже нормы» и «лучше нормы». Они формируются данными из классов «не менее» и «не более». Для вычисления функции принадлежности каждому классу по всем показателям применяется средневзвешенная функция. Обобщённые по всем показателям принадлежности классам «норма», «лучше нормы», «хуже нормы» названы индексами соответственно стабильности, развития и ухудшения объекта, которые используются для целостной оценки объекта, названной индикатором его состояния. Приведён пример анализа отклонений от нормы, реализованный в модифицированной системе выбора и ранжирования СВБРЬ-М.

Ключевые слова: оценка, объект, показатель, норма, отклонение от нормы, допустимое отклонение, предельно допустимое отклонение, класс, функция принадлежности.

Цитирование: Микони С.В. Моделирование отклонений показателей качества объекта от нормы // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.167-180. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.

Благодарности: Автор выражает благодарность своим коллегам д.т.н. профессору Б.В. Соколову за ряд ценных замечаний, сделанных при обсуждении статьи, и к.т.н. доценту Д.П. Буракову за оперативную доработку системы СВБРЬ-М с целью реализации машинно-ориентированной модели анализа объекта на отклонения от нормы.

Финансирование: исследования проводились в рамках бюджетной темы FFZF–2022–0004.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Ключевым понятием управления любым реальным или мыслимым объектом (Об) является его *состояние* [1]. В каждой предметной области задаются свои требования к состоянию управляемого Об, но общим для всех является либо сохранение состояния на заданном уровне (гомеостазис), либо его подстраивание (целенаправленное изменение) под состояние внешней среды (открытая система). Эти требования касаются как живых, так и искусственных систем, что позволяет рассматривать их с самой общей, онтологической точки зрения.

Поскольку состояние Об представляется набором значений характеризующих его показателей (параметров), целесообразно требования к описанию состояния представлять на языке задания значений показателей. На практике требования к значениям показателей формулируются на языке норм [2-4]. В прикладном смысле норме присущи следующие свойства:

- любая норма *относительна*, ибо её устанавливает человек;
- норма устанавливается *теоретическим, статистическим и опытным* путём;
- статистическая норма – это *усреднённые значения* показателя, полученные при обследовании представительной группы однородных Об;
- в отличие от физических и математических констант норма *изменчива*;
- границы нормы *расплывчаты* по причине усреднения значений показателя;
- *индивидуальные* нормы отличаются от обобщённых;
- *профессиональные* нормы отличаются от норм непрофессионалов в жёсткую сторону.

Изменчивость внутренней и внешней среды влечёт отклонение текущего значения показателя от нормы. Отслеживание отклонений показателей от нормы осуществляется в рамках мониторинга объекта. В [5] мониторинг определён как «специальная форма наблюдения (слежения) за текущим изменением тех или иных процессов или объектов в пространстве и во времени, осуществляемая на постоянной основе». Для отражения расплывчатости оценок показателей в процессе мониторинга объектов востребованы методы мягких измерений [6,7].

С точки зрения безопасности объекта различают две меры отклонения от нормы – допустимую и предельно допустимую [8, 9]. Допустимым считается процент отклонения от нормы, не оказывающий существенного влияния на функционирование Об. К предельно допустимому отклонению относится краткосрочное отклонение от нормы, не влекущее угрозы существованию Об. Выход за предельно допустимые значения показателя рассматривается как угроза существованию Об.

Недопустимое отклонение от нормы является сигналом для выработки управляющего воздействия в системе управления (СУ) Об [10]. Общность применения нормы влечёт потребность в обобщённой модели отклонений по многим показателям. Решению этой задачи посвящена настоящая статья.

1 Требования к значениям показателя

Исходя из понятия нормы, она выражается отрезком $[c_{нj}, c_{вj}]$ на шкале j -го показателя, $j = \overline{1, n}$. Исходными данными для создания модели отклонений j -го показателя от нормы являются:

- нижняя $c_{нj}$ и верхняя $c_{вj}$ границы интервальной нормы $[c_{нj}, c_{вj}]$;
- допустимые отклонения от нормы к меньшим (ДОМ) и большим (ДОБ) значениям: $c_{домj}$ и $c_{добj}$.
- предельные отклонения от нормы к меньшим (ПОМ) и большим (ПОБ) значениям: $c_{помj}$ и $c_{побj}$.

Графическое представление на шкале j -го показателя интервальной нормы и отклонений от неё приведено на рисунке 1.

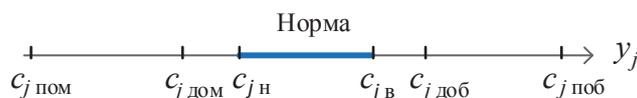


Рисунок 1 – Графическая модель отклонений от нормы

Предельные отклонения от нормы $c_{j пом}$ и $c_{j поб}$ принимаются за границы шкалы j -го показателя $[y_{j min}, y_{j max}]$: $c_{j пом} = y_{j min}$, $c_{j поб} = y_{j max}$. В общем случае допустимые и предельные отклонения в обе стороны от границ нормы не равны:

$$[c_{j н} - c_{j дом}] \neq [c_{j доб} - c_{j в}], [c_{j н} - c_{j пом}] \neq [c_{j поб} - c_{j в}].$$

Выход текущего значения j -го показателя за границы шкалы модели требований к значениям показателя ($y_j < y_{j min}$ или $y_j > y_{j max}$) является сигналом для незамедлительного принятия мер. При моделировании отклонений их необходимо обнаруживать на этапе анализа исходных данных.

Интервальное задание нормы можно рассматривать как интервальное ограничение показателя: $y_j \in [c_{j н}, c_{j в}]$. Частным случаем интервального ограничения является *точечная* норма $c_{j н} = c_{j в} = c_j$. За точечную норму c_j может быть принято среднее значение интервальной нормы $c_j = (c_{j н} + c_{j в})/2$.

Принятому за норму отрезку шкалы $[y_{j min}, c_{j н}]$ соответствует полуинтервальное ограничение сверху: $y_j \leq c_{j н}$ (не более нижней границы), а отрезку шкалы $[c_{j в}, y_{j max}]$ – ограничение снизу: $y_j \geq c_{j в}$ (не менее верхней границы). Эти ограничения могут рассматриваться как частные случаи совпадения одной из границ интервальной нормы с границей шкалы – предельным отклонением от нормы. Ограничение «не более» c_j показано в верхней части рисунка 2, а ограничение «не менее» c_j – в его нижней части.

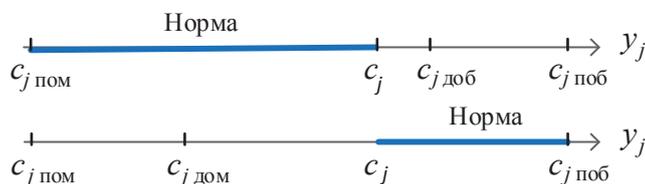


Рисунок 2 – Модель нормы в терминах полуинтервальных ограничений

С точки зрения допустимости отклонения от нормы целесообразно различать нейтральные и оптимизируемые показатели. У нейтрального показателя отклонения значений в обе стороны от границ нормы нежелательны, а у оптимизируемого показателя отклонение значения за одну из границ нормы предпочтительно, что соответствует полуинтервальным ограничениям «не более» и «не менее».

2 Моделирование отклонения показателя качества от нормы

Направленность и величину отклонения от нормы отражает биполярная функция отклонений. Она была предложена в [11] для моделирования ограничительных критериев «не более» (\leq) и «не менее» (\geq). Графики соответствующих функций отклонений применительно к точечной норме показаны на рисунке 3. Переход к интервальной норме реализуется разбиением точечной нормы c_j на интервал $[c_{н j}, c_{в j}]$, представляемый полочкой на оси абсцисс. Положительной полуоси функции отклонений от нормы ставится в соответствие штраф $d^+(y_j) > 0$ за нарушение ограничения, а отрицательной полуоси – премия (поощрение) $d^-(y_j) < 0$ за пре-

вышение ограничения. Значение $d_n(y_j) = 0$ означает принадлежность значения j -го показателя точечной или интервальной норме.

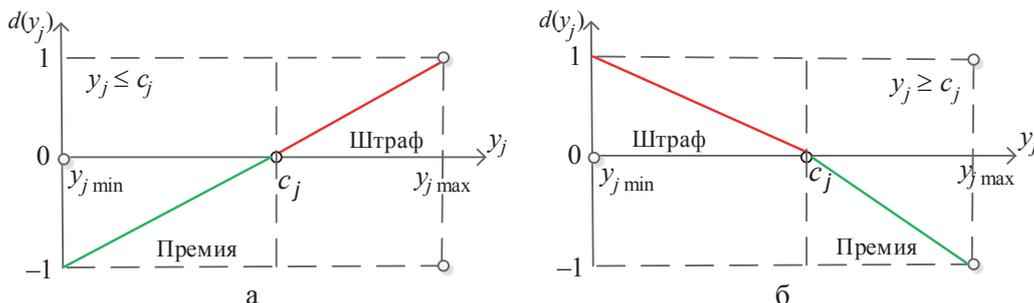


Рисунок 3 – Функции отклонения от точечной нормы: а – минимизируются; б - максимизируются

Значения кусочно-линейной функции отклонений от нормы для предиката «не более» (минимизируемый показатель) вычисляются по следующим формулам [12]:

$$d^-(y_j) = \frac{y_j - c_{nj}}{c_{nj} - y_{j\min}} \text{ если } y_j < c_{nj}, \tag{1}$$

$$d^+(y_j) = \frac{y_j - c_{bj}}{y_{j\max} - c_{bj}}, \text{ если } y_j > c_{bj}. \tag{2}$$

Значения кусочно-линейной функции отклонений от нормы для предиката «не менее» (максимизируемый показатель) вычисляются по следующим формулам:

$$d^+(y_j) = \frac{c_{nj} - y_j}{c_{nj} - y_{j\min}}, \text{ если } y_j < c_{nj}, \tag{3}$$

$$d^-(y_j) = \frac{c_{bj} - y_j}{y_{j\max} - c_{bj}}, \text{ если } y_j > c_{bj}. \tag{4}$$

Функции отклонения от нормы применимы к оптимизируемым показателям, значения которых минимизируются (рисунок 3а) или максимизируются (рисунок 3б). Функция отклонения нейтрального показателя униполярна, поскольку отклонения в обе стороны от нормы нежелательны и оцениваются только штрафами.

3 Моделирование меры принадлежности показателя качества норме

3.1 Кусочно-линейная функция принадлежности классу

Моделирование принадлежности норме предполагает построение соответствующей функции принадлежности (ФПр) на шкале каждого оцениваемого показателя [13]. В отсутствие уточняющей информации эта функция является кусочно-линейной – для интервальной нормы эта функция трапецидальная, а для точечной нормы треугольная. У трапецидальной функции на отрезке шкалы $[c_{jn}, c_{jv}]$ принадлежность норме одинакова, а при отклонении от границ c_{jn} и c_{jv} в обе стороны принадлежность норме равномерно убывает (рисунок 4). Шкала значений показателя на рисунке 4 делится на три отрезка:

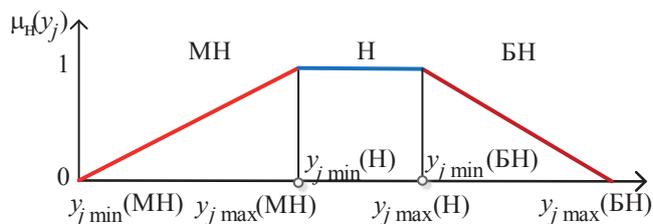


Рисунок 4 – Функция принадлежности классу «Норма»

$[y_{j \min}(\text{МН}), y_{j \max}(\text{МН})]$, $[y_{j \min}(\text{Н}), y_{j \max}(\text{Н})]$, $[y_{j \min}(\text{БН}), y_{j \max}(\text{БН})]$. Эти отрезки шкалы значений показателя трактуются как «меньше нормы» (МН), «норма» (Н) и «больше нормы» (БН).

Согласно требованию раздельного анализа отклонений значений показателя по обе стороны от границ нормы модель ФПр классу Н с нечёткими границами разделим на три класса: МН, Н, БН. Значения показателя, не достигающие нижней границы нормы, относятся к классу МН, а превышающие верхнюю границу нормы – к классу БН. ФПр $\mu_k(y_j)$ классов Н, МН, БН строятся автоматически по признакам норм (предикатов $[], \leq, \geq$).

Классифицируемый Об по значению любого показателя относится к одному из трёх классов МН, Н, БН. Принадлежность значения показателя классу МН или БН позволяет оценить направление и относительную величину его отклонения от нормы.

На рисунке 5 показана классификация значений j -го показателя на три класса. Для вычисления величины принадлежности каждому из трёх классов привлекается функция отклонений от нормы $d(y_j)$, изображённая на рисунке 6. С учётом того, что принадлежность классу «Норма» $\mu_{\text{Н}}(y_j) = 1$, величина принадлежности классам МН и БН вычисляется по формулам:

$$\text{Если } d(y_j) = 0, \text{ то } \mu_{\text{Н}}(y_j) = 1; \quad \mu_{\text{МН}}(y_j) = 0; \quad \mu_{\text{БН}}(y_j) = 0; \quad (5)$$

$$\text{Если } d(y_j) < 0, \text{ то } \mu_{\text{МН}}(y_j) = 1 - |d(y_j)|; \quad \mu_{\text{Н}}(y_j) = 0; \quad \mu_{\text{БН}}(y_j) = 0; \quad (6)$$

$$\text{Если } d(y_j) > 0, \text{ то } \mu_{\text{БН}}(y_j) = 1 - d(y_j); \quad \mu_{\text{Н}}(y_j) = 0; \quad \mu_{\text{МН}}(y_j) = 0. \quad (7)$$

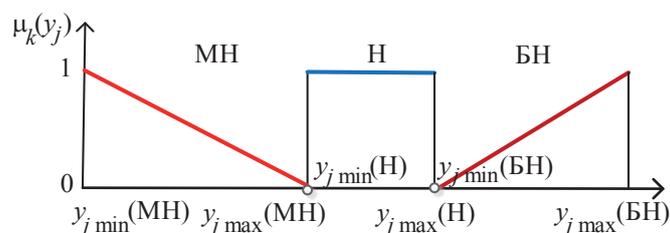


Рисунок 5 – Кусочно-линейные функции принадлежности трём классам

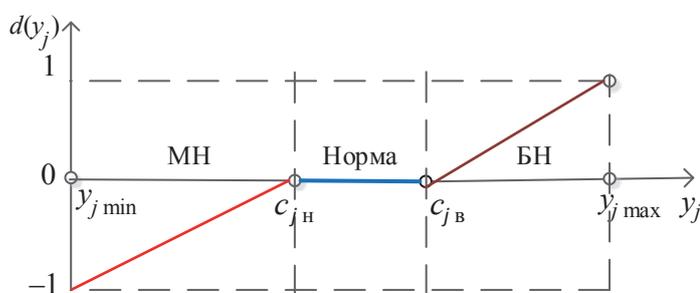


Рисунок 6 – Функция отклонений от интервальной нормы

Нулевая принадлежность классу Н в формулах (6) и (7) следует из прямоугольной формы функции принадлежности и реализует закон двоичной логики, не учитывая взаимозависимости класса Н с соседними классами. Для учёта этой взаимозависимости требуется вычисление величины принадлежности классу Н как дополнения отклонения от нормы до 1. Это достигается заменой средних членов выражений (6) и (7) на формулы:

$$\mu_{\text{Н}}(y_j) = 1 - \mu_{\text{МН}}(y_j); \quad (8)$$

$$\mu_{\text{Н}}(y_j) = 1 - \mu_{\text{БН}}(y_j). \quad (9)$$

Частичная принадлежность классу Н реализуется с применением нелинейных ФПр классу.

3.2 Нелинейная функция принадлежности классу

Для учёта соотношения классов МН и БН с классом Н следует использовать принцип усиления / убывания интереса лица, принимающего решения (ЛПР), к отклонению от нормы, подобного принципу склонности / несклонности ЛПР к риску [14]. В качестве уточняющей информации в модель отклонений от нормы включены допустимые отклонения от нормы к меньшим (ДОМ) и большим (ДОБ) значениям: $c_{j \text{ дом}}$ и $c_{j \text{ доб}}$.

Ценность информации об отклонении значения показателя на отрезках шкалы $[c_{j \text{ н}}, c_{j \text{ дом}}]$ $[c_{j \text{ в}}, c_{j \text{ доб}}]$ от границ нормы до допустимых значений j -го показателя невелика. До приближения к допустимым границам отклонения от нормы принадлежность отклонениям принимается *незначительной* и нелинейно возрастает по мере приближения к границам шкалы с максимальным ростом в точках $c_{j \text{ дом}}$ и $c_{j \text{ доб}}$. Этот принцип реализуется логистической функцией – убывающей для класса МН и возрастающей для класса БН. Моделирование классов МН и БН соответственно убывающей и возрастающей логистическими функциями показано на рисунке 7.

Применительно к ФПр классу Н принцип реализуется в двух вариантах – *полной* и *убывающей* принадлежности норме. Он демонстрируется верхней и нижней моделями на рисунке 7. Для полной принадлежности норме сохраняется условие $\mu_N(x) = 1, x \in [c_{j \text{ н}}, c_{j \text{ в}}]$. На областях определения $[c_{j \text{ дом}}, c_{j \text{ в}}]$ и $[c_{j \text{ н}}, c_{j \text{ доб}}]$ строятся соответственно *возрастающая* и *убывающая* параболы. Убывающая принадлежность норме описывается *колоколообразной* функцией с $\mu_N(x) = 1$ в средней точке нормы $(c_{j \text{ н}} + c_{j \text{ в}})/2$.

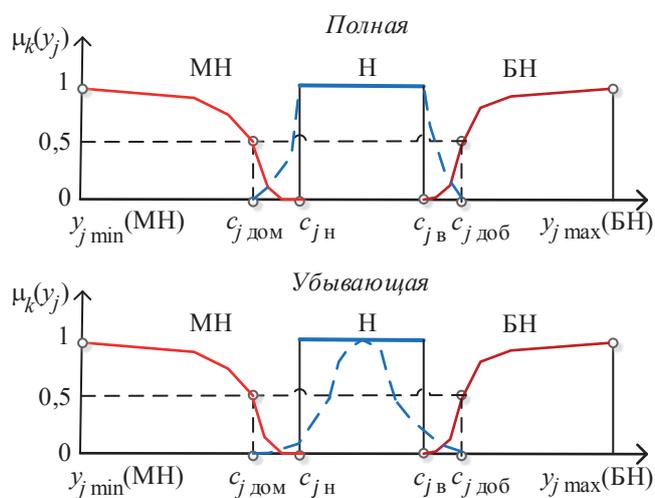


Рисунок 7 – Нелинейные функции принадлежности трём классам

4 Классификация объекта относительно нормы

При непересекающихся ФПр классам значение показателя может принадлежать только одному классу и двум классам – в противоположном случае. Принадлежность Об классу по многим показателям вычисляется как средневзвешенная функция частных принадлежностей этому классу по формуле:

$$\mu_k(x) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \mu_{jk}(x), \quad k = Н, МН, БН. \quad (10)$$

Весовой коэффициент w_j отражает важность показателя по отношению к остальным. При равенстве весов $w_j = 1/n$ формула (10) сводится к среднеарифметической функции.

Для общей характеристики Об представляет интерес не только мера его принадлежности норме и классам МН и БН, но и отношения ЛПР к этим отклонениям. Для представления этого отношения вводятся два дополнительных класса «хуже нормы» (ХН) и «лучше нормы» (ЛН). Нежелательность отклонения значения нейтрального показателя в любую сторону от границ нормы выражается через делегирование принадлежностей классам МН и БН в класс ХН.

Для оптимизируемых показателей нежелательной является принадлежность только одному из этих классов. Принадлежность противоположному классу предпочтительнее принадлежности норме и имеет значение ЛН. Значения класса ЛН формируются из принадлежностей классу БН для максимизируемых показателей и из принадлежностей классу МН для минимизируемых показателей.

Принадлежность Об классам ХН и ЛН по всем показателям вычисляется также по формуле (10). Обобщённая оценка принадлежности классам Н, ЛН, ХН называется индексом класса. Согласно смыслу этих классов их оценки трактуются соответственно как индексы *стабильности*, *развития* и *ухудшения* свойств Об. В таблице 1 приведены примеры формирования классов ХН и ЛН на основе классов МН и БН и расчёта принадлежности Об каждому из классов применительно к кусочно-линейной модели принадлежности.

Таблица 1 – Примеры расчёта меры принадлежности объекта классам

Нейтральные показатели					Показатели min					
	МН	Н	БН	ХН		МН	Н	БН	ХН	ЛН
П1	0	1	0		П4	0	1	0		
П2	0,25	0,75	0	0,25	П5	0	0,5	0,5	0,5	
П3	0	0,5	0,5	0,5	П6	0,25	0,75	0		0,25
					Показатели max					
					П7	0	1	0		
					П8	0,25	0,75	0	0,25	
					П9	0	0,5	0,5		0,5
Расчёт	0,25/3	2,25/3	0,5/3	0,75/3		0,5/6	4,5/6	1,0/6	0,75/6	0,75/6
Индекс	0,083	0,75	0,167	0,25		0,083	0,75	0,167	0,125	0,125

Левая часть таблицы охватывает три возможных состояния нейтральных показателей П1-П3, а именно, принадлежность классам Н, МН и БН. Величина принадлежности норме определена как дополнение принадлежности отклонению от нормы до 1 (числа помечены курсивом). В класс ХН делегируются принадлежности классам МН и БН. В строке «Расчёт» приведены формулы вычисления среднеарифметических оценок принадлежности классам по всем равноважным показателям, а в строке «Индекс» – полученные оценки.

Правая часть таблицы охватывает по три возможных состояния оптимизируемых показателей П4-П9. В класс ХН минимизируемых показателей переносятся данные из класса БН, а для максимизируемых показателей – из класса МН. В столбец ЛН переносятся данные из противоположных классов. Жирным шрифтом в строке «Индекс» выделены индексы стабильности, ухудшения и развития Об. По нейтральным показателям индекс развития не вычисляется из-за отсутствия класса ЛН.

5 Обобщённые оценки состояния объекта

Отклонение какого-либо показателя качества Об от нормы является поводом для принятия решения по управлению его состоянием. Наряду с частными отклонениями Об от нормы представляет интерес общая оценка его состояния. Она востребована при наблюдении динамики состояния Об, а также для сопоставления его с состояниями однородных Об, что особенно актуально для сложных Об, характеризующихся десятками показателей. Эта задача может быть решена введением числового индикатора состояния (ИС) Об [15].

В качестве индикатора состояния объекта x , отражающего принадлежность норме и отклонениям от неё, примем аддитивную свёртку оценок соответствующих показателей:

$$ИС(x) = \sum_{k=1}^3 w_k \cdot Pr(\mu_k(x), c_k). \quad (11)$$

В формуле (11) множитель $Pr(\mu_k(x), c_k)$ представляет собой значение критерия, сформированного на основе показателя принадлежности объекта x k -му классу, c_k и w_k – целевое значение и важность этого показателя. Значениями c_k являются \min или \max .

В решаемой задаче рассматриваются две тройки показателей принадлежности классам – с первичными и вторичными отклонениями. К первой тройке относятся показатели принадлежности классам Н, МН и БН, а ко второй – показатели принадлежности классам Н, ХН и ЛН.

В задаче мониторинга объекта используются классы Н, МН и БН. Требованию соответствия всех показателей объекта норме отвечают следующие критерии:

$$\mu_H(x) \rightarrow \max, \mu_{MN}(x) \rightarrow \min, \mu_{BN}(x) \rightarrow \min. \quad (12)$$

Соотношение между составляющими целостной оценки задаётся вектором весов: $\mathbf{w} = (w(\mu_{MN}(x)); w(\mu_H(x)); w(\mu_{BN}(x)))$. Значения весов задаются в зависимости от интереса ЛПР к этим составляющим. В том случае, когда отклонения в разные стороны от границ нормы неравноценны, классы МН и БН имеют разную важность. Бóльшая важность одного из двух отклонений значения показателя качества от границы нормы будет указывать на бóльшую опасность ухудшения свойств Об. Учёт важности отклонений от нормы позволяет оценить тенденцию более опасного ухудшения свойств Об.

В задаче оценивания объекта с точки зрения соотношения его стабильности и развития используются классы Н, ХН и ЛН. Принадлежность классу ХН отражает степень ухудшения состояния Об, а классу ЛН – его улучшение по отношению к норме. Таким образом, качество состояния Об отражают критерии:

$$\mu_{XH}(x) \rightarrow \min, \mu_H(x) \rightarrow \max, \mu_{LN}(x) \rightarrow \max. \quad (13)$$

Соотношение между составляющими целостной оценки задаётся вектором весов: $\mathbf{w} = (w(\mu_{XH}(x)); w(\mu_H(x)); w(\mu_{LN}(x)))$. Значения весов задаются в зависимости от интереса ЛПР к этим составляющим. Предпочтение стабильности выражается бóльшим весом показателя $\mu_H(x)$, например, $\mathbf{w}_c = (0,17; 0,5; 0,33)$, а предпочтение развитию – бóльшим весом показателя $\mu_{LN}(x)$, например, $\mathbf{w}_p = (0,17; 0,33; 0,5)$.

Нейтральные показатели участвуют только в оценивании стабильности Об. Из этого следует их нулевая принадлежность классу ЛН. Она отражается и в назначении только двух весовых коэффициентов классов. Например, при равной важности классов Н и ХН вектор \mathbf{w}_c имеет следующий вид: $\mathbf{w}_c = (0,5; 0,5; 0)$. Поскольку индикатор состояния Об вычисляется по разным исходным данным для нейтральных и оптимизируемых показателей, целесообразно оценивать их отдельно.

При равной важности критериев принадлежности классам величина индикатора состояния Об зависит только от их значений, а они, в свою очередь, зависят от меры принадлежности первичных показателей норме и отклонениям от неё. Таким образом, для фиксированного набора первичных показателей и установленных для них норм индикатор состояния объекта представляет собой конкретную обобщённую характеристику состояния объекта относительно нормального состояния. Его величина равна единице в том случае, когда для тройки классов Н, МН, БН $\mu_{MN}(x) = \mu_{BN}(x) = 0$. Из этого условия следует $\mu_{XH}(x) = 0$. Величина индикатора состояния играет роль потенциала объекта в отношении его стабильности и развития. Чем она ближе к единице, тем выше качество оцениваемого по этим свойствам объекта. Это даёт возможность оценивать динамику стабильности и развития объекта, а также сопоставлять его по этим свойствам с другими объектами.

6 Программная реализация задачи анализа отклонений объекта от нормы

Задача анализа отклонений Об от нормы реализована в новой редакции инструментальной системы выбора и ранжирования СВИРЬ-М, разработанной на языке *Java* к.т.н. доцентом Д.П. Бураковым во взаимодействии с автором. Эта задача является разновидностью многомерной классификации Об. В отличие от произвольной классификации число классов в этой задаче и их назначение фиксированы и являются производными от класса Н. По заданию границ нормы, отклонений от неё, признаков ФПр классу, типа показателя автоматически строится любая из трёх рассмотренных моделей на шкале каждого показателя, участвующего в оценивании.

Под признаками ФПр классу понимаются линейность / нелинейность её значений. Под типом показателя понимается нейтральный, минимизируемый и максимизируемый показатель. Подготовка исходных данных для решения задачи выполняется в табличном пакете *MS Excel* в виде таблиц «Объекты/Показатели» и «Требования к показателям».

Автоматически сформированная модель для решения задачи многомерной классификации при необходимости уточняется пользователем системы средствами редактирования модели. Изменению подлежат границы классов и отклонений, параметры нелинейности нелинейной модели. Простота формирования модели задачи достигается автоматизацией построения классов на шкалах показателей на этапе ввода требований к показателям. На рисунке 8 показано разделённое на две части окно настройки параметров задачи «Отклонения от нормы» в системе СВИРЬ-М.

Левая часть окна настроена на решение одной из четырёх базовых задач аксиоматической классификации [16], а именно, на отклонение от нормы по ФПр. В окне «Список классов» приведён автоматически формируемый список пяти классов. С учётом возможных отклонений от нормы выбрана опция «Частичная принадлежность» классам.

Для оценивания меры принадлежности классам по всем показателям выбрана аддитивная обобщающая функция (правая часть рис. 8). Для вычисления индикатора состояния Об активировано «Сквозное упорядочение объектов». Принимается способ формирования класса ХН из классов МН и БН по максимальному отклонению. Весам (приоритетам) классов в специальном окне задана равная важность.

Пример результатов расчёта принадлежности классам Об 1 по трём нейтральным и шести оптимизируемым показателям показан на рисунках 9 и 10. Значения показателей П1-П9, измеренных в общей шкале [0, 10], равны (5, 3, 8, 5, 8, 3, 5, 3, 8). Границы общей для всех показателей нормы определены интервалом [4, 6]. Границы и значения показателей подобраны под реализацию принадлежностей классам в таблице 1. Требованиям нормы удовлетворяют показатели П1, П4, П7 со значением 5. Остальные показатели имеют отклонения в обе стороны от границ нормы.

На рисунке 9 приведены меры принадлежности Об 1 классам по нейтральным показателям П1, П2, П3 со значениями (5, 3, 8).

Принадлежности объекта 1 по нейтральным показателям классам совпали с расчётными величинами, приведёнными в левой части таблицы 1. Принадлежность объекта 1 классу ЛН равна нулю. Индикатор состояния объекта 1 относительно вектора важности (0,5; 0,5; 0) классов ХН и Н равен 0,5.

На рисунке 10 приведены меры принадлежности объекта 1 классам по шести оптимизируемым показателям П4-П9 со значениями (5, 8, 3, 5, 3, 8).

Принадлежности объекта 1 классам совпали с расчётными величинами, приведёнными в правой части таблицы 1. Принадлежность объекта 1 с оптимизируемыми показателями классу ЛН $0,125 > 0$ отражает меру его развития. Индикатор состояния объекта 1 относительно вектора важности (0,33; 0,33; 0,33) классов ХН, Н, ЛН равен 0,58. Среднеарифметическая

оценка ИС объекта 1 по всем показателям вычисляется как $(0,50 + 0,58)/2 = 0, 54$. Эта величина, далёкая от единицы, отражает значительные отклонения объекта 1 от нормы и от оптимальных значений показателей.

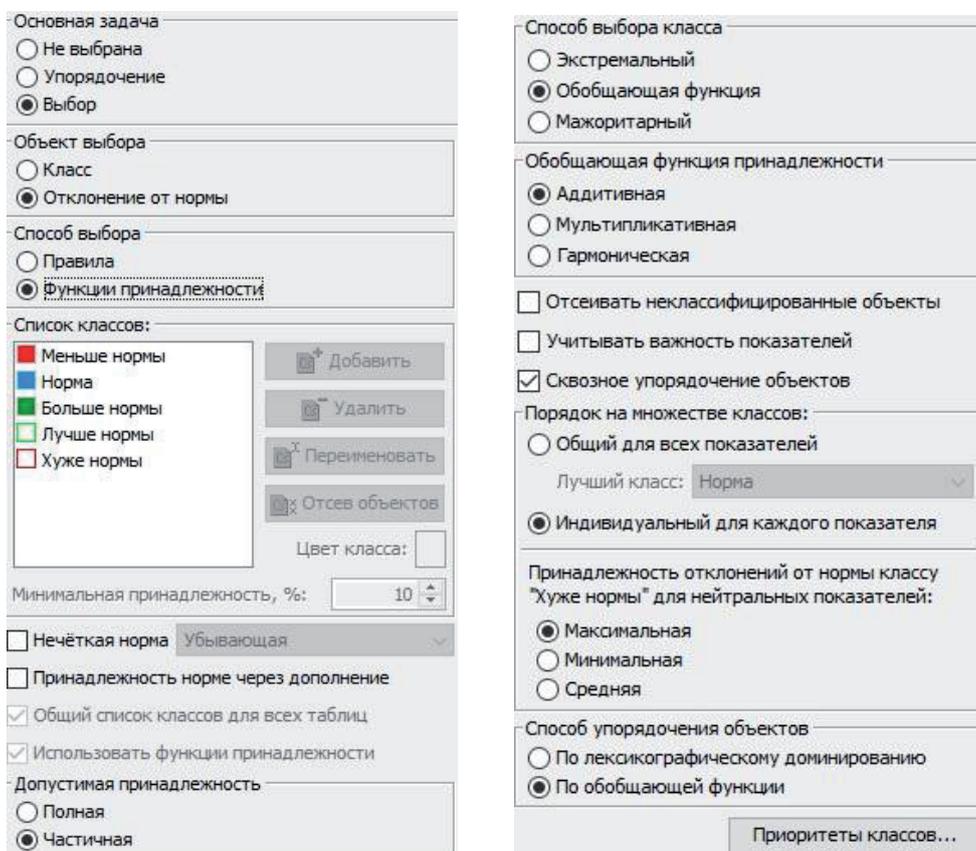


Рисунок 8 – Две части окна настройки параметров задачи «Отклонения от нормы»

1 \ 3	Меньше нормы	Норма	Больше нормы	Лучше нормы	Хуже нормы	Общая оценка
Объект 1	0.083	0.750	0.167	0.000	0.250	0.500

Рисунок 9 – Принадлежность объекта 1 классам по трём нейтральным показателям

1 \ 6	Меньше нормы	Норма	Больше нормы	Лучше нормы	Хуже нормы	Общая оценка
Объект 1	0.083	0.750	0.167	0.125	0.125	0.58

Рисунок 10 – Принадлежность объекта 1 классам по шести оптимизируемым показателям

Применение нелинейных ФПр норме и отклонениям от неё (см. рисунок 7) существенно влияет на результаты оценивания состояния объекта за счёт быстрого роста принадлежности отклонениям. Влияние этого свойства ФПр можно показать на рассматриваемом примере с применением функций, приведённых в нижней части рисунка 7. На рисунке 11 приведены меры принадлежности Об 1 классам по нейтральным показателям П1, П2, П3 с нелинейными ФПр классам.

На рисунке 12 приведены меры принадлежности объекта 1 классам по шести оптимизируемым показателям П4-П9 с нелинейными ФПр классам.

1 \ 3	Меньше нормы	Норма	Больше нормы	Лучше нормы	Хуже нормы	Общая оценка
Объект 1	0.167	0.334	0.318	0.000	0.485	0.285

Рисунок 11 – Принадлежность объекта 1 классам по трём нейтральным показателям с нелинейными функциями принадлежности

1 \ 6	Меньше нормы	Норма	Больше нормы	Лучше нормы	Хуже нормы	Общая оценка
Объект 1	0.167	0.334	0.318	0.318	0.167	0.50

Рисунок 12 – Принадлежность объекта 1 классам по шести оптимизируемым показателям с нелинейными функциями принадлежности

Применение нелинейных ФПр классам удвоило меру принадлежности объекта классам МН и БН, что повлияло на принадлежность классам ХН и ЛН, и через них – на индикаторы состояния объекта в сторону их уменьшения. Таким образом, применение нелинейных ФПр отражает большее влияние отклонений от нормы на индексы и индикатор состояния объекта.

Заключение

Проблема качества функционирования объекта носит всеобщий характер. Оценивание качества осуществляется путём контроля значений показателей, характеризующих состояние объекта, на предмет соответствия норме. Однако, с одной стороны, нормы условны, поскольку задаются человеком, а, с другой стороны, под влиянием внутренних и внешних факторов имеет место выход значений показателей за границы норм. Он может считаться как недопустимым, с точки зрения стабильности функционирования объекта, так и желательным, с точки зрения его развития.

Предложенная в работе модель ФПр норме и отклонений от неё позволяет оценить направленность и величину отклонений значений показателей от нормы. Модель строится на основе задания границ нормы – номинальных, допустимых и предельных. Номинальные и предельные границы достаточны для построения кусочно-линейной (грубой) модели отклонений от нормы. Включение в модель допустимых отклонений от нормы даёт дополнительную информацию для построения нелинейных ФПр норме и отклонений от неё, учитывающих отношение к ним ЛПП.

Предложенная модель является двухступенчатой. Модель первой ступени включает классы «Норма», «Меньше нормы», «Больше нормы». Эти классы используются для решения задач мониторинга объекта. На основе принадлежности этим классам по многим показателям вычисляется индикатор состояния объекта, по которому можно судить об общем состоянии объекта.

В модели второй ступени класс «Норма» сопоставляется с двумя фиктивными классами «Хуже нормы» и «Лучше нормы», сформированными из представителей классов «Меньше нормы» и «Больше нормы». Для их формирования используется деление показателей на нейтральные и оптимизируемые. Индикатор состояния объекта, вычисляемый на основе принадлежности классам Н, ХН, ЛН по многим показателям, позволяет судить об объекте с точки зрения стабильности и развития его свойств. По отношению к единице значение индикатора состояния объекта может рассматриваться как его потенциал для сравнения развития объекта во времени и сопоставления с другими объектами. Общность предложенной модели и возможность моделирования в различных режимах системы СВБРЬ-М определяет широкую сферу её применения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Юревич Е.И.** Теория автоматического управления. Л.: Машиностроение, 1980. 412 с.
 - [2] Социологический энциклопедический словарь. М.: Норма. 1998. 554 с.
 - [3] **Карнович В. Н.** Норма и описание как категории эпистемологии: рациональность как вид и основание нормативности // *Сибирский философский журнал*. 2013. Т.11. №4. С.5-11.
 - [4] **Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение. 1986. 352 с.
 - [5] Лернера индекс. Большая российская энциклопедия. Электронная версия. <https://old.bigenc.ru/economics/text/2227291#>.
 - [6] **Прокочина С.В.** Современная теория измерений: классификация типов измерений // *Мягкие измерения и вычисления*. 2017. № 1(1). С.4-16.
 - [7] Многозначные логики и их применения. Т.1. Логические исчисления, алгебры и функциональные свойства / Под ред. В.К.Финна. - М.: Изд-во ЛКИ, 2008.
 - [8] ГОСТ Р 59819-2021. Национальный стандарт РФ. Самолеты и вертолеты. Построение и изложение технических условий. Общие требования. М.: Российский институт стандартизации. 2021. 24 с.
 - [9] **Фридман А.Я.** Онтология проектирования ситуационных цифровых двойников для моделирования структурной безопасности индустриально-природных комплексов // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №1(51). С.29-41. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1-29-41.
 - [10] **Александров А.Г.** Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высшая школа. 1989. 263 с.
 - [11] **Mikoni S.V.** Method of choice by approximation to a pattern // *Proceedings of Conf. NITE'2000*, Minsk: Belarus State Economic University. 2000. pp.156–159.
 - [12] **Микони С.В.** Теория принятия управленческих решений. СПб.: Лань, 2022. 314 с.
 - [13] **Zadeh L.A.** Toward perception-based theory of probabilistic reasoning with imprecise probabilities // *Сборник докладов Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM'2003*. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 25-27 июня 2003. С.69–75.
 - [14] **Neumann John von, Morgenstern Oskar.** *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, NJ. Princeton University Press, 1953. 46 p.
 - [15] **Богданова Т.К., Жукова Л.В.** Оценка состояния объекта управления на основе универсального комплексного индикатора с использованием структурированных и неструктурированных данных // *Бизнес-информатика*. 2021. Т.15 №2. С.21-33. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.21.33.
 - [16] **Микони С.В.** О классе, классификации и систематизации // *Онтология проектирования*. 2016. Т.6, №1(19). С. 67-80. DOI:10.18287/2223-9537-2016-6-1-67-80.
-

Сведения об авторе



Микони Станислав Витальевич, 1936 г. рождения. Окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Образцова в 1963 г., д.т.н. (1992), профессор (1994), ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта (1998). В списке публикаций 360 работ, из них 2 монографии и 7 учебных пособий в области технической диагностики, дискретной математики, системного анализа, теории принятия решений, искусственного интеллекта. AuthorID (РИНЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; <https://orcid.org/0000-0001-7153-6804>. smikoni@mail.ru.

Поступила в редакцию 02.02.2024, после рецензирования 28.03.2024. Принята к публикации 5.04.2024.



Modeling deviations of object quality indicators from the norm

© 2024, S.V. Mikoni

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

The concept of a norm on the scale of an object's quality indicator in the context of determining the most preferable object or its state is explored. The notions of permissible and maximum permissible deviations from the norm are utilized, with maximum permissible deviations defining the boundaries of the indicator scale. The fundamental version of the norm is represented as a segment on the indicator scale that excludes these boundaries. Point and semi-interval norms ("no more", "no less") are considered special cases of the interval norm, where the semi-interval norm reflects the alignment of the original interval norm's boundary with the indicator scale's boundary. For certain indicators, deviation in one direction from the norm is not only acceptable but also beneficial. An indicator satisfying this condition is termed optimized, while an indicator with undesirable deviations from both ends of the norm is termed neutral. In the model of belonging to the norm, three classes are distinguished: "norm", "no more" and "no less" than the norm. Piecewise linear and nonlinear membership functions for these classes are proposed. In the nonlinear model, the boundaries of the interval norm are expanded to acceptable limits, leading to the intersection of membership functions of adjacent classes. Classification into these three classes is conducted separately for neutral and optimized indicators. Interpreting deviations from the norm, both unacceptable and acceptable, necessitates introducing two fictitious classes: "worse than the norm" and "better than the norm." These classes are formed from the "not less than" and "not more than" classes. To calculate the membership function for each class across all indicators, a weighted average function is employed. Aggregated indices of belonging to the classes "norm," "better than norm," and "worse than norm" across all indicators are referred to as indices of stability, development, and deterioration of an object, respectively. These indices are used for a comprehensive assessment of the object, termed an indicator of its condition. An example of analyzing deviations from the norm, implemented in the modified SVIR-M selection and ranking system, is provided.

Keywords: *assessment, object, indicator, norm, deviation from the norm, permissible deviation, maximum permissible deviation, class, membership function.*

Citation: *Mikoni SV. Modeling deviations of object quality indicators from the norm [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024;14(2): 167-180. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-167-180.*

Acknowledgments: The author expresses gratitude to his colleagues Dr. Sc. Professor B.V. Sokolov for a number of valuable comments made during the discussion of the article, and Ph.D. Associate Professor D.P. Burakov for the prompt improvement of the SVIR-M system in order to implement a machine-oriented model for analyzing an object for deviations from the norm.

Financial support: Research was carried out on this topic was carried out under budget topic FFZF-2022-0004.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and table

Figure 1 - Graphic model of deviations from the norm

Figure 2 - Model of norm in terms of half-interval constraints

Figure 3 - Functions of deviation from a point norm (a – minimized; b – maximized)

Figure 4 - Membership function of the "norm" class

Figure 5 - Piecewise linear membership functions for three classes

Figure 6 - Function of deviations from the interval norm

Figure 7 - Nonlinear membership functions for three classes

Figure 8 - Two parts of the window for setting parameters for the "Deviations from the norm" task

Figure 9 - Class membership of an object according to three neutral indicators

Figure 10 - Class membership of an object according to six optimized indicators

Figure 11 - Class membership of an object according to three neutral indicators with non-linear class membership functions

Figure 12 - Class membership of an object according to six optimized indicators with non-linear class membership functions

Table 1 - Examples of calculating the measure of an object's class membership

References

- [1] **Yurevich EI.** Theory of automatic control [In Russian]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1980. 412 p.
- [2] Sociological encyclopedic dictionary [In Russian]. Moscow: Norma. 1998. 554 p.
- [3] **Karpovich VN.** Norm and description as categories of epistemology: rationality as a type and basis of normativity [In Russian]. *Siberian Journal of Philosophy*. 2013; 11(4): 5-11.
- [4] **Yakushev AI, Vorontsov LN, Fedotov NM.** Interchangeability, standardization and technical measurements [In Russian]. Moscow: *Mechanical engineering*. 1986. 352 p.
- [5] Lerner index. Great Russian Encyclopedia. Electronic version. [In Russian]. <https://old.bigenc.ru/economics/text/2227291#>.
- [6] **Prokopchina SV.** Modern measurement theory: classification of measurement types [In Russian]. *Soft measurements and calculations*. 2017; 1(1): 4-16.
- [7] Many-valued logics and their applications. V.1. Logical calculus, algebras and functional properties [In Russian]. Ed. V.K. Finn. Moscow: Publishing house LKI, 2008.
- [8] GOST R 59819-2021. National standard of the Russian Federation. Airplanes and helicopters. Construction and presentation of technical conditions. General requirements [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization. 2021. 24 p.
- [9] **Fridman AYA.** Ontology for designing situational digital twins of industrial-natural complexes for modeling their structural safety [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(1): 29-41. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1-29-41.
- [10] **Aleksandrov AG.** Optimal and adaptive systems [In Russian]. Moscow: Higher school. 1989. 263 p.
- [11] **Mikoni SV.** Method of choice by approximation to a pattern // Proceedings of Conf. NITE'2000, Minsk: Belarus State Economic University. 2000. pp.156–159.
- [12] **Mikoni SV.** The theory of managerial decision making. Tutorial [In Russian] St. Petersburg: Lan, 2022, 314 p.
- [13] **Zadeh LA.** Toward perception-based theory of probabilistic reasoning with imprecise probabilities // Collection of reports International. conf. on soft computing and measurements SCM'2003. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", June 25-27, 2003 indicators of object quality from the norm. P.69–75.
- [14] **Neumann J, Morgenstern O.** Theory of Games and Economic Behavior. Princeton, NJ. Princeton University Press, 1953. 46 p.
- [15] **Bogdanova TK, Zhukova LV.** Assessing the state of a control object based on a universal complex indicator using structured and unstructured data [In Russian]. *Business informatics*. 2021; 15(2): 21-33. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.21.33.
- [16] **Mikoni SV.** About the class, classification and systematization [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(1): 67-80. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-1-67-80.

About the author

Stanislav Vitalievich Mikoni (b. 1936) graduated from the Obraztsov Institute of Engineers of Railway Transport (Leningrad) in 1963, D. Sc. Eng. (1992), Professor (1994), Leading Researcher at the St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. He is a member of the Russian Association of Artificial Intelligence (1998). He is the author and a co-author of 360 publications in the field of technical diagnostic, discrete mathematic, system analyses, artificial intelligence, and decision making theory. AuthorID (РИИЦ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; <https://orcid.org/0000-0001-7153-6804>. smikoni@mail.ru.

Received February 2, 2024, Revised March 28, 2024. Accepted April 5, 2024.



Когнитивное моделирование процессов адаптивного обучения

© 2024, А.В. Соловов ✉, А.А. Меньшикова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Рассматривается подход к моделированию процессов адаптивного обучения с помощью знаковых и взвешенных ориентированных графов (орграфов). Вершины орграфов отображают характеристики учебной деятельности. Ориентация, знаки и веса дуг орграфов определяют взаимовлияние этих характеристик. Динамика адаптивного обучения моделируется в орграфах с помощью специального алгоритма импульсного процесса. В некоторую вершину орграфа вносится внешнее возмущение и рассматривается распространение этого импульса, что позволяет прогнозировать значения других вершин орграфа. Сформулирована задача оптимизации весов дуг орграфа и предложен алгоритм её решения с целью достижения устойчивости импульсного процесса. По результатам вычислительных экспериментов на орграфе установлено, что целевая функция оптимизации весов дуг взвешенного орграфа является многоэкстремальной. Попадание в локальный минимум определяется исходными значениями вектора проектных переменных и ограничениями на эти переменные. Поэтому важна квалификация разработчика модели адаптивного обучения, назначающего эти величины. Когнитивные модели адаптивного обучения могут рассматриваться как прескриптивные и дескриптивные. Прескриптивные модели описывают, каким должен быть процесс адаптивного обучения. Дескриптивные модели описывают существующие процессы адаптивного обучения и могут служить инструментом исследования их эффективности. Разработанная методика когнитивного моделирования процессов адаптивного обучения позволяет прогнозировать результаты обучения и может применяться при исследовании, проектировании и реализации механизмов адаптации и интеллектуального управления в системах электронного обучения, а также в дидактическом тренинге преподавателей в сфере электронного обучения.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, знаковый орграф, взвешенный орграф, компьютерный тренинг, адаптивное обучение, электронное обучение.

Цитирование: Соловов А.В., Меньшикова А.А. Когнитивное моделирование процессов адаптивного обучения // Онтология проектирования. 2024. Т.14, №2(52). С.181-195. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-181-195.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Когнитивное моделирование (КМ) определяется как поиск наиболее эффективных управленческих решений и/или сценариев развития событий в слабо структурированных ситуациях на основе выделения базовых факторов, характеризующих складывающуюся ситуацию, и оценка взаимовлияния этих факторов. Методология КМ предложена в работе [1]. Основой этой методологии является понятие когнитивной карты [2].

Когнитивная карта ситуации представляет собой взвешенный ориентированный граф (орграф), в котором вершины взаимно однозначно соответствуют ядру базисных факторов исследуемого процесса. Ядро базисных факторов может быть верифицировано с помощью *интеллектуального анализа данных*, позволяющего отбросить избыточные факторы, слабо связанные с ядром базисных факторов [3]. Основой математического аппарата КМ является дискретная математика [4]. КМ находит применение в различных предметных областях при создании информационных систем [5-7], визуализации [8] и др., включая сферу образования.

В статье [9] приведены примеры когнитивных моделей проблем системы образования в её взаимодействии с обществом и результаты сценарного моделирования. В работе [10] рассматривается технология разработки электронного учебного курса, в которой используется проектирование структурно-логической модели содержания курса в виде когнитивной карты. В работе [11] предлагается методика когнитивного проектирования школьного урока на основе содержания предмета «Информатика». В статье [12] КМ педагогических ситуаций описывается как процесс, состоящий из шести последовательных и взаимосвязанных этапов. В работе [13] предлагается накапливать цифровые следы учащихся и визуализировать их в виде когнитивной карты диагностики знаний. В статье [14] КМ используется для прогнозирования востребованности компетенций при корректировке программ обучения. Статья [15] посвящена разработке адаптивного механизма управления качеством обучения, позволяющего априорно предсказывать результаты возможных управленческих решений и осуществлять выбор их наиболее эффективного варианта.

КМ особо актуально в связи с применением искусственного интеллекта (ИИ) в обучении.

Обучение определяется как управление познавательной деятельностью обучающихся с целью формирования у них определённых знаний, умений и навыков. Можно сформулировать две задачи оптимального обучения. Первая задача заключается в **максимизации уровня обученности** при ограничениях (сверху) на время обучения, вторая - в **минимизации времени обучения** при ограничениях (снизу) на уровень обученности.

Решение задач оптимального обучения базируется на адаптации, которой обычно называют интеллектуализацию систем электронного обучения (ЭО), а соответствующие обучающие системы интеллектуальными. Адаптация в таких системах реализуется посредством использования знаний о предметной области, обучаемом и стратегиях обучения для обеспечения гибкой индивидуализированной учебной деятельности [16]. Важным компонентом адаптации являются **математические модели процессов обучения**, позволяющие прогнозировать результаты и оптимизировать процедуру обучения.

Начало формальным подходам к **моделированию процессов обучения** было положено Г. Эббингаузом в исследованиях человеческой памяти в конце XIX века [17]. Им была предложена кривая забывания (или сохранения) учебной информации. Последующие исследования привели к созданию монотонных асимптотических и стохастических моделей обучаемости. Эти модели послужили фундаментом для развития работ по моделированию процессов ЭО, в том числе к выдвигению концепции экспертных и интеллектуальных обучающих систем. Идеи интеллектуализации ЭО и соответствующие математические модели начинают применяться в системах сетевого обучения, в разработке образовательных порталов.

Для описания содержания и процессов ЭО уже используются дискретные математические модели (см., например, [18, 19]), дополнительные исследования когнитивных моделей необходимы, в частности, для адаптивного обучения (АО).

Цель данной статьи – исследование КМ процессов АО. В основу работы положены методы системного и онтологического анализов [20], педагогической психологии и дидактики, дискретной математики и многолетний опыт авторов в сфере образования, теории и технологий ЭО. В работе используются терминология и символика книги [4].

1 Орграфы как модели процессов АО

Модель процесса АО строится следующим образом: наиболее существенные факторы-переменные АО считаются вершинами орграфа; от вершины u_i (переменная u_i) к вершине u_j (переменная u_j) проводится дуга, если изменение переменной u_i оказывает непосредственное воздействие на переменную u_j . Этой дуге приписывается знак «плюс», если воздействие яв-

ляется «усилением» (т.е. увеличение переменной u_i приводит к увеличению переменной u_j , уменьшение u_i приводит к уменьшению u_j), и знак «минус», если воздействие является «торможением» (т.е. увеличение переменной u_i приводит к уменьшению переменной u_j , уменьшение u_i приводит к увеличению u_j).

В системах ЭО можно выделить три типовых сценарных схемы: просмотр теории, компьютерный тренинг, контроль. Наибольшие возможности для адаптации предоставляет сценарий компьютерного тренинга. Его цель - осмысление и закрепление учебного материала в системах декларативного типа (электронных учебниках, виртуальных учебных кабинетах), формирование профессионально-ориентированных умений, навыков, интуиции в системах процедурного типа (тренажёрах, виртуальных учебных лабораториях).

Сценарии компьютерного тренинга обычно содержат четыре основных шага:

- 1) предъявление обучающемуся упражнений по отдельному учебному элементу или совокупности учебных элементов, с которыми обучающийся познакомился в ходе предшествующего просмотра теории;
- 2) выполнение обучающимся этих упражнений;
- 3) компьютерная оценка результатов выполнения каждого упражнения;
- 4) оказание обучающемуся помощи в процессе выполнения каждого упражнения.

В качестве примера можно рассмотреть трёхзвенную модель процесса АО в виде знакового орграфа D_1 и его матрицы смежности $A(D_1)$ (рисунок 1), где в качестве вершин орграфа представлены следующие переменные:

- количество вопросов (упражнений), которые получает обучающийся для усвоения порции учебной информации (вершина В);
- уровень обученности (вершина УО);
- уровень помощи (вершина П).

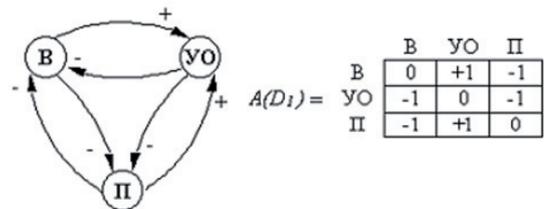


Рисунок 1 – Трёхзвенная модель процесса адаптивного обучения в виде знакового орграфа D_1

Переменную УО целесообразно рассматривать в интервале $[0,1]$. Несмотря на многообразие способов оценки уровня обученности, их суть сводится к измерению доли от некоего идеального значения критерия, выбранного для характеристики обученности. Это может быть отношение количества правильно выполненных существенных операций упражнения к общему числу существенных операций, отношение количества набранных баллов за выбранный ответ к максимально возможному числу баллов, оценивающих упражнение с выборочными ответами в системах декларативного типа и т.п. Например, показатели эффективности проектного поиска, используемые в качестве критериев уровня обученности в тренажёрах для инженеров, учитывают кроме отклонения от оптимального решения вычислительные затраты на поиск, нормированные к интервалу $[0,1]$.

Уровень помощи (вершина П) может быть различным: подсказка, намёк, теоретическая информация или полный ответ на вопрос (полное описание процесса решения упражнения) в системах декларативного типа; величины отклонений от оптимального решения, результаты поверочного расчёта работоспособности проектного решения, сгенерированного обучающимся, демонстрация оптимального решения. В зависимости от степени полноты помощи величину П удобно представлять в интервале $[0,1]$. Здесь 0 - это отсутствие помощи; 1 - полное решение упражнения с разбором и обоснованием.

В основу модели, представленной в виде орграфа D_1 , положены следующие дидактические предположения о взаимном влиянии переменных процесса АО. Увеличение числа вопросов-упражнений в ходе обучения ведёт к повышению уровня обученности (дуга (В, УО) имеет знак «+») и уменьшению помощи, оказываемой в процессе выполнения упражнений

(дуга (В, П) имеет знак «-»). Увеличение уровня обученности ведёт к уменьшению количества упражнений и уменьшению уровня помощи (дуги (УО, В) и (УО, П) имеют знак «-»). Увеличение помощи ведёт к уменьшению количества упражнений и повышению уровня обученности (соответственно дуга (П, В) имеет знак «-», а дуга (П, УО) – знак «+»).

В этой простой модели АО не все указанные предположения о взаимном влиянии различных переменных являются очевидными. Так, характер влияния помощи на уровень обученности может быть противоположным, исходя из предположения, что выполнение упражнений с помощью (не самостоятельно) не способствует росту уровня обученности, а, наоборот, уменьшает её. В этом случае использование помощи можно рассматривать как аналог функции штрафа, и её увеличение влечёт за собой снижение уровня обученности и повышение количества вопросов-упражнений. Приняв такое предположение, необходимо в орграфе D_1 сменить знаки дуг (П, УО) и (П, В) на противоположные.

Знаковые орграфы позволяют наглядно визуализировать основные характеристики процесса АО (в виде вершин орграфа), указать связи между ними (в виде ориентированных дуг) и характер этих связей - усиление или ослабление (в виде знаков дуг). Модель АО в виде знакового орграфа ЭО позволяет рассматривать и анализировать связи между характеристиками проектируемого или реализованного процесса АО. В этой модели АО все воздействия переменных (вершин) друг на друга одинаковы по силе, поскольку вес каждой дуги равен единице. Знаковый орграф можно трактовать как структурную модель процесса АО. Более точную параметрическую модель можно построить, приписывая дугам орграфа различные веса, что приводит к взвешенному орграфу. Такой вес интерпретируется как относительная сила воздействия и может быть положительным (для усиливающих воздействий) или отрицательным (для ослабляющих воздействий).

В качестве примера на рисунке 2 показан взвешенный орграф D_2 , построенный путём преобразования знакового орграфа D_1 (см. рисунок 1). Веса орграфа D_2 определены на основе эвристических предположений об общих закономерностях процесса АО.

Более сложная когнитивная модель АО показана на рисунке 3. В неё включены такие дополнительные факторы (вершины), как объём изучаемой порции учебного материала (ОМ), сложность материала (СМ), уровень способностей обучающихся (УС). Их величины, характеризующие исходные показатели моделируемого процесса, также можно нормировать к интервалу $[0,1]$. В данной модели они оказывают влияние лишь на вершины В, УО и П, но обратных связей от них не имеют. Влияние друг на друга вершины ОМ, СМ, УС также не оказывают.

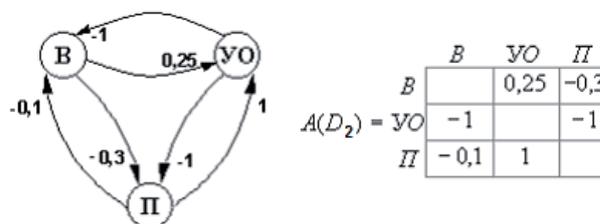


Рисунок 2 – Пример модели адаптивного обучения в виде взвешенного орграфа D_2

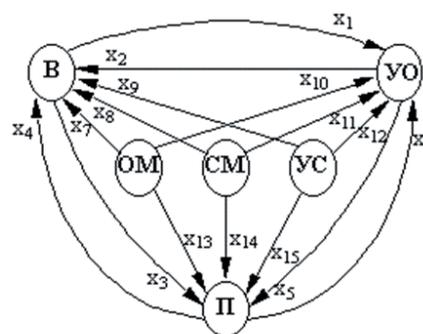


Рисунок 3 – Пример более сложной модели адаптивного обучения

2 Импульсные процессы во взвешенных орграфах

Рассмотренные орграфы АО являются статическими, в то время как реальные процессы АО является динамическим. Для анализа моделей АО в виде взвешенных орграфов необхо-

димо построить алгоритм учёта влияния изменений одной вершины на другие. В основу такого алгоритма может быть положена идея импульсного процесса [4]. В некоторую вершину анализируемого орграфа вносится внешнее возмущение. Например, в вершину В (см. рисунок 2) добавляется некоторое количество вопросов-упражнений. Далее рассматривается распространение начального импульса и определяются значения вершин УО и П. Для этого можно рассмотреть орграф, n вершин которого представлены совокупностью u_1, u_2, \dots, u_n . Пусть каждая вершина u_i в ходе импульсного процесса принимает значение $v_i(t)$ по шагам импульсного процесса $t = 0, 1, 2, \dots$ и т.д. Здесь начальный шаг выделен отдельно ($t=0$) в силу его особой значимости. Значение $v_i(t+1)$ определяется значением $v_i(t)$ и информацией о том, увеличены или уменьшены значения других вершин u_j , смежных с u_i , на шаге t . Для определения значений вершин используется следующая формула [4]:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \sum_{j=1}^n x(u_j, u_i) p_j(t), \quad (1)$$

где $x(u_j, u_i)$ - вес дуги из вершины u_j в вершину u_i , при этом $x(u_j, u_i) = 0$, если дуга (u_j, u_i) отсутствует; $p_j(t)$ - изменение в вершине u_j на шаге t .

В соответствии с (1), если, например, имеется дуга из u_j в u_i с весом x и значение вершины u_j возрастает на шаге t на некоторое число z , то значение вершины u_i на шаге $t+1$ возрастает на величину $z \cdot x$.

Следует различать понятие исходного $v_i(исх.)$ и начального $v_i(0)$ значений в каждой вершине u_i . При этом

$$v_i(0) = v_i(исх.) + p_i(0), \quad (2)$$

где $p_i(0)$ - начальный импульс (изменение на шаге $t = 0$) вершины u_i .

Изменение $p_i(t)$ в вершине u_i при $t > 0$ называется импульсом в вершине u_i на шаге t и определяется как

$$p_i(t) = v_i(t) - v_i(t-1). \quad (3)$$

Далее используются следующие обозначения:

$V(исх.) = (v_1(исх.), v_2(исх.), \dots, v_n(исх.))$ - вектор исходных значений вершин;

$P(0) = (p_1(0), p_2(0), \dots, p_n(0))$ - вектор начальных импульсов ($t = 0$);

$P(t) = (p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t))$ - вектор импульсов на шаге $t > 0$;

$V(t) = (v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t))$ - вектор значений вершин на шаге $t > 0$.

Дидактическую интерпретацию введённых понятий можно рассмотреть на примере орграфа D_2 (см. рисунок 2). Пусть вектор исходного состояния $V(исх.)$ этой модели характеризует внутреннее исходное состояние системы АО, причём в этом векторе может отличаться от нуля только уровень помощи, т.е. значение вершины П, и это значение характеризует максимально возможный уровень помощи, вложенный разработчиками в систему АО: $V(исх.) = (0, 0, 1)$, т.е. число вопросов-упражнений $B = 0$, исходный уровень обученности УО $= 0$, а максимальный уровень встроенной помощи $\Pi = 1$.

Компоненты вектора начальных импульсов $P(0)$ можно трактовать как внешние исходные факторы. Первый компонент этого вектора – значение вершины В – определяют как число вопросов-упражнений, которые получает в ходе учебной работы конкретный обучающийся с исходным уровнем обученности УО - вторым компонентом вектора $P(0)$. Третий компонент данного вектора – значение вершины П – интерпретируется как внешняя помощь, которая может быть оказана обучающемуся. Например, $P(0) = (5, 0.2, 1)$ означает, что конкретному обучающемуся с начальным уровнем обученности УО $= 0.2$ в диалоге с компьютером будет дано 5 упражнений ($B = 5$) и в ходе выполнения упражнений ему будет оказываться помощь, исходный уровень которой будет максимально возможным ($\Pi = 1$).

С использованием формул (1-3) можно рассмотреть последовательное изменение значений вершин орграфа в ходе развития импульсного процесса, начиная с шага $t = 0$:

$$V(0) = V(ucx.) + P(0);$$

$$V(1) = V(0) + A^T P(0) = V(ucx.) + P(0) + A^T P(0), P(1) = A^T P(0);$$

$$V(2) = V(1) + A^T P(1) = V(ucx.) + P(0) + A^T P(0) + (A^T)^2 P(0), P(2) = (A^T)^2 P(0);$$

.....;

$$V(t) = V(t-1) + A^T P(t-1) = V(ucx.) + P(0) + A^T P(0) + (A^T)^2 P(0) + \dots + (A^T)^t P(0), P(t) = (A^T)^t P(0).$$

Здесь A - матрица смежности орграфа размером $n \times n$; индекс T означает транспонирование, а t - степень (при этом коэффициенты матрицы A , соответствующие дугам орграфа, полагаются равными величинам весов дуг).

Преобразуя заключительное выражение для $V(t)$ в этой последовательности с целью его упрощения, алгоритм развития импульсного процесса можно представить следующей матричной формулой:

$$V(t) = V(ucx.) + (I + A + A^2 + \dots + A^t)^T P(0), \quad (4)$$

где I - единичная матрица размером $n \times n$.

Вычисления по формуле (4) позволяют моделировать динамику процесса АО, исследовать и прогнозировать его результаты - конечные значения вершин орграфа в импульсном процессе. Например, задавая параметры в орграфе D_2 (см. рисунок 2) в векторе $V(ucx.)$, а внешние исходные параметры, в том числе исходный уровень обученности обучающегося, в векторе $P(0)$, можно дать прогноз уровня обученности обучающегося, полученного по окончании компьютерного тренинга. Если выполнение каждого упражнения ограничено по времени, то получится соответствие данной модели первой задаче оптимального обучения. Если требуемый уровень обученности задан, то, используя импульсный процесс в орграфе, можно подобрать необходимое число упражнений для достижения заданного уровня обученности, что соответствует второй задаче оптимального обучения.

Импульсный процесс, соответствующий формуле (4), может быть устойчивым или неустойчивым. В устойчивых импульсных процессах значения вершин выходят на асимптоту. В неустойчивых процессах возмущение, вносимое в одну из вершин, приводит либо к возрастающим колебаниям значений вершин орграфа, либо к неограниченному их увеличению или уменьшению. Существуют разные определения устойчивости импульсных процессов в орграфах, в частности, в работе [4] определены два понятия: простая и абсолютная импульсная устойчивость. Здесь и далее целесообразно говорить об абсолютной импульсной устойчивости, для которой в соответствии с [4] импульсный процесс характеризуется *асимптотическим приближением значений вершин к некоторым фиксированным величинам*.

В качестве примеров на рисунке 4 приведены графики развития неустойчивых импульсных процессов относительно вершины УО в орграфе D_2 с разными знаками весов дуг (П, В) и (П, УО). На графиках значения соседних импульсов соединяются линиями только из соображений наглядности.

Неустойчивость импульсных процессов в орграфе означает, что выбранная модель является неработоспособной (она не позволяет прогнозировать результаты процесса АО) и необходимо изменить её структуру либо параметры - веса дуг орграфа.

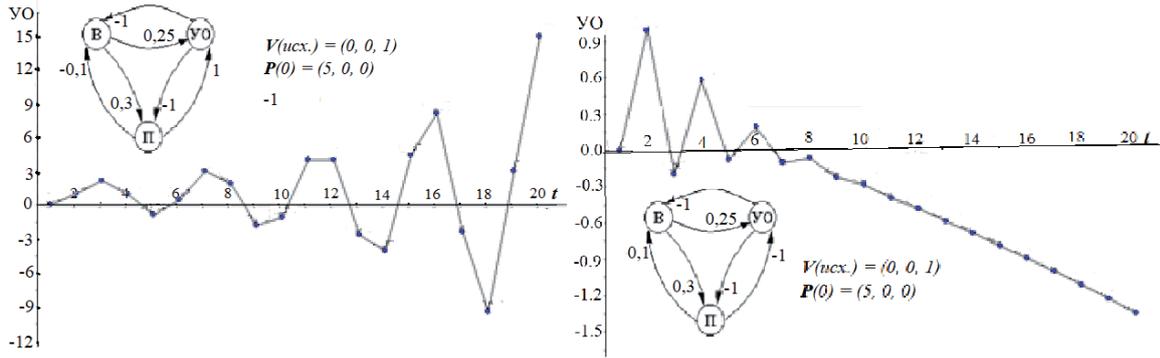


Рисунок 4 – Примеры графиков неустойчивых импульсных процессов во взвешенных орграфах

3 Оптимизация параметров орграфов АО

Исследования параметров (весов дуг) орграфов, представляющих модели процессов АО, показали, что подобрать эти параметры так, чтобы орграф был импульсно устойчив и имел высокую скорость сходимости затруднительно даже опытному эксперту.

В работе [4] показано, что импульсный процесс в орграфе будет абсолютно устойчивым, если каждое собственное значение матрицы смежности орграфа по абсолютной величине не превышает единицы. В этой же работе были предложены некоторые частные приёмы анализа устойчивости орграфов и изменения их структуры с целью достижения устойчивости, не прибегая к трудоёмким вычислениям собственных значений.

При исследовании моделей АО предложено использовать более универсальный подход к подбору параметров абсолютно устойчивых орграфов, опирающийся на указанные выше признаки устойчивости и основанный на оптимизации значений весов дуг орграфов [18].

Пусть оптимизируемый орграф АО задан матрицей смежности A размером $n \times n$. Вектор проектных переменных - это вектор варьируемых весов дуг орграфа

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_m). \tag{5}$$

Кроме варьируемых весов x_k в матрице смежности орграфа могут присутствовать и фиксированные веса, которые не входят в вектор проектных переменных.

На вес каждой варьируемой дуги накладываются ограничения

$$x_k \in [c_k, d_k], \tag{6}$$

где c_k и d_k – минимально и максимально возможные значения переменной x_k соответственно. Эти ограничения задаются разработчиком модели АО на основе эвристических соображений о взаимном влиянии различных факторов АО (вершин орграфа) друг на друга. Собственные значения матрицы A можно представить в виде вектора $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n)$, где $\lambda_i = a_i \pm b_i i$, т.е. λ_i может быть действительным или комплексным числом.

Функция цели

$$f(X) = \max(|\lambda_1|, |\lambda_2|, \dots, |\lambda_i|, \dots, |\lambda_n|), \tag{7}$$

где $|\lambda_i|$ - абсолютная величина λ_i .

С учётом введённых обозначений и указанного выше условия абсолютной устойчивости импульсных процессов в орграфах можно сформулировать задачу оптимизации:

$$\text{минимизировать } f(X) \text{ при ограничениях } x_k \in [c_k, d_k]. \tag{8}$$

В качестве алгоритма оптимизации целесообразно использовать идеи метода Монте-Карло (ММК). Используемый алгоритм ММК состоит в последовательном анализе (пробах) случайно выбранных точек в допустимой области проектных переменных. Координаты точек на каждой пробе применительно к поставленной задаче можно вычислять по формуле

$$x_{kp} = c_k + (d_k - c_k) \xi_{kp}, \tag{9}$$

где p – порядковый номер пробы процесса статистических испытаний;

ξ_{kp} – случайное число, равномерно распределённое в интервале $[0,1]$.

Выбор ММК обусловлен тем, что в нём не требуется задавать исходную точку. Достаточно указать лишь область поиска (см. формулу (9)).

Каждая случайная проба процесса оптимизации требует вычисления собственных значений матрицы смежности орграфа A . Известно, что число λ является собственным значением матрицы A , если

$$\det(A-\lambda I) = 0. \tag{10}$$

Выражение (10) называется характеристическим уравнением матрицы A . Раскрывая определитель в этом уравнении, можно получить характеристический многочлен

$$C_A(\lambda) = \det(A-\lambda I) = a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0.$$

Собственные значения матрицы A совпадают с корнями характеристического многочлена. Точное аналитическое решение уравнения (10) уже при $n > 3$ трудно получить, поэтому для нахождения собственных значений матрицы A можно использовать приближённый алгоритм Якоби с понижением нормы для действительных несимметричных матриц [21]. Итогом работы алгоритма является блочно-диагональная матрица A' размерностью $n \times n$: блоки 1×1 содержат действительные собственные значения, а блоки размера 2×2

$$\begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix}$$

соответствуют комплексным значениям $\lambda = a \pm bi$; при этом собственные значения расположены в матрице A' в порядке убывания их абсолютной величины.

В качестве примера рассматривается трёхзвенный орграф (см. рисунок 2), в котором веса дуг представлены вектором $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ и зафиксированы первые пять переменных вектора $X = (0.25, 0.3, -1, -1, -0.1, x)$. Варьируя весом дуги (II, УО) x в диапазоне $[-1, 1]$, можно построить графики изменения целевой функции $f(X)$ задачи оптимизации (8) и компонентов матрицы собственных значений A' : действительного собственного значения λ_1 и величин a и b - составляющих комплексных собственных значений $\lambda_{2,3} = a \pm bi$, (рисунок 5).

В данном случае вектор проектных переменных X содержит только одну переменную x . В диапазоне x от -1 до $-0,35$ $f(X)$ убывает и совпадает с действительным собственным значением λ_1 (см. рисунок 5а). Далее с увеличением x от $-0,35$ величина $f(X)$ определяется комплексными собственными значениями $\lambda_{2,3}$ и сначала немного

уменьшается, а затем возрастает и при $x \approx 0,7$ переходит через единицу. Оптимальное значение $x_0 = -0,195$; $f(x_0) = 0,473$. При $x = x_0$ матрица собственных значений

$$A' = \begin{bmatrix} -0,186 & -0,435 & 0 \\ 0,435 & -0,186 & 0 \\ 0 & 0 & 0,373 \end{bmatrix}$$

Таким образом, в диапазоне весов дуги (II, УО) $x \in [-1, 0.7]$ импульсный процесс в рассматриваемом орграфе устойчив. Скорость сходимости импульсного процесса, характеризу-

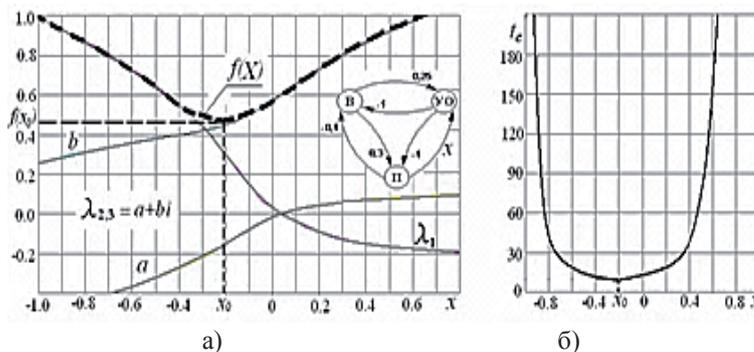


Рисунок 5 – Изменение целевой функции (а) и скорости сходимости импульсного процесса (б) в орграфе при варьировании значений дуги (II, УО)

емая числом шагов t_c , после которых значения вершин практически не изменяются, существенно зависит от величины $f(X)$ (см. график изменения t_c при $V(\text{исх.}) = (0, 0, 1)$ и $P(0) = (5, 0, 0)$ на рисунке 5б). По мере уменьшения $f(X)$ абсолютные величины собственных значений матрицы смежности орграфа выравниваются и в пределе приближаются к нулю. При этом на кривых развития импульсного процесса амплитудные всплески сглаживаются, и скорость сходимости возрастает (рисунок 6).

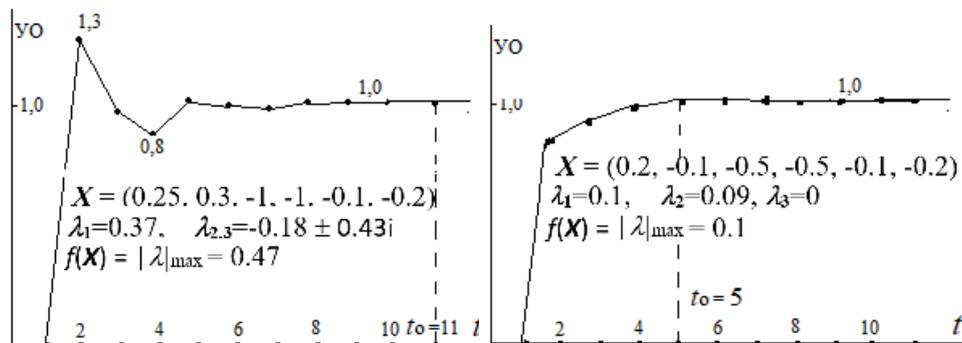


Рисунок 6 – Влияние величин собственных значений на кривые развития импульсного процесса и скорость сходимости в орграфе для $V(\text{исх.}) = (0, 0, 1)$ и $P(0) = (5, 0, 0)$

Результаты вычислительных экспериментов показывают также, что функция цели $f(X)$ является многоэкстремальной, обладает большим числом локальных минимумов. Попадание в локальный минимум определяется исходными значениями параметров вектора X и ограничениями на них, т.е. роль разработчика моделей АО, назначающего эти значения, является весьма существенной.

4 Методика построения моделей АО

Обобщая рассмотренный подход к моделированию процессов АО с помощью взвешенных орграфов, можно предложить следующие этапы построения моделей АО.

- 1) определение наиболее значимых факторов моделируемого процесса АО (вершин орграфа).
- 2) выявление взаимных связей между этими факторами с отображением их в виде ориентированных рёбер (дуг) орграфа и знаков.
- 3) назначение численных диапазонов весов дуг орграфа на основе эвристических соображений о степени взаимного влияния факторов АО.
- 4) оптимизация весов дуг орграфа для достижения устойчивости и сходимости импульсного процесса с помощью рассмотренного алгоритма оптимизации.
- 5) анализ модели на адекватность. В ходе анализа изменяют значения компонентов векторов $V(\text{исх.})$ и $P(0)$ и рассматривают конечный уровень значений вершин орграфа с использованием (4), оценивая их с точки зрения эвристических соображений о моделируемом процессе АО.
- 6) проверка достоверности модели в ходе педагогических экспериментов на конкретной системе ЭО.
- 7) корректировка модели (пп. 1-5) по результатам педагогических экспериментов.

5 Сопоставление с педагогическим экспериментом

В педагогическом эксперименте участвовали две группы обучающихся: слушатели факультета повышения квалификации преподавателей (ФПКП) Самарского университета (10

человек) и студенты третьего курса (10 человек). В эксперименте со слушателями ФПКП использовалось электронное учебное пособие по курсу «Методы и технологии электронного дистанционного обучения», один из учебных элементов темы «Психологические механизмы усвоения знаний». В эксперименте со студентами – электронное пособие по курсу «Основы САПР», один из учебных элементов темы «Математическая формулировка проектных задач».

В ходе эксперимента обучающиеся работали с электронным учебным пособием в соответствии с типовыми сценариями ЭО (см. раздел 1). Сначала знакомились с теоретической частью учебного материала, объём которой соответствовал примерно одной печатной странице. Далее работали с пособием в режиме компьютерного тренинга по теории. В конце эксперимента обучающиеся проходили контрольный тест, в ходе которого замерялся достигнутый уровень обученности.

Сравнение проводилось с двумя моделями АО: трёхзвенной моделью компьютерного тренинга D_3 (рисунок 7) и более сложной моделью D_4 (рисунок 8). Параметры этих моделей (веса дуг орграфов) были определены в соответствии с пп. 1-5 методики построения моделей АО (см. раздел 4).

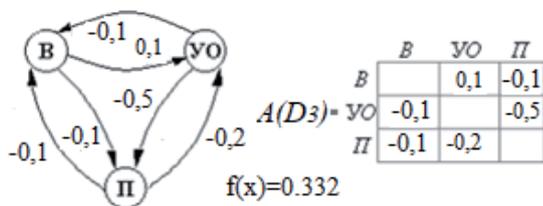


Рисунок 7 – Модель адаптивного обучения в виде орграфа D_3

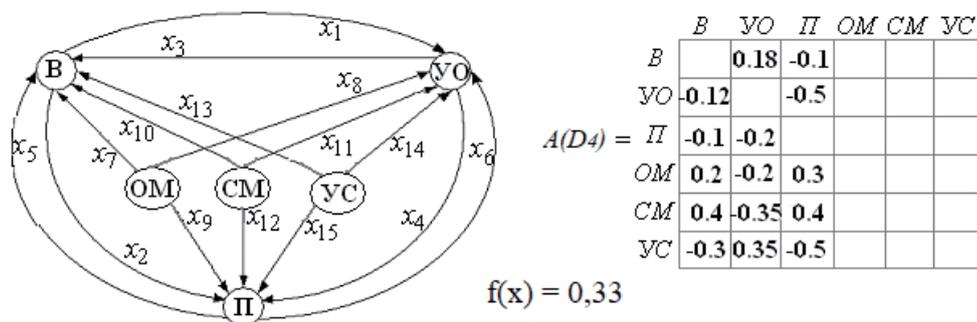


Рисунок 8 – Модель адаптивного обучения в виде орграфа D_4

Результаты эксперимента, средние по каждой группе значения уровня обученности (УО-эксп.), в сравнении с теоретическими данными (УОмод.), полученными на моделях D_3 (параметры модели см. на рисунке 7) и D_4 (см. рисунок 8), представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 – Сопоставление экспериментальных и модельных (для D_3) данных

Обучающиеся	$V(исх.)$	$P(\theta)$	УОмод.	УОэксп.	$\Delta\%$
Слушатели ФПКП	(0,0,1)	(4,0,0)	0,67	0,75	+12
Студенты	(0,0,1)	(4,0,0)	0,67	0,60	-10

Таблица 2 – Сопоставление экспериментальных и модельных (для D_4) данных

Обучающиеся	$V(исх.)$	$P(\theta)$	УОмод.	УОэксп.	$\Delta\%$
Слушатели ФПКП	(0,0,1,0,0,0)	(4,0,0,1,0,5,0,86)	0,76	0,75	-1,3
Студенты	(0,0,1,0,0,0)	(4,0,0,1,0,8,0,8)	0,61	0,60	-1,5

Исходные данные $V(исх.)$ и $P(0)$ для вычислений на моделях были приняты из следующих соображений. Уровень максимальной встроенной помощи в электронном пособии - третий компонент вектора $V(исх.)$ был принят 1 (в ходе выполнения тренинговых упражнений доступен полный просмотр теории). Величина первого компонента вектора начальных импульсов $P(0)$ соответствовала числу вопросов компьютерного тренинга (в эксперименте - четыре вопроса). Объём изучаемого материала (ОМ) - четвёртый компонент вектора $P(0)$ в модели D_4 экспертно был оценен как 1. Сложность материала (СМ) - пятый компонент вектора $P(0)$ в модели D_4 - экспертно оценена в 0,5 для материала, изучаемого слушателями ФПКП, и в 0,8 для материала, изучаемого студентами. Уровень способностей (УС) – шестой компонент вектора $P(0)$ в модели D_4 - оценен экспертно для студентов в 0,8 (это была элитная группа специализации по САПР, все экзаменационные оценки которой за предшествующий период обучения были не ниже «хорошо»), а для слушателей ФПКП (аспирантов и молодых преподавателей) - несколько выше (0,86).

Максимальные расхождения $\Delta\%$ были получены на более грубой, трёхзвенной модели (см. таблицу 1). Экспериментальные значения слушателей ФПКП превысили модельные значения на 12%, а у студентов оказались меньше на 10%. Это объясняется тем, что сложность учебного материала, которая в данной модели не учитывается, у студентов была выше, чем у слушателей ФПКП. Учёт характеристик учебного материала в модели D_4 позволил получить хорошее совпадение модельных и экспериментальных данных (см. таблицу 2).

6 Рекомендации по применению

Когнитивные модели АО могут рассматриваться как прескриптивные и дескриптивные. Прескриптивные модели описывают, каким должен быть процесс АО. Исследование таких моделей, экспертный анализ и оптимизация их параметров позволяют обоснованно подходить к проектированию сценариев учебной работы, планированию различных видов помощи, формулировке требований к структуре учебного материала, определению количества и типов упражнений для его усвоения. Дескриптивные модели описывают существующие процессы АО и могут использоваться, например, для анализа их эффективности.

Когнитивные модели процессов АО могут встраиваться непосредственно в системы ЭО и использоваться как средства интеллектуального управления. Так, в модели, показанной на рисунке 3, величины вершин ОМ, СМ можно задавать как характеристики конкретной порции учебного материала при его подготовке для системы ЭО, а величины УС и исходное значение УО определять в ходе предварительного (входного) тестирования каждого обучающегося. Исходная величина П – это возможный максимум помощи, предусмотренной в обучающей системе. Имея эти данные, система ЭО на основе встроенной когнитивной модели соответствующего сценария АО и разработанных алгоритмов может подобрать для каждого обучающегося минимально необходимое количество упражнений для достижения требуемого уровня обученности по каждой порции учебной информации и дать прогноз требуемого времени для освоения всего объёма учебного материала.

Процесс построения когнитивных моделей АО – определение наиболее значимых факторов, выбор исходных параметров модели и ограничений на их величины, исследование устойчивости и оптимизация параметров – требует высокой дидактической квалификации разработчиков. Предложенные алгоритмы могут использоваться не только как средства исследования, проектирования и управления процессом АО, но и как средства педагогического тренинга при подготовке и переподготовке преподавательских кадров в сфере ЭО.

Заключение

Предлагаемый подход к моделированию процессов АО с помощью знаковых и взвешенных орграфов, в которых вершины отображают характеристики АО, а ориентация, знаки и значения весов дуг определяют взаимовлияние этих характеристик, обладает высокой степенью наглядности, удобен для обсуждения и коллективного анализа, позволяет строить модели АО разработчикам и исследователям систем ЭО.

Использование импульсного процесса для построения алгоритма учёта влияния изменений значений вершин орграфа АО на изменения других его вершин позволяет моделировать динамику процесса АО и прогнозировать его результаты.

В ходе вычислительных экспериментов на орграфе АО установлено, что импульсный процесс в орграфе может быть устойчивым или неустойчивым. Неустойчивость импульсного процесса означает, что выбранная модель является неработоспособной и необходимо изменить её структуру либо параметры – веса дуг орграфа.

Постановка задачи оптимизации весов дуг взвешенного орграфа, основанная на минимизации максимального по модулю собственного значения его матрицы смежности, и предложенный метод её решения позволяют облегчить процесс построения работоспособной модели АО.

В ходе вычислительных экспериментов на орграфе АО установлено, что целевая функция оптимизации весов дуг взвешенного орграфа является многоэкстремальной.

Разработанная методика моделирования процессов АО на основе взвешенных орграфов может применяться при исследовании, проектировании и использовании средств адаптации и управления в системах ЭО, а также для дидактического тренинга разработчиков и пользователей этих систем.

Список источников

- [1] *Axelrod R.* The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites. Princeton. University Press, 1976.
- [2] *Tolman E.C.* Cognitive maps in rats and men // *Psychological Review*. 1948. V.55(4). P.189–208.
- [3] *Максимов В.И., Корноушенко Е.К., Качаев С.В.* Когнитивные технологии для поддержки принятия управленческих решений // *Информационное общество*. 1999. Т.2. С.50-54.
- [4] *Робертс Ф.С.* Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. М.: Наука, 1986. 494 с.
- [5] *Сорокин А.Б.* Концептуальное проектирование интеллектуальных систем поддержки принятия решений // *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №3(25). С.247-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-3-247-269.
- [6] *Клещёв А.С., Тимченко В.А.* Теоретические основы оболочки для интерактивных систем верификации интуитивных математических доказательств // *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №2(28). С.219-239. DOI:10.18287/2223-9537-2018-8-2-219-239.
- [7] *Бухановский А.В., Иванов С.В., Ковальчук С.В., Нечаев Ю.И.* Онтологическая система знаний и вычислительных ресурсов современных интеллектуальных технологий // *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №1(35). С.22-33. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-22-33.
- [8] *Гаврилова Т.А., Страхович Э.В.* Визуально-аналитическое мышление и интеллект-карты в онтологическом инжиниринге // *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №1(35). С.87-99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
- [9] *Горелова Г.В.* Исследование проблем системы образования. Когнитивное моделирование // *Образовательные технологии*. 2018; 3: 60-75.
- [10] *Сиговцев Г.С., Семенов И.О.* Разработка электронного учебного курса с использованием когнитивной карты как модели содержания // *Дистанционное и виртуальное обучение*. 2012; 3: 97-106.
- [11] *Макарова Н.В., Шапиро К.В.* Методика проектирования когнитивных карт уроков // *Известия Российской государственной педагогической академии им. А.И. Герцена*. 2020; 198: 66-74. DOI: 10.33910/1992-6464-2020-198-66-74.
- [12] *Камалеева А.Р., Грузкова С.Ю.* Теоретическое обоснование процесса когнитивного моделирования педагогических ситуаций // *Самарский научный вестник*. 2018; 7(2): 245-247.

- [13] *Ughev V.A., Zakharin K.M., Baryshev R.A.* Cognitive Maps of Knowledge Diagnosis as an Element of a Digital Educational Footprint and a Copyright Object // *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems : Proceedings of 4th Computational Methods in Systems and Software (CoMeSySo) 2020*, Vsetin, 14–16 октября 2020 года. Springer Nature Switzerland; 2020: 349-357. DOI:10.1007/978-3-030-63319-6_31.
- [14] *Асанов А.З., Мышкина И.Ю., Грудцына Л.Ю.* Прогнозирование востребованности компетенций при корректировке программ обучения с помощью когнитивных моделей // *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №2(32). С.203-213. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-203-213.
- [15] *Гречко М.В.* Когнитивное моделирование как инструмент адаптивного управления качеством образования // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2017. Т.13. №4(349). С.725-735. DOI: 10.24891/ni.13.4.725.
- [16] *Брусиловский П.Л.* Интеллектуальные обучающие системы // *Информатика. Научно-технический сборник. Серия Информационные технологии. Средства и системы*. 1990. Т.2. С.3-22.
- [17] *Ebbinghaus H.* Über das Gedächtnis; Untersuchungen zur experimentellen Psychologie. Leipzig: Duncker u. Humblot. 1885. 169 s.
- [18] *Соловов А.В., Меньшикова А.А.* Дискретные математические модели в исследовании процессов автоматизированного обучения // *Информационные технологии*. 2001. Т.12. С.43–48.
- [19] *Соловов А.В., Меньшикова А.А.* Моделирование процессов автоматизированного обучения на основе взвешенных ориентированных графов // *Дистанционное и виртуальное обучение*. 2011. Т.11. С.47-62.
- [20] *Боргест Н.М.* Системный и онтологический анализы: схожесть и различие понятий // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14. №1(51). С.9-28. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28.
- [21] *Уилкинсон, Райни.* Справочник алгоритмов и программ на языке Алгол. Линейная алгебра: Пер. с англ. - М.: Машиностроение. 1976. 590 с.

Сведения об авторах



Соловов Александр Васильевич, 1948 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт имени С.П. Королёва в 1972 г., к.т.н. (1977). Профессор по кафедре технической кибернетики (2006). Действительный член Российской академии информатизации образования (1996). В списке научных трудов более 300 работ в области САПР, теории и технологий электронного обучения. ORSID: 0000-0001-6288-820X; Author ID (РИНЦ): 560817; Author ID Scopus): 57222040521. a_solovov@mail.ru. ✉



Меньшикова Анастасия Александровна, 1972 г. рождения. Окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королева в 1996 г., к.т.н. (2004). Доцент кафедры суперкомпьютеров и общей информатики Самарского университета. В списке научных трудов более 40 работ. ORSID: 0000-0001-8201-7065; Author ID (РИНЦ): 382400; Author ID (Scopus): 57222036809; Researcher ID (WoS): H-6847-2017. nastyamenshikova@gmail.com.

Поступила в редакцию 19.02.2024, после рецензирования 30.03.2024. Принята к публикации 10.04.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-181-195

Cognitive modeling of adaptive learning processes

© 2024, A.V. Solovov ✉, A.A. Menshikova

Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolev), Samara, Russia

Abstract

An approach to modeling adaptive learning processes using signed and weighted directed graphs (digraphs) is examined. The vertices of the digraphs represent the characteristics of educational activities. The orientation, signs, and weights of the digraph arcs define the mutual influence of these characteristics. The dynamics of adaptive learning are

modeled within digraphs using a specific impulse process algorithm. An external disturbance is introduced into a particular vertex of the digraph, and the propagation of this impulse is analyzed, enabling the prediction of values at other vertices of the digraph. The problem of optimizing the weights of digraph arcs is formulated, and an algorithm for solving it is proposed to achieve stability in the impulse process. Computational experiments on a digraph revealed that the objective function for optimizing the arcs of a weighted digraph is multiextremal. The occurrence of a local minimum is determined by the initial values of the vector of design variables (weights of digraph arcs) and constraints on these variables. Consequently, the qualifications of the developer of the adaptive learning model who assigns these values are crucial. Cognitive models of adaptive learning can be classified as prescriptive and descriptive. Prescriptive models outline what the adaptive learning process should be, while descriptive models depict existing adaptive learning processes and can be utilized to study their effectiveness. The developed methodology for cognitive modeling of adaptive learning processes allows for the prediction of learning outcomes and can be employed in the research, design, and implementation of adaptation mechanisms and intelligent control in e-learning systems, as well as in the didactic training of teachers in the field of e-learning.

Keywords: cognitive modeling, signed digraphs, weighted digraphs, computer training, adaptive learning, e-learning.

For citation: Solovov AV, Menshikova AA. Cognitive modeling of adaptive learning processes [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 181-195. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-181-195.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 – Three-tier model of the adaptive learning process in the form of a signed digraph D_1

Figure 2 – Example of an adaptive learning model in the form of a weighted digraph D_2

Figure 3 – Example of a more complex adaptive learning model

Figure 4 – Examples of graphs of unstable impulse processes in weighted digraphs

Figure 5 – Change in the objective function (a) and the rate of convergence of the impulse process (b) in the digraphs when varying the arc values (Π , VO)

Figure 6 – The influence of eigenvalue values on impulse process development curves and convergence rate in the digraphs for $V(\text{out}) = (0, 0, 1)$ and $P(0) = (5, 0, 0)$

Figure 7 – Adaptive learning model in the form of digraph D_3

Figure 8 – Adaptive learning model in the form of digraph D_4

Table 1 – Comparison of experimental and model data (for D_3)

Table 2 – Comparison of experimental and model data (for D_4)

References

- [1] **Axelrod R.** The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites. Princeton. University Press, 1976.
- [2] **Tolman EC.** Cognitive maps in rats and men // *Psychological Review*. 1948; 55(4): 189–208.
- [3] **Maksimov VI, Kornoushenko EK, Kachaev SV.** Cognitive Technologies for Support of Managerial Decision Making [In Russian]. 1999; 2: 50-54.
- [4] **Roberts FS.** Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.; 1976. 560 p.
- [5] **Sorokin AB.** Conceptual design of intelligent decision support systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2017; 7(3): 247-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-3-247-269.
- [6] **Kleshev AS, Timchenko VA.** Theoretical foundations for creation of a shell for interactive systems of intuitive mathematical proofs verification [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(2): 219-239. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-2-219-239.
- [7] **Bukhanovsky AV, Ivanov SV, Kovalchuk SV, Nechaev YuI.** Ontological system of knowledge and computing resources of modern intellectual technologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(1): 22-33. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-22-33.
- [8] **Gavrilova TA, Strakhovich EV.** Visual analytical thinking and mind maps for ontology engineering [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(1): 87-99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
- [9] **Gorelova GV.** Study of the problems of the education system. Cognitive Modeling [In Russian]. *Educational Technology*. 2018; 3: 60-75.
- [10] **Sigovtsev GS, Semenov IO.** Development of an e-learning course using a cognitive map as a content model [In Russian]. *Distance & Virtual Learning*. 2012; 3: 97-106.

- [11] **Makarova NV, Shapiro KV.** Methodology for Designing Cognitive Maps of Lessons [In Russian]. *Proceedings of the Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen.* 2020; 198: 66-74. DOI:10.33910/1992-6464-2020-198-66-74.
- [12] **Kamaleeva AR, Gruzikova SU.** Theoretical Substantiation of the Process of Cognitive Modeling of Pedagogical Situations [In Russian]. *Samara Scientific Bulletin.* 2018; 7(2): 245-247.
- [13] **Uglev VA, Zakharin KM, Baryshev RA.** Cognitive Maps of Knowledge Diagnosis as an Element of a Digital Educational Footprint and a Copyright Object // Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems : Proceedings of 4th Computational Methods in Systems and Software (CoMeSySo) 2020, Vsetin, 14–16 октября 2020 года. Springer Nature Switzerland. 2020. P.349-357. DOI:10.1007/978-3-030-63319-6_31.
- [14] **Asanov AZ, Myshkina IY, Grudtsyna LY.** Forecasting competence requirements for training programs adjustment with the help of cognitive models [In Russian]. *Ontology of designing.* 2019; 9(2): 203-213. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-203-213.
- [15] **Grechko MB.** Cognitive Modeling as a Tool for Adaptive Education Quality Management [In Russian]. *National Interests: Priorities and Security.* 2017; 13, 4(349): 725-735. DOI:10.24891/ni.13.4.725.
- [16] **Brusilovsky PI.** Intelligent learning systems [In Russian]. *Informatics. Scientific and technical collection. Series Information technologies. Tools and systems.* 1990; 2: 3-22.
- [17] **Ebbinghaus H.** Über das Gedächtnis; Untersuchungen zur experimentellen. Psychologie. Leipzig: Duncker u. Humblot. 1885. 169 s.
- [18] **Solovov AV, Menshikova AA.** Discrete mathematical models in the study of automated learning processes [In Russian]. *Information technologies.* 2001; 12: 43-48.
- [19] **Solovov AV, Menshikova AA.** Modeling Automated Learning Processes Based on Weighted Directed Graphs [In Russian]. *Distance & Virtual Learning.* 2011; 11: 47-62.
- [20] **Borgest NM.** System and ontological analyses: similarities and differences between the concepts [In Russian]. *Ontology of designing.* 2024; 14, 1(51): 9-28. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1- 9-28.
- [21] **Wilkinson, Reinsch.** Handbook of algorithms and programs in Algol. Linear algebra [In Russian]. Translated from English. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 590 p.

About the authors

Alexander Vasilevich Solovov (b. 1948) graduated from the Korolyov Aviation Institute (Kuibyshev, USSR) in 1972, PhD (1977). Professor at the Department of Technical Cybernetics (2006). Full member of the Russian Academy of Informatization of Education (1996). The list of scientific works includes more than 300 works in the field of CAD, theory and technologies of e-learning. ORSID: 0000-0001-6288-820X; Author ID (RSCI) : 560817; Author ID (Scopus): 57222040521. a_solovov@mail.ru. ✉.

Anastasia Alexandrovna Menshikova (b. 1972) graduated from the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev in 1996, Ph.D. (2004). Associate Professor of the Department of Supercomputers and General Informatics of Samara University. The list of scientific works includes more than 40 works. ORSID: 0000-0001-8201-7065; Author ID (RSCI): 382400; Author ID (Scopus): 57222036809; Researcher ID (WoS): H-6847-2017. nastya.menshikova@gmail.com.

Received February 19, 2024. Revised March 30, 2024. Accepted April 10, 2024.



Онтология институционального дизайна современных общественных движений

© 2024, Н.А. Скобелина

Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

Аннотация

В статье проведена онтологическая концептуализация институционального дизайна общественных движений, представлен механизм его функционирования в современном обществе. Цель статьи: выявление специфики институционального дизайна современных общественных движений. Институциональный дизайн является интегрированным единством виртуальных и реальных практик, включающих в себя технологическую составляющую. Ядро дизайна – это проектная деятельность участников общественных движений, конструирование реальности в процессе участия в общественной и политической жизни в онлайн- и офлайн-пространствах. Представлена экосистема дизайна, включающая структуру возможностей и условий для создания и функционирования общественных движений, их институционализации. В экосистеме осуществляется взаимодействие участников с институциональной средой, которая содержит правила и нормы, возможности для участия в общественно-политической жизни. В цифровом обществе участники общественных движений располагают инструментами для выстраивания новых алгоритмов конструирования реальности на основе мобильных приложений и социальных сетей. Экосистема институционального дизайна расширяется, когда общественные движения получают политические возможности, организуют офлайн- и онлайн-практики взаимодействия с органами власти для решения социальных проблем.

Ключевые слова: общественные движения, институциональный дизайн, онтологический подход, концептуализация, экосистема, коммуникативные практики.

Цитирование: Скобелина Н.А. Онтология институционального дизайна современных общественных движений // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.196-204. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-196-204.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Общественные движения (ОД) являются сложным и многоаспектным феноменом и рассматриваются в качестве «коллективных действий» [1], «протестного поведения» [2], «коллективной инициативы» [3], «технологии воздействия на политику» [4], «сетей взаимодействия между заинтересованными сторонами» [5], «онлайновых и офлайновых сетей отношений между отдельными индивидами, группами, организациями» [6]. Деятельность участников ОД зависит от институциональной среды (ИС), которая представляется в качестве социальных институтов, организаций, формальных и неформальных правил и норм, регулирующих деятельность участников ОД. ОД, как организованные онлайн- и офлайн-сети, формируют институциональный дизайн (ИД), представляющий собой процесс конструирования социальной реальности в соответствии с формальными и неформальными правилами и нормами, возможностями для организации коммуникативных практик (КП). ИД оказывает влияние на активность субъектов социальной деятельности. Методы конструирования реальности, технологии проектирования деятельности ОД, разработка и реализация проектов, выработка стратегий для решения социальных проблем, использование новых технологий для от-

стаивания своих интересов отражают специфику ИД, на который оказывает влияние социальный контекст, ИС, социальные институты современного общества.

Основной задачей исследования является выявление специфики ИД современных ОД. Для достижения цели используется онтологический подход, который позволяет определить отношения между индивидами, группами, организациями, общностями, выявить их признаки, свойства, сущностные характеристики. Онтология ИД создаётся человеческими действиями и отношениями, имеет объективное существование и является частью мира природы [7]. Онтологический подход позволяет выстроить экосистему исследуемого явления. В социологическом аспекте под экосистемой понимается пространство взаимодействий и отношений участников ОД с другими субъектами и ИС, которая предоставляет им возможности отстаивать свои интересы, решать социальные проблемы, конструировать реальность. Отношения между индивидами возникают в процессе коммуникаций, имеющих место в офлайн- и онлайн-пространствах. Социальная онтология фиксируется на человеческой рациональности и изучает действия и отношения индивидов [8].

Социальные сети предоставляют возможности, а также создают проблемы для развития ОД. Онтология ОД включает открытое идеологическое позиционирование, коллективные идентичности, слабые связи, онлайн-репертуар действий и относительную эфемерность. В тоже время в современном мире сохраняется офлайн-репертуар, протестная активность, классовая политика перераспределения [9].

1 Онтологическая концептуализация ИД современных ОД

Онтология ОД связана с экзистенциальными условиями, относящимися к материальному, социальному, политическому и культурному контекстам. Онтологические предположения актуальны для эмпирических исследований и нормативного теоретизирования [10]. Онтологическая концептуализация применяется для понимания социального мира [11], социальных отношений, которые проявляются в процессе коммуникации участников ОД [12] и формируют индивидуальные и общественную идентичности в онлайн- и офлайн-пространствах [13].

Онтологическое теоретизирование способствует лучшему пониманию динамики ОД в новой реальности в условиях цифровизации, потому что учитываются свойства и признаки отношений, возникающие в онлайн-пространстве между участниками ОД и другими компонентами ИД. Онтологическая концептуализация ИД основывается на следующих положениях.

- ОД, как результат активности социальных субъектов, организуют коммуникационные практики на основе определённых правил и норм, конструируют реальное и виртуальное пространства. Формальные и неформальные правила и нормы существуют во внешней среде, заполняя офлайн- и онлайн-пространства. ОД проектируют и осуществляют деятельность, коммуницируют с другими субъектами, и, тем самым, создают ИД.
- ИД включает в себя политические, социально-экономические, организационные, технологические возможности, КП, формальные и неформальные правила, которыми руководствуются участники в своей деятельности и в процессе коммуникации создают новые нормы.
- ИД заключается в организации коммуникаций и осуществляется на трёх уровнях. *Микроуровень* включает целенаправленную деятельность отдельных индивидов в виртуальном и реальном пространствах экосистемы ИД ОД. *Мезоуровень* – процесс формирования новых КП. В процессе коммуникации участники конструируют объективную и субъективную реальности. *Макроуровень* предполагает ИС ОД, экосистему ИД, в кото-

рой участники, преследуя собственные интересы, действуют согласно правилам и нормам, установленным государством и другими институтами современного общества.

Онтология ИД способствует определению условий эффективности самоорганизации индивидов, выявлению организационных и институциональных возможностей, влияющих на формирование движений, выделению механизма ИД и включает интегрированную модель взаимовлияния ИД, ОД и ИС, представленную на рисунке 1.

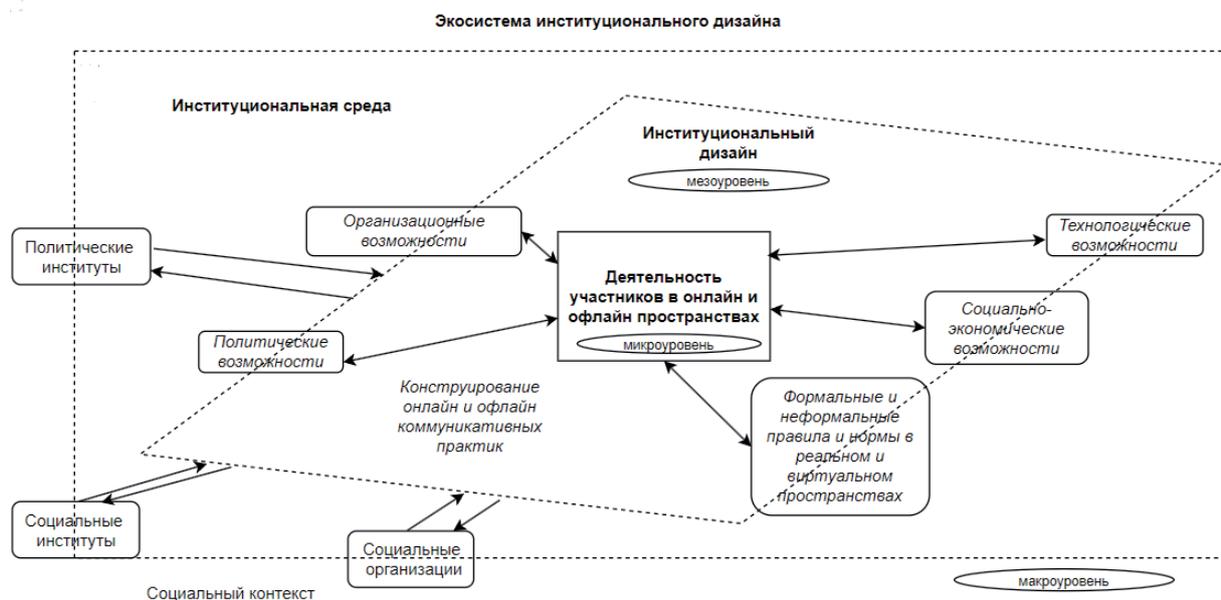


Рисунок 1 – Интегрированная модель взаимовлияния институционального дизайна, общественных движений и институциональной среды

В Интернет-пространстве на веб-платформах участники ОД вступают в отношения, создают структуры по алгоритмизированным правилам, к которым относятся правила регистрации в соцсетях, инструкции для размещения и передачи сообщений, пользовательские соглашения, правила доступа к определённой информации, порядок проведения онлайн-мероприятий, правила форума и др.

2 Специфика ИД современных ОД

ИД – постоянно изменяющееся пространство, в котором ОД создаются, осуществляют свою деятельность и институционализируются. В структурном плане компоненты ИД – возможности, правила и нормы, КП – используются ОД в процессе конструирования реальности.

Формальные и неформальные правила характерны для ОД XX - XXI веков в зависимости от их тематики и направления деятельности [14-16]. Создание правил и норм, руководствуясь которыми участники ОД конструируют реальность, является частью ИД. В условиях цифровизации участники ОД получили новые возможности для трансформации правил, нормативных систем, для распространения информации и организации КП.

Под КП следует понимать передачу информации участниками и обмен информацией между лидерами, сторонниками ОД и другими социальными субъектами в офлайн- и онлайн-пространствах. КП возникают в процессе проведения собраний, советов, создания коалиций, союзов, в групповых чатах, на Интернет-площадках, форумах. ИД включает традиционные и нетрадиционные КП. К традиционным практикам относятся забастовки, протестные акции, встречи, совещания в офлайн-пространстве. Нетрадиционные, инновационные практики ОД

превращают его в глобальное. Инновационными практиками являются цифровые коммуникации: коммуникации в *ВКонтакте*, *Telegram* и на других платформах. Соцсети используются для обмена общими интересами, для привлечения внимания к различным проблемам и др. [17, 18].

Способность участников ОД в процессе коммуникации к интеграции усилий, к осуществлению активной деятельности для достижения поставленных целей и задач, мобилизации населения для решения социальных проблем характеризует организационные возможности ОД. Современный ИД предоставляет организационные возможности актуализировать социальные проблемы, вырабатывать технологии для конструирования социальных проблем и реализации социальных проектов.

Преимуществом современного ИД является то, что технологии предоставляют возможность без больших затрат присоединиться к ОД с помощью социальных сетей [19-21]. Цифровые технологии предоставили возможность спроектировать новую экосистему, общественное пространство для выражения своих интересов и решения социальных проблем.

В условиях цифровизации изменился алгоритм конструирования реальности. Для решения поставленных задач участники стали использовать Интернет-платформы. Интерпретация социальных проблем сопровождается видео и аудио мемами. Меметический контент ИД предоставляет новый способ формирования политики, в игровой форме преподносятся политические и социальные проблемы [6].

Создание хэштега (символа, объединяющего людей по интересам) выполняет функцию концепта и является средством взаимопонимания и коммуникации, а также способствует развитию процессов в онлайн-пространстве. Использование хэштегов позволяет участникам и сторонникам ОД сформировать информационную волну [22] и таким образом расширить экосистему ИД.

В цифровом обществе структуры, которые создаются участниками ОД в онлайн-пространстве, являются модифицированными социальными структурами. Участники регистрируются на платформах, называют своё имя, предпочитают, включаются в группы по интересам. Заявление о себе на веб-сайте – это тип отношений, который превращает пользователей в участников ОД [8]. В условиях современного ИД изменился принцип структуризации ОД. На основе цифровых технологий сформировалась схема деятельности участников ОД с новым содержанием (см. рисунок 2).

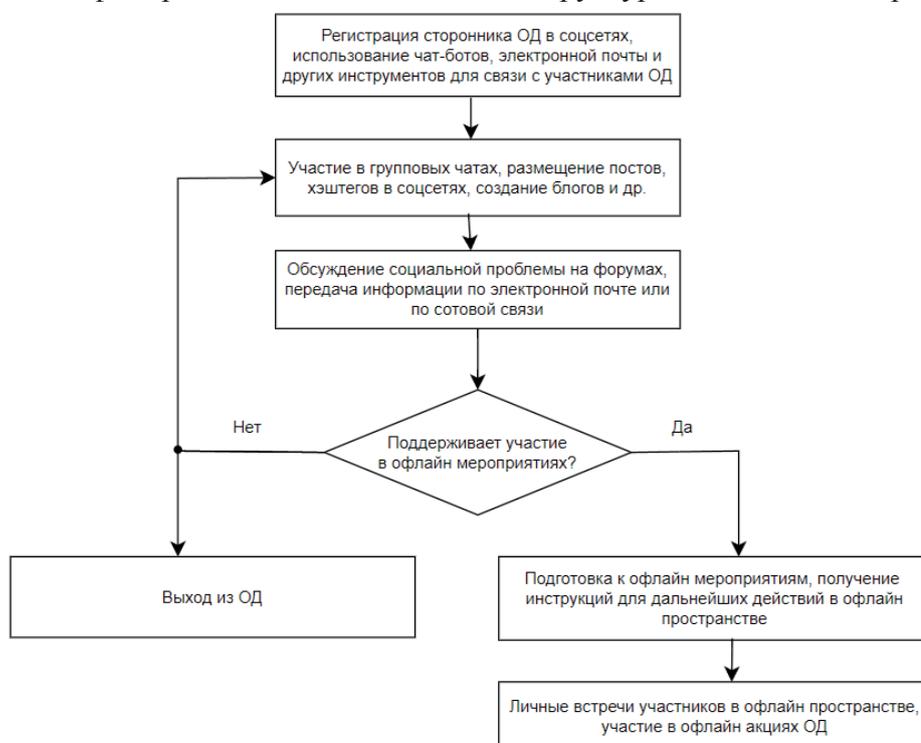


Рисунок 2 – Схема деятельности участника современных общественных движений

Эта схема лежит в основе механизма функционирования ИД современных ОД. Действия участников ОД и технические инструменты ИД являются «технической структурой» экосистемы [8].

Информационная составляющая, как одна из структурных элементов ИД, интегрируется с технологической составляющей. *Telegram*, *ВКонтакте* и другие платформы предоставляют новые возможности для создания КП. Например, информационная экосистема *Telegram* способствует продвижению конкретных проблемных программ, привлечению внимания, обмену информацией. В онлайн-пространстве участники ОД обмениваются контентом, а благодаря гиперссылкам обращаются к внешнему контенту и расширяют пространство своей деятельности. КП в цифровой среде воспроизводятся активными участниками групповых чатов, администраторами каналов, неактивными пользователями, подписчиками каналов, организаторами движений, сторонними наблюдателями [23].

Специфика ИД ОД заключается в том, что дизайн в цифровом обществе является интегрированным единством виртуальных и реальных практик, включающих технологическую составляющую. В онлайн-пространстве потенциальные участники совершают действия в рамках определённого алгоритма на Интернет-платформах. Индивиды используют функции веб-сайтов, которые вызывают определённые действия в технических системах. В итоге возникают отношения между техническими инструментами и участниками ОД в рамках алгоритмизированных правил и норм.

3 Экосистема ИД современных ОД

Выявление особенностей ИД позволило спроецировать экосистему ИД, которая включает в себя аспекты взаимодействия ОД с социальными и политическими институтами на макро- и мезоуровне, коммуникации отдельных индивидов на микроуровне в процессе решения социальных проблем, передачу информации, проведение офлайн- и онлайн-мероприятий. В структурном плане экосистема ИД - это совокупность множества взаимосвязанных субъектов, которые обеспечивают институционализацию движений (формирование, структурирование, развитие движения). К таким субъектам относятся отдельные индивиды, социальные и политические институты современного общества. В концептуальном плане современная экосистема предполагает взаимодействие участников с ИС, которая определяет правила и нормы и предоставляет возможности для участия в общественно-политической жизни. Ядро ИД – это проектная деятельность участников ОД, конструирование реальности в процессе участия в общественной и политической жизни в онлайн- и офлайн-пространствах.

Успешность ОД зависит от того, какие возможности предоставляются ИС, и насколько эффективно их используют участники ОД в процессе коммуникации и конструирования реальности. В рамках онтологического подхода возможности следует рассматривать в формальном и содержательном аспектах. В формальном аспекте возможности являются компонентом ИД, который конструируется участниками ОД и другими социальными субъектами в рамках определённой ИС. Участники ОД мобилизуют и создают ресурсы (например, ресурсы социального капитала), в Интернете и в социальных сетях ОД организовывается, а в офлайн-пространстве экосистемы социальные связи укрепляются [24].

В содержательном аспекте возможности являются тенденцией формирования ОД и залогом его успешной деятельности в условиях цифровизации общества. Организационная, технологическая и политическая составляющие ИД оказывают влияние на динамику современных движений и способствуют их институционализации.

Способность участников ОД обладать ресурсами для общественной деятельности - это политические возможности, к которым относятся доступ к ресурсам и поддержка властей в процессе решения социальных проблем. Только при включении в экосистему политических ресурсов ОД может рассчитывать на успех [25, 26]. Благодаря выстраиванию взаимодействия с политическими институтами, требования участников ОД поддерживаются властью.

Этому способствует институциональная открытость политической системы, т.е. наличие свободных выборов, формальных правил для участников, стремящихся войти в партийную систему. Чтобы достичь результатов в деятельности ОД, необходимо сотрудничество с властью [27-29].

Современный ИД предоставляет ОД политические возможности в онлайн-пространстве. Используя цифровые технологии, большое количество участников с минимальными затратами организовываются и взаимодействуют с властью [30]. Успешность и эффективность деятельности участников ОД подтверждается решением социальных проблем, реализацией программных требований на уровне власти.

Заключение

Представлена онтологическая концептуализация ИД современных ОД как совокупности возможностей, коммуникаций, внутриплатформенных и внешних правил, формальных и неформальных норм поведения в офлайн- и онлайн-пространствах. Онтологический подход позволил выявить специфику современного ИД в содержательном аспекте, рассмотреть его компоненты и экосистему, определить возможности для успешного функционирования ОД в современных условиях.

Современные ОД – это онлайн- и офлайн-сети отношений между индивидами. В офлайн-пространстве участники применяют традиционные формы деятельности, организуют встречи, собрания, митинги. Современный ИД способствует выработке новых стратегий деятельности ОД: «движения превращают свои действия в медийное событие», «стремятся к освещению и транслированию в СМИ» [16], используют цифровые инструменты для создания КП, выстраивают новое содержание схем конструирования реальности.

Экосистема ИД XXI века содержит новые возможности для институционализации ОД. ОД получили организационные и институциональные возможности для общения, передачи информации, продвижения проектов, привлечения внимания общества и власти к социальным проблемам. Благодаря цифровым платформам ОД мобилизуют большое количество участников и реализовывают требования на уровне власти.

Онтологическая концептуализация ИД служит основой для дальнейших исследований экосистемы ИД современных ОД. Понимание сущности ИД и оценка его экосистемы позволит лидерам и участникам ОД выстраивать стратегию деятельности в современном обществе, решать социальные проблемы, обеспечивать эффективное взаимодействие между органами власти, общественными структурами и участниками ОД.

Список источников

- [1] *Блумер Г.* Коллективное поведение / В сб. Американская социологическая мысль. М.: Изд-во МГУ, 1994. С.168–215.
- [2] *Турен А.* Возвращение человека действующего. Очерк социологии. М.: Научный мир, 1998. 204 с.
- [3] *Саенко В.Н.* Анализ ценностных и поведенческих установок в системе общественных движений. *Телескоп: журнал социологических и маркетинговых исследований.* 2021. №3. С.105-106.
- [4] *Пунина К.А., Фадеев Г.А.* #МЕТОО как технология воздействия на политику. *Вестник Удмуртского университета.* 2021. Т.5, №1. С.84-95.
- [5] *Diani M.* The Concept of Social Movement. *The Sociological Review.* 1992. Vol.40. P.1–25.
- [6] *Lee J., Abidin C.* Introduction to the Special Issue of «TikTok and Social Movements». *Social Media + Society.* 2023. Vol.9(1). 8 p. DOI:10.1177/20563051231157452.
- [7] *Searle J.* Social Ontology: Some Basic Principles. *Anthropological Theory.* 2006. Vol.6(1). P.12-29.
- [8] *Kramer B., Conrad Ju.* Social Ontologies Online: The Representation of Social Structures on the Internet. *Social Media + Society.* 2017. Vol.3(1). DOI:10.1177/2056305117693648.

- [9] **Bart C.** The New-New Social Movements: Are Social Media Changing the Ontology of Social Movements? *Mobilization: An International Quarterly*. 2021. Vol.26(3). P.343-358.
- [10] **Ejnavarzal H.** Epistemology-Ontology relations in Social Research: A Review. *Sociological Bulletin*. 2019. Vol.68.(1). P.94-104. DOI: 10.1177/0038022918819369.
- [11] **Little D.** Social Ontology De-dramatized. *Philosophy of Social Sciences*. 2021. Vol.51(1). P.13-23.
- [12] **Cooren F.** Materializing Kommunikation: Making the Case for a Relational Ontology. *Journal of Communication*. 2018. Vol.68 (2). P.278-288.
- [13] **Slife B.** Taking Practice Seriously: Toward a Relational Ontology. *Journal of Theoretical and Philosophical Psychology*. 2004. Vol.24(2). P.157-178.
- [14] **Азутон К.** Альтернативный глобализм: Новые мировые движения протеста. В сб. Альтерглобализм и антиглобалистские движения в современном мире: сб. обзоров и рефератов. М., 2006. 150 с.
- [15] **Козлова Н., Рассадин С.** Отцовские сообщества в современной России: дискурсы и практики. *Социальные и гуманитарные знания*. 2023. Т.9, №1. С.44-57.
- [16] **Milani C., Laniado R.** Transnational Social Movements and the Globalisation Agenda: a Methodological Approach Based on the Analysis of the World Social Forum. *Brazilian Political Science Review*. 2007. Vol.1(2). <https://www.scielo.br/j/bpsr/a/ZtFzThHrKbFtvkhCzvpH7jv/?lang=en#>.
- [17] **Herrmann C., Rhein S., Dorsch I.** #fridaysforfuture – What does Instagram tell us about a social movement? *Journal of Information Science*. 2023. Vol.49 (6). P.1570-1586.
- [18] **Harnesk D.** Strategies of the Sámi movement in Sweden: mobilization around grievances related to the ecological conditions of reindeer pastoralism, 2012–2022. *Ecology and Society*. 2023. Vol.28(4). P.8.
- [19] **Леньков П.В., Колосова О.А., Ковалева С.В.** Социально-психологическая диагностика и прогнозирование протестного поведения молодежи в цифровой среде. *Цифровая социология*. 2021. Т.4, №1. С.34.
- [20] **Stocols A.** The insurgent smart city: How a social movement created an alternative imaginary of the smart city. *Journal of Urban Affairs*. 2023. Vol.1(18). DOI:10.1080/07352166.2023.2216887.
- [21] **Dijk T.A.** Analyzing frame analysis: A critical review of framing studies in social movement research. *Discourse Studies*. 2023. Vol.25(2). P.153-178. DOI:10.1177/14614456231155080.
- [22] **Фадеева И.В.** Хэштег как инструмент влияния в современном медиапространстве. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. №9. С.178-179.
- [23] **Buehling K., Heft A.** Pandemic Protesters on Telegram: How Platform Affordances and Information Ecosystems Shape Digital Counterpublics. 2023. Vol.9(3). DOI: 10.1177/20563051231199430.
- [24] Политика аполитичных: Гражданские движения в России 2011-2013 годов: монография / Под ред. С.В. Ерпылева, А.В. Магун. М.: Новое литературное обозрение, 2015. 480 с.
- [25] **Tarrow S.** Power in Movement. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. P.1–25.
- [26] **Tilly C.** From mobilization to revolution. Reading, MA: Addison-esley, 1978. P.425–447.
- [27] **Milan C., Dolenc D.** Social movements in Southeast Europe: from urban mobilisation to electoral competition. *East European Politics*. 2023. Vol.39(4). P.577-587. DOI:10.1080/21599165.2023.226799.
- [28] **Игнатьева О.А.** Особенности властных отношений в цифровую эпоху. *Политическая концептология: журнал метадисциплинарных исследований*. 2022. №1. С.45-51.
- [29] **Bradlow B.** Urban social movements and local state capacity. *World Development*. 2024. Vol.173. P.106415. DOI: 10.1016/j.worlddev.2023.106415.
- [30] **Гольбрайх В.Б.** Социальные сети как ресурс для институционализации общественного движения (на примере конфликта вокруг строительства мусорных полигонов в Архангельской области). *Власть и элиты*. 2020. Т.7, №1. С.183-203.

Сведения об авторе

Скобелина Наталья Анатольевна, 1971 г. рождения. Окончила Волгоградский государственный университет в 1995 г., д. социолог. н., профессор кафедры педагогики, психологии и социальной работы Волгоградского государственного университета. В списке научных трудов более 100 работ в области социологии общественных движений, политической социологии, теории социальной работы. ORCID: 0000-0002-2108-187X; Scopus Author ID: 57195031702; РИНЦ: 1598-5858. fet71fet@rambler.ru.



Поступила в редакцию 28.02.2024, после рецензирования 14.05.2024. Принята к публикации 20.05.2024.



Ontology of institutional design of modern social movements

© 2024, N.A. Skobelina

Volgograd State University, Volgograd, Russia

Abstract

The article offers an ontological conceptualization of the institutional design of social movements and outlines its functioning mechanism in modern society. The purpose of the article is to identify the specifics of the institutional design of contemporary social movements. Institutional design is described as an integrated unity of virtual and real practices, incorporating a technological component. The core of this design is the project activity of social movement participants, and the construction of the reality through their participation in social and political life in both online and offline spaces. An ecosystem of design is presented, which includes a structure of opportunities and conditions for the creation, functioning, and institutionalization of social movements. Within this ecosystem, participants interact with an institutional environment that contains rules and regulations, as well as opportunities for participation in socio-political life. In a digital society, social movement participants have tools to create new algorithms for constructing reality using mobile applications and social networks. The ecosystem of institutional design expands as social movements gain political opportunities and organize both offline and online interactions with government authorities to address social issues.

Keywords: social movements, institutional design, ontological approach, conceptualization, ecosystem, communication practices.

Citation: Skobelina N.A. Ontology of institutional design of modern social movements [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 196-204. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-196-204.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 - An integrated model of the mutual influence of institutional design, social movements and the institutional environment

Figure 2 - Scheme of activities of a participant in modern movements

References

- [1] **Blumer H.** Collective behavior / In the collection of American Sociological Thought [In Russian]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1994. P.168–215.
- [2] **Touraine A.** The return of an active person. An essay in sociology [In Russian]. Moscow: Scientific world, 1998. 204 p.
- [3] **Saenko VH.** Analysis of value and behavioral attitudes in the system of social movements [In Russian]. *Telescope: Journal of Sociological and Marketing Research*. 2021; 3: 105.
- [4] **Punina KA, Fadeev GA.** #METOO as a technology for influencing politics [In Russian]. *Bulletin of the Udmurt University*. 2021; 5(1): 84-95.
- [5] **Diani M.** The Concept of Social Movement. *The Sociological Review*. 1992. Vol.40. P.1–25.
- [6] **Lee J, Abidin C.** Introduction to the Special Issue of «TikTok and Social Movements». *Social Media + Society*. 2023; 9(1). DOI: 10.1177/20563051231157452.
- [7] **Searle J.** Social Ontology: Some Basic Principles. *Anthropological Theory*. 2006; 6(1): 12-29.
- [8] **Kramer B, Conrad Ju.** Social Ontologies Online: The Representation of Social Structures on the Internet. *Social Media + Society*. 2017; 3(1). DOI: 10.1177/2056305117693648.
- [9] **Bart C.** The New-New Social Movements: Are Social Media Changing the Ontology of Social Movements? *Mobilization: An International Quarterly*. 2021; 26(3): 343-358.
- [10] **Ejnavarzal H.** Epistemology-Ontology relations in Social Research: A Review. *Sociological Bulletin*. 2019; 68(1): 94-104. DOI: 10.1177/0038022918819369.

- [11] **Little D.** Social Ontology De-dramatized. *Philosophy of Social Sciences*. 2021; 51(1): 13-23.
- [12] **Cooren F.** Materializing Kommunikation: Making the Case for a Relational Ontology. *Journal of Communication*. 2018; 68(2): 278-288.
- [13] **Slife B.** Taking Practice Seriously: Toward a Relational Ontology. *Journal of Theoretical and Philosophical Psychology*. 2004; 24(2): 157-178.
- [14] **Agiton K.** Alternative globalism: New world protest movements [In Russian]. In: *Alterglobalism and anti-globalist movements in the modern world: collection of reviews and abstracts / RAS. INION* [In Russian]. Moscow: .2006. 150 p.
- [15] **Kozlova NN, Rassadin SV.** Paternal communities in modern Russia: discourses and practices [In Russian]. *Social and humanitarian knowledge*. 2023; 9(1): 44-57.
- [16] **Milani C, Laniado R.** Transnational Social Movements and the Globalisation Agenda: a Methodological Approach Based on the Analysis of the World Social Forum. *Brazilian Political Science Review*. 2007; 1(2). <https://www.scielo.br/j/bpsr/a/ZtFzThHrKbFtvkhCzvpH7jv/?lang=en#>.
- [17] **Herrmann C, Rhein S, Dorsch I.** #fridaysforfuture – What does Instagram tell us about a social movement? *Journal of Information Science*. 2023; 49(6): 1570-1586.
- [18] **Harnesk D.** Strategies of the Sámi movement in Sweden: mobilization around grievances related to the ecological conditions of reindeer pastoralism, 2012–2022. *Ecology and Society*. 2023; 28(4): 8. DOI: 10.5751/ES-14434-280408.
- [19] **Lenkov RV, Kolosova OA, Kovaleva SV.** Socio-psychological diagnostics and forecasting of protest behavior of youth in the digital environment [In Russian]. *Digital Sociology*. 2021; 4(1): 34.
- [20] **Stocols A.** The insurgent smart city: How a social movement created an alternative imaginary of the smart city. 2023. DOI: 10.1080/07352166.2023.2216887.
- [21] **Dijk TA.** Analyzing frame analysis: A critical review of framing studies in social movement research. *Discourse Studies*. 2023; 25(2): 153-178. DOI: 10.1177/14614456231155080.
- [22] **Fadeeva IV.** Hashtag as an instrument of influence in the modern media space [In Russian]. *International Scientific Research Journal*. 2021; 9: 178-179.
- [23] **Buehling K, Heft A.** Pandemic Protesters on Telegram: How Platform Affordances and Information Ecosystems Shape Digital Counterpublics. 2023; 9(3). DOI: 10.1177/20563051231199430.
- [24] *Politics of the apolitical: Civil movements in Russia 2011-2013: handbook.* Ed. SV. Erpyleva, AV. Magun [In Russian]. Moscow: New Literary Review, 2015. 480 p.
- [25] **Tarrow S.** *Power in Movement*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. P.1–25.
- [26] **Tilly C.** *From mobilization to revolution*. Reading, MA: Addison-esley, 1978. P.425–447.
- [27] **Milan C, Dolenc D.** Social movements in Southeast Europe: from urban mobilisation to electoral competition. *East European Politics*. 2023; 39(4): 577-587. DOI:10.1080/21599165.2023.226799.
- [28] **Ignatieva OA.** Features of power relations in the digital age [In Russian]. *Political conceptology: journal of meta-disciplinary research*. 2022; 1: 45-51.
- [29] **Bradlow B.** Urban social movements and local state capacity. *World Development*. 2024; 173: 106415. DOI:10.1016/j.worlddev.2023.106415.
- [30] **Holbreich VB.** Social networks as a resource for the institutionalization of a social movement (using the example of the conflict over the construction of landfills in the Arkhangelsk region) [In Russian]. *Power and elites*. 2020; 7(1): 183-203.
-

About the author

Natalia Anatolievna Skobelina (b. 1971) graduated from the Volgograd State University (Volgograd-city) in 1995, PhD (2014). She is a Professor at the Volgograd University (Department of Pedagogy, Psychology and Social Work). The list of scientific works includes more than 100 works in the field of sociology of social movements, political sociology, and theory of social work. ORCID: 0000-0002-2108-187X; Author ID (Scopus): 57195031702; РИНЦ: 1598-5858. fet71fet@rambler.ru.

Received February 28, 2024, Revised May 14, 2024. Accepted May 20, 2024.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 378.14

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-205-216

**Онтологический подход в управлении адаптивной подготовкой групп специалистов**

© 2024, И.А. Фролов

*Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации, Смоленск, Россия***Аннотация**

Предлагается комплексный подход к решению задач управления процессом адаптивной подготовки групп специалистов, который позволит учитывать изменяющиеся внешние и внутренние факторы, а также динамику изменения уровня подготовки специалистов и оперативно подстраивать сценарий обучения под текущую ситуацию. Реализация этого подхода основана на онтологическом и прогнозном моделировании процесса адаптивной подготовки специалистов. В статье описывается метаонтология адаптивной подготовки групп специалистов организационно-технических систем для автоматизированного решения задач управления процессом подготовки. Рассматривается подход к решению задач сбора, обобщения и анализа цикла интеллектуального управления адаптивной подготовкой групп специалистов на основе метаонтологии. Применение разработанной метаонтологии позволяет автоматически определять наличие знаний и умений обучаемых, которые хранятся в их профилях и обновляются по результатам пройденных этапов подготовки. Это позволяет повысить оперативность формирования управляющих воздействий (учебно-тренировочных задач) и качество подготовки.

Ключевые слова: адаптивная подготовка, метаонтология, группы специалистов, предметные онтологии, управляющие воздействия, учебно-тренировочные задачи.

Цитирование: Фролов И.А. Онтологический подход в управлении адаптивной подготовкой групп специалистов // Онтология проектирования. 2024. Т.14, №2. С.205-216. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-205-216.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В современном обществе существует проблема повышения эффективности процесса подготовки специалистов и его адаптации к динамично изменяющимся внешним и внутренним факторам, таким как изменение рынка труда, смена предпочтений потребителей, развитие перспективных технологий, индивидуальные особенности специалистов и др. Профессиональное образование нередко отстаёт от развития экономики, что приводит к дисбалансу подготовки специалистов и реальных потребностей общества [1].

На приобретение специалистами дополнительных компетенций, необходимых для решения поставленных работодателем задач, тратятся значительное время и материальные ресурсы. Для подготовки специалистов существует большое количество прикладных обучающих, в т.ч. интеллектуальных, систем (ИС) [2, 3], а также краткосрочных курсов переподготовки специалистов в соответствии с их устремлениями и возможностью вариации содержания [1].

Можно выделить проблему повышения эффективности подготовки специалистов организационно-технических систем (ОТС), выполняющих сложные задачи в составе групп в условиях, связанных с риском для здоровья и необходимостью адаптации процесса их подго-

товки к изменяющимся условиям деятельности. Осуществлять подготовку таких групп специалистов к выполнению задач в реальных условиях возможно только с использованием специальных тренажеров и технических средств.

Для повышения эффективности подготовки групп специалистов ОТС необходимо повышать качество и оперативность управления этим процессом, в т.ч. за счёт учёта индивидуальных психофизиологических особенностей (ПФО) каждого специалиста группы [4]. Учёт ПФО специалистов на этапах индивидуальной подготовки обуславливает необходимость гибкого изменения сценария подготовки специалистов непосредственно в процессе занятий.

Необходимость учёта имеющихся знаний, умений и индивидуальных особенностей каждого специалиста (различная скорость усвоения материала, потребность в различных подходах и методиках к обучению) при одновременной подготовке большого количества специалистов в составе групп обуславливает обработку руководителем занятия больших объёмов данных. С увеличением плотности потока поступающей информации, на основании которой необходимо принимать управляющее решение, психофизиологические возможности руководителя занятия снижаются [5]. Это определяет актуальность автоматизации процесса управления адаптивной подготовкой (АП) групп специалистов ОТС.

1 Автоматизация управления адаптивной подготовкой групп специалистов

Одним из путей повышения качества управления подготовкой групп специалистов является адекватный учёт индивидуальных ПФО каждого специалиста из состава группы в процессе адаптивного формирования для них управляющих воздействий [6-8].

В процессе проведения занятий наибольшие трудности возникают при адаптивном формировании учебно-тренировочных задач (УТЗ) для каждого специалиста группы с учётом их текущего уровня подготовленности и результатов выполнения предыдущих УТЗ (с учётом времени выполнения задачи, результатов её выполнения и совершённых ошибок).

Решение этих задач руководителем занятий занимает длительное время и обуславливает субъективизм оценки текущего уровня подготовленности обучаемых, на основе которой принимаются решения по формированию управляющих воздействий УТЗ, и анализа результатов их реализации и последующей корректировки.

Для обучаемых характерно забывание пройденного материала, что происходит индивидуально [7] и обуславливает неопределённость в достижении целей этапов подготовки. Изменение уровня подготовленности каждого специалиста в процессе обучения аппроксимируется соответствующей экспоненциальной функцией [8]. Руководителю занятия трудно учесть эти изменения при формировании индивидуальных управляющих воздействий в процессе занятия.

Поэтому на этапах групповой подготовки адаптивное индивидуальное управление приведёт к существенному увеличению времени на анализ, изменение и выработку управляющих воздействий в процессе подготовки обучаемых [4].

Эти факторы обуславливают необходимость автоматизации процесса управления АП групп специалистов за счёт разработки адаптивной системы управления (СУ) процессом подготовки, которая должна учитывать специфику предметной области (ПрО) и индивидуальные ПФО обучаемых специалистов (скорость приобретения и утраты знаний, умений и навыков).

Задача управления АП групп специалистов не может быть задана в числовой форме, её цели не могут быть выражены в терминах точно определённой целевой функции, не существует общего алгоритма её решения. Это позволяет отнести названную задачу к классу слабоструктурированных или неформализованных задач [2].

Автоматизация процесса управления подготовкой может быть осуществлена с помощью ИС управления, построенной на основе модели ПрО и включающей знания о стратегиях и методах подготовки, предметах обучения и обучаемых [8-10]. Для формализации знаний ПрО АП групп специалистов ОТС целесообразно применение онтологического инжиниринга [11].

2 Метаонтология адаптивной подготовки групп специалистов

Метаонтология АП групп специалистов (*MetOap*) является моделью знаний и представляет собой онтологию верхнего уровня, включающую совокупность взаимосвязанных предметных онтологических моделей (ОМ): ОМ предметов АП (*Op*), ОМ объектов АП (*Oop*), ОМ ресурсов для АП (*ORes*), множество отношений между онтологиями (R_s), множество аксиом (Ax), позволяющих делать обобщённые выводы из совокупности атрибутов и отношений между классами (подклассами) и атрибутами.

$$MetOap = \langle Stage, Goal, Op, Oop, ORes, R_s, Ax \rangle,$$

где *Stage* – множество этапов АП (одиночная подготовка, подготовка в составе групп специалистов); *Goal* – цели этапов АП групп специалистов.

Op представлена в виде (см. также рисунок 1)

$$Op = \left\{ P_q^{(b)} \leftrightarrow \begin{cases} P_q^{(b)} = \{P_1^{(b)}, \dots, P_q^{(b)}, \dots, P_Q^{(b)}\}, q = 1, \dots, Q, b = 1, \dots, B; \\ \begin{cases} Ap_q^{(b)} = \{Ap_{q,1}^{(b)}, \dots, Ap_{q,c}^{(b)}, \dots, Ap_{q,C}^{(b)}\}, c = 1, \dots, C; \\ Cl_q^{(b)} = \{cl_{q,1}^{(b)}, \dots, cl_{q,p}^{(b)}, \dots, cl_{q,P}^{(b)}\}, p = 1, \dots, P; \\ Rc_q^{(b)} = \{Rc_{q,1}^{(b)}, \dots, Rc_{q,l}^{(b)}, \dots, Rc_{q,L}^{(b)}\}, l = 1, \dots, L; \\ Rs_q^{(b)} = \{Rs_{q,1}^{(b)}, \dots, Rs_{q,m}^{(b)}, \dots, Rs_{q,M}^{(b)}\}, m = 1, \dots, M; \\ Rp_q^{(b)} = \{Rp_{q,1}^{(b)}, \dots, Rp_{q,s}^{(b)}, \dots, Rp_{q,S}^{(b)}\}, s = 1, \dots, S; \end{cases} \\ Ap_{q,c}^{(b)} \leftrightarrow Fp_{q,c}^{(b)} = \{Fp_{q,c_1}^{(b)}, \dots, Fp_{q,c_j}^{(b)}, \dots, Fp_{q,c_j}^{(b)}\}, j = 1, \dots, J, \end{cases} \right.$$

где $P_q^{(b)} = \{P_1^{(b)}, \dots, P_q^{(b)}, \dots, P_Q^{(b)}\}$ – множество элементов АП (предметов, тем, занятий, изучаемых понятий и обрабатываемых умений);

$$\begin{aligned} P^{(1)} &= \{P_1^{(1)}, \dots, P_q^{(1)}, \dots, P_Q^{(1)}\}; \\ P_q^{(1)} \leftrightarrow P_q^{(2)} &= \{P_{q,1}^{(2)}, \dots, P_{q,f}^{(2)}, \dots, P_{q,F}^{(2)}\}, f = 1, \dots, F; \\ P_{q,f}^{(2)} \leftrightarrow P_{f,q}^{(3)} &= \{P_{f,1}^{(3)}, \dots, P_{f,i}^{(3)}, \dots, P_{f,I}^{(3)}\}, i = 1, \dots, I; \\ P_q^{(b)} &= \langle N_q, GZ_{kz}^{(q)}, GU_{ku}^{(q)}, w_q \rangle, \end{aligned}$$

где N_q – имя q -го элемента АП;

$GZ_{kz}^{(q)} = \{gz_{kz,1}^{(q)}, \dots, gz_{kz,n}^{(q)}, \dots, gz_{kz,N}^{(q)}\}$, $kz = 1, \dots, KZ$, $n = 1, \dots, N$ – множество обобщённых гранул знаний, содержащихся в q -м элементе АП;

$gz_{kz,n}^{(q)}$ – атомарная гранула знаний, представляющая собой семантически неделимое понятие ПрО (например, определение);

$GU_{ku}^{(q)} = \{gu_{ku,1}^{(q)}, \dots, gu_{ku,v}^{(q)}, \dots, gu_{ku,V}^{(q)}\}$, $ku = 1, \dots, KU$, $v = 1, \dots, V$ – множество обобщённых гранул умений, содержащихся в q -м элементе АП;

$gu_{ku,v}^{(q)}$ – атомарная гранула умений, представляющая собой элементарную операцию, являющуюся составной частью действий, выполняемых специалистом при решении задач.

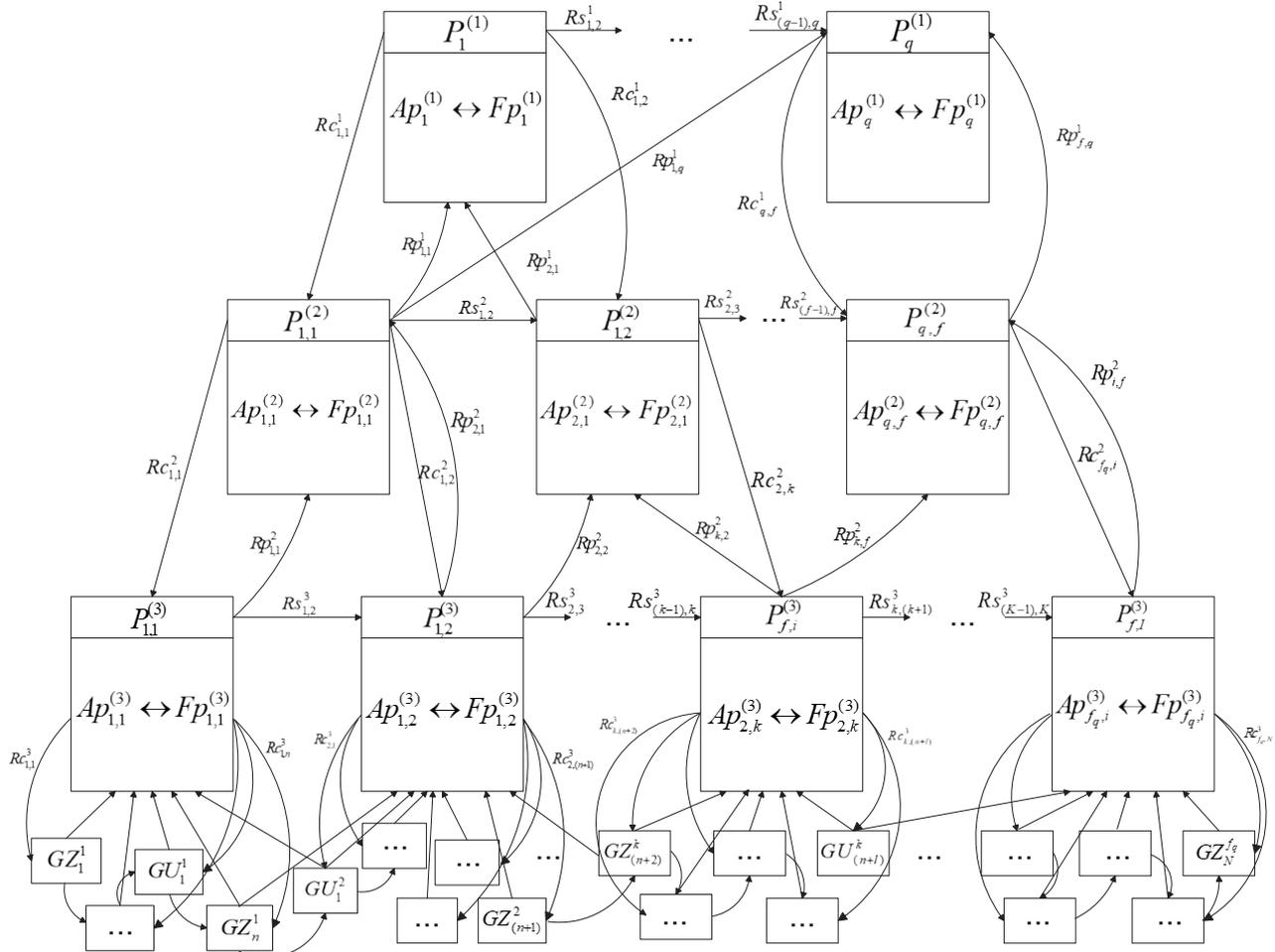


Рисунок 1 – Онтологическая модель предметов адаптивной подготовки

Множество обобщённых гранул знаний и умений формируется в результате процесса информационной грануляции содержания АП и группирования атомарных гранул знаний и умений на различных α_i -уровнях по семантической близости [12, 13]. Полученная таким образом иерархическая структура является основой при построении дерева целей АП.

w_q – степень влияния элемента АП на достижение частной цели подготовки, определяемая с помощью модели, разработанной на основе метода анализа нечётких иерархий с адаптивным согласованием данных [14];

$$gz_{kz,n}^{(q)} = \langle N_{kz,n}^{(q)}, T_{kz,n}^{(q)}, Res_{kz,n}^{(q)}, w_{kz,n}^{(q)} \rangle, \quad gu_{ku,v}^{(q)} = \langle N_{ku,v}^{(q)}, T_{ku,v}^{(q)}, Res_{ku,v}^{(q)}, w_{ku,v}^{(q)} \rangle,$$

где $N_{kz,n}^{(q)} / N_{ku,v}^{(q)}$ – имя n -й гранулы знаний / v -й гранулы умений;

$T_{kz,n}^{(q)} / T_{ku,v}^{(q)}$ – время, необходимое для изучения n -й гранулы знаний / v -й гранулы умений;

$Res_{kz,n}^{(q)} / Res_{ku,v}^{(q)}$ – ресурсы, необходимые для изучения (отработки) n -й гранулы знаний / v -й гранулы умений;

$w_{kz,n}^{(q)} = [0...1]$ / $w_{kv,v}^{(q)} = [0...1]$ – степень влияния n -й гранулы знаний / v -й гранулы умений на достижение частной цели подготовки нижнего уровня иерархии;

$Ap_q^{(b)} = \{Ap_{q,1}^{(b)}, \dots, Ap_{q,c}^{(b)}, \dots, Ap_{q,C}^{(b)}\}$ – множество атрибутов элементов АП (имя элемента АП, множество атомарных гранул знаний и атомарных гранул умений, степень влияния элемента АП на достижение частной цели подготовки, время, необходимое для овладения элементом АП);

$Cl_q^{(b)} = \{cl_{q,1}^{(b)}, \dots, cl_{q,p}^{(b)}, \dots, cl_{q,P}^{(b)}\}$ – множество частных целей, соответствующих элементам АП, образующих дерево целей (например, занятию, входящему в определённую тему, соответствует частная цель, а предмету подготовки может соответствовать конечная цель подготовки).

$$cl_{q,p}^{(b)} = \langle Nc_p, Fc_p, wc_p \rangle,$$

где Nc_p – имя p -й частной цели;

$Fc_p : P_q^{(b)} \rightarrow cl_{q,p}^{(b)}$ – функция отображения элементов АП частным целям;

wc_p – степень значимости p -й частной цели нижнего уровня иерархии цели более верхнего уровня иерархии, определяемая с помощью модели, разработанной на основе метода анализа нечётких иерархий с адаптивным согласованием данных [14];

$Rc_q^{(b)} = \{Rc_{q,1}^{(b)}, \dots, Rc_{q,l}^{(b)}, \dots, Rc_{q,L}^{(b)}\}$ – множество иерархических отношений (отношение «часть-целое») между элементами АП на различных уровнях;

$Rs_q^{(b)} = \{Rs_{q,1}^{(b)}, \dots, Rs_{q,m}^{(b)}, \dots, Rs_{q,M}^{(b)}\}$ – множество отношений причинно-следственной зависимости между элементами АП на b -м уровне иерархии (последовательное изучение и отработка тем, занятий, понятий и умений);

$Rp_q^{(b)} = \{Rp_{q,1}^{(b)}, \dots, Rp_{q,s}^{(b)}, \dots, Rp_{q,S}^{(b)}\}$ – множество отношений влияния элементов АП нижнего уровня на элементы более высокого уровня;

$$Rp_{q,s}^{(b)} = \{rpl_{q,s}^{(b)}, rpm_{q,s}^{(b)}, rps_{q,s}^{(b)}\},$$

где $rpl_{q,s}^{(b)}$ – отношение слабого взаимовлияния между элементами АП (означает, что для достижения родительской вершины желательно владеть знаниями и умениями дочерней вершины, но не является обязательным), степень влияния элемента АП на достижение частной цели подготовки $w_q < 0.4$;

$rpm_{q,s}^{(b)}$ – отношение среднего взаимовлияния между элементами АП (означает, что для достижения родительской вершины желательно владеть знаниями и умениями дочерней вершины), при этом степень влияния элемента АП на достижение частной цели подготовки лежит в интервале $0.4 \leq w_q < 0.7$;

$rps_{q,s}^{(b)}$ – отношение сильного взаимовлияния между элементами АП (означает, что для достижения родительской вершины необходимо владеть знаниями и умениями дочерней вершины), при этом степень влияния элемента АП на достижение частной цели подготовки лежит в интервале $0.7 \leq w_q \leq 1$.

Критерии взаимовлияния между элементами АП определены на основе метода экспертных оценок и не противоречат программам подготовки и накопленному опыту подготовки групп специалистов.

$Fp_{q,c}^{(b)} = \{Fp_{q,c_1}^{(b)}, \dots, Fp_{q,c_j}^{(b)}, \dots, Fp_{q,c_J}^{(b)}\}$ – множество ограничений атрибутов элементов АП.

Оор представлена в следующем виде (см. также рисунок 2).

$$Oop = \begin{cases} OP^{(d)} = \{OP_1^{(d)}, \dots, OP_v^{(d)}, \dots, OP_V^{(d)}\}, v=1, \dots, V, d=1, \dots, D; \\ OP_v^{(d)} \leftrightarrow \begin{cases} Aop_v^{(d)} = \{Aop_{v,1}^{(d)}, \dots, Aop_{v,r}^{(d)}, \dots, Aop_{v,R}^{(d)}\}, r=1, \dots, R; \\ Roc_v^{(d)} = \{Roc_{v,1}^{(d)}, \dots, Roc_{v,u}^{(d)}, \dots, Roc_{v,U}^{(d)}\}, u=1, \dots, U; \\ Aop_v^{(d)} \leftrightarrow Rvp_v^{(d)} = \{Rvp_{v,1}^{(d)}, \dots, Rvp_{v,g}^{(d)}, \dots, Rvp_{v,G}^{(d)}\}, g=1, \dots, G, \end{cases} \end{cases}$$

где $OP^{(d)} = \{OP_1^{(d)}, \dots, OP_v^{(d)}, \dots, OP_V^{(d)}\}$ – множество объектов АП (отдельные специалисты, группы специалистов);

$Aop_v^{(d)} = \{Aop_{v,1}^{(d)}, \dots, Aop_{v,r}^{(d)}, \dots, Aop_{v,R}^{(d)}\}$ – множество атрибутов объектов АП;

$Roc_v^{(d)} = \{Roc_{v,1}^{(d)}, \dots, Roc_{v,u}^{(d)}, \dots, Roc_{v,U}^{(d)}\}$ – множество иерархических отношений (отношение «часть-целое») между объектами АП;

$Rvp_v^{(d)} = \{Rvp_{v,1}^{(d)}, \dots, Rvp_{v,g}^{(d)}, \dots, Rvp_{v,G}^{(d)}\}$ – множество отношений соответствия между атрибутами объектов АП и элементами АП онтологии предметов подготовки.

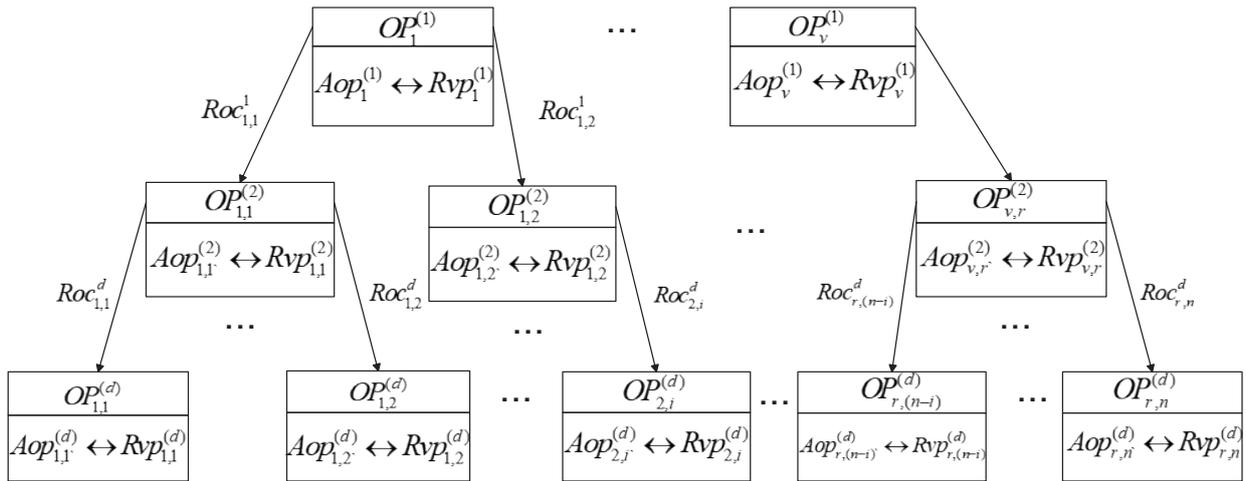


Рисунок 2 – Онтологическая модель объектов адаптивной подготовки

ORes имеет следующий вид (см. также рисунок 3).

$$ORes = \begin{cases} Res = \{Res_1, \dots, Res_i, \dots, Res_I\}, i=1, \dots, I; \\ Res_i \leftrightarrow \begin{cases} Ar_i = \{Ar_{i,1}, \dots, Ar_{i,kr}, \dots, Ar_{i,KR}\}, kr=1, \dots, KR; \\ Ror_i = \{Ror_{i,1}, \dots, Ror_{i,qn}, \dots, Ror_{i,QN}\}, qn=1, \dots, QN; \\ Ar_i \leftrightarrow \begin{cases} Rvr_i = \{Rvr_{i,1}, \dots, Rvr_{i,gt}, \dots, Rvr_{i,GT}\}, gt=1, \dots, GT; \\ Fr_i = \{Fr_{i,1}, \dots, Fr_{i,e}, \dots, Fr_{i,E}\}, e=1, \dots, E, \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

где $Res = \{Res_1, \dots, Res_i, \dots, Res_I\}$ – множество ресурсов, необходимых для обработки элементов АП;

$Res_i = \{Ires_{i,rs}, Mres_{i,re}\}, rs=1, \dots, RS, re=1, \dots, RE,$

где $Ires_{i,rs} = \{Ires_{rs,1}, \dots, Ires_{rs,nm}, \dots, Ires_{rs,NM}\}$, $nm = 1, \dots, NM$ – множество информационных ресурсов (литература, видеоматериалы и т.п.);

$Mres_{i,re} = \{Mres_{re,1}, \dots, Mres_{re,zs}, \dots, Mres_{re,ZS}\}$, $zs = 1, \dots, ZS$ – множество материальных ресурсов (реальная техника, технические средства обучения и т.п.);

$Ar_i = \{Ar_{i,1}, \dots, Ar_{i,kr}, \dots, Ar_{i,KR}\}$ – множество атрибутов ресурсов для АП;

$Ror_i = \{Ror_{i,1}, \dots, Ror_{i,qn}, \dots, Ror_{i,QN}\}$ – множество иерархических отношений (отношение «часть-целое») между ресурсами для АП;

$Rvr_i = \{Rvr_{i,1}, \dots, Rvr_{i,gt}, \dots, Rvr_{i,GT}\}$ – множество отношений соответствия между атрибутами ресурсов для АП и элементами АП онтологии предметов подготовки;

$Fr_i = \{Fr_{i,1}, \dots, Fr_{i,e}, \dots, Fr_{i,E}\}$ – множество ограничений атрибутов ресурсов для АП.

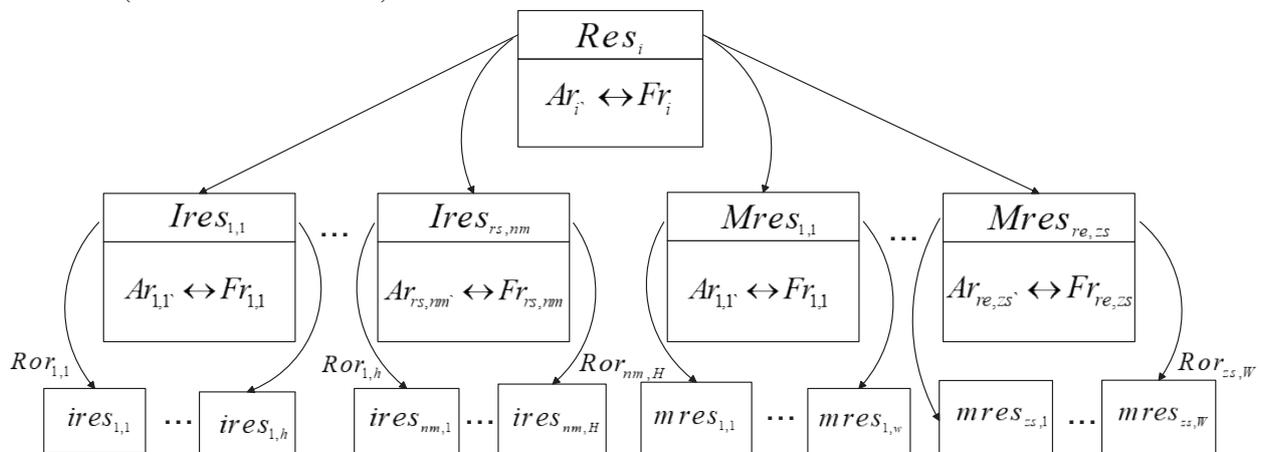


Рисунок 3 – Онтологическая модель ресурсов для адаптивной подготовки

$R_s = \{R_{s,1}, \dots, R_{s,jn}, \dots, R_{s,N}\}$, $jn = 1, \dots, JN$ – множество отношений соответствия между предметными онтологиями;

$Ax = \{Ax_1, \dots, Ax_h\}$ – множество аксиом, позволяющих делать обобщённые выводы из совокупности атрибутов и отношений между классами (подклассами) и атрибутами метаонтологии.

3 Практическое применение

Для практического решения задач управления АП групп специалистов разработанная метаонтология реализована в среде *Protégé*. С помощью запросов на языке *SPARQL* осуществляется процесс получения необходимой для руководителя занятий информации об обучаемых специалистах для планирования мероприятий их АП.

Пример запроса о составе группы и выполняемых функциях специалистов в группе представлен на рисунке 4. Результаты запроса выводятся в виде таблицы, что позволяет руководителю занятия оперативно планировать мероприятия АП независимо от специфики задач, выполняемых группой обучаемых. Для руководителя занятия имеется возможность с использованием запросов к метаонтологии уточнять информацию о наличии определённых знаний и умений у обучаемых.

На рисунке 5 приведён пример запроса к метаонтологии о специалистах, изучивших требования безопасности. По результатам запроса руководителю занятия выводится информация о членах группы, изучивших этот вопрос.

Для автоматического обновления информации о пройденных этапах АП в разработанной метаонтологии сформированы правила на языке *SWRL*. Правила позволяют автоматически обновлять информацию о полученных каждым обучаемым знаниях и умениях в процессе АП и представлять информацию (перечень атомарных гранул знаний и умений) руководителю занятия об оставшихся этапах для каждого обучаемого группы.

На рисунке 6 представлен пример правила, которое определяет требуемые знания для продолжения подготовки согласно сформированному дереву целей.

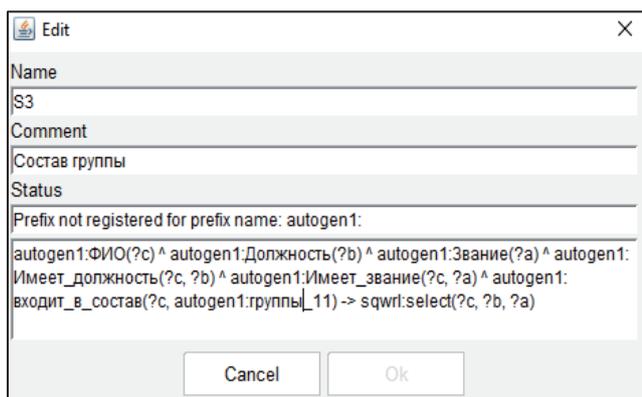


Рисунок 4 – Пример запроса к метаонтологии о составе группы

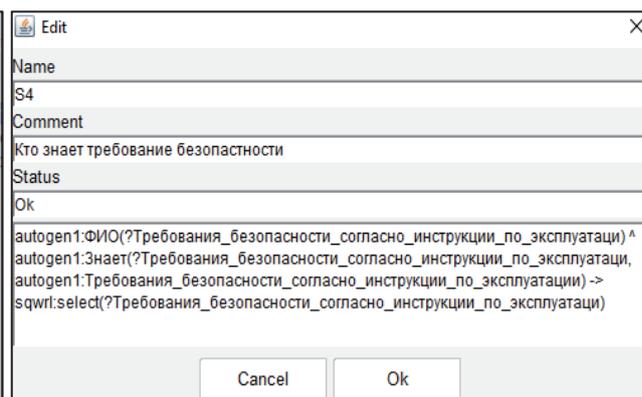


Рисунок 5 – Пример запроса к метаонтологии о специалистах, изучивших требования безопасности

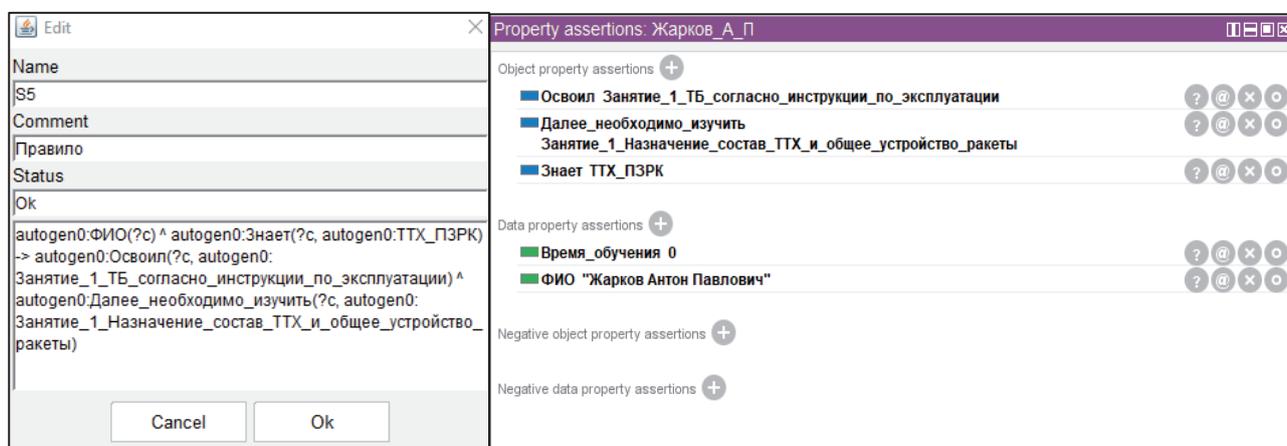


Рисунок 6 – Пример правила, которое определяет требуемые знания для продолжения подготовки

На рисунке 7 представлены результаты АП специалиста (оценки атомарных гранул знаний и умений в соответствии с деревом целей).

Документирование полученных результатов позволяет руководителю занятия делать выводы о процессе АП, динамике овладения знаниями и умениями каждым обучаемым группы и дифференцированно формировать для них управляющие воздействия с учётом текущих результатов.

Все данные об обучаемом, получаемые из метаонтологии, хранятся в цифровом двойнике объекта подготовки SP_q

$$SP_q = \langle ID_{SP_q}, LK_{SP_q}, Y_{tek_m}^{SP_q}(t), CS_{SP_q}, TR_{SP_q} \rangle,$$

где ID_{SP_q} – идентификатор q -го специалиста;

LK_{SP_q} – индивидуальные ПФО специалиста, определяемые моделями приобретения и утраты навыков [15];

$Y_{tek_m}^{SP_q}(t)$ – текущий уровень подготовленности q -го специалиста на m -м этапе подготовки, оцениваемый в соответствии с руководящими документами об организации подготовки групп специалистов и методиками оценки;

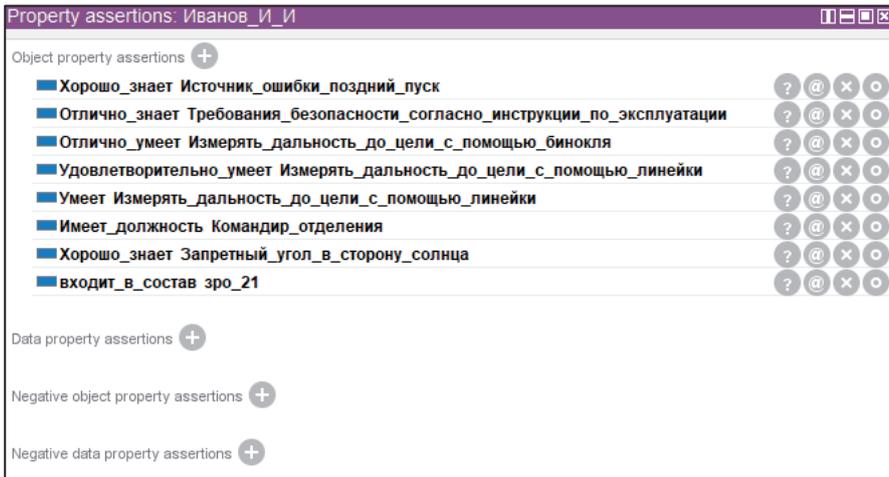


Рисунок 7 – Результаты адаптивной подготовки специалиста

обобщённые гранулы умений. Выбор цели и эталонного сценария зависит от заданного времени на подготовку групп специалистов. Поэтому целью АП может быть цель не самого верхнего уровня α_n , а частная цель уровня $\alpha_{(n-1)}$. В этом случае содержание подготовки определяется в соответствии с отношением влияния элементов АП нижнего уровня на элементы более высокого уровня.

Получаемый с помощью метаонтологии в соответствии с деревом целей перечень необходимых знаний и умений используется при формировании сценарно-информационной модели процесса АП в виде упорядоченной последовательности элементов для прогнозного моделирования достижимости цели АП. Сценарно-информационная модель представляет собой множество возможных сценариев АП для каждого специалиста и группы в целом путём объединения индивидуальных сценариев отдельных специалистов группы. В результате моделирования выбирается рациональный сценарий и осуществляется процесс подготовки специалистов. Сценарий представляет собой структуру процесса АП групп специалистов в виде последовательности атомарных гранул знаний и атомарных гранул умений с учётом уже имеющихся у специалиста знаний и умений в усовершенствованной нотации *ARIS*, предназначенной для моделирования бизнес-процессов.

При отработке сценария АП групп специалистов фиксируются полученные результаты в виде оценок по четырёхбалльной шкале и ошибки, допускаемые специалистами группы при выполнении алгоритма деятельности, которые учитываются при адаптации сценария к текущим результатам.

CS_{SP_q} – цифровой след q -того специалиста (результаты прохождения этапов подготовки по различным дисциплинам);

TR_{SP_q} – эталонный сценарий подготовки q -того специалиста.

Эталонный сценарий подготовки формируется на основе дерева целей, где каждой частной цели соответствуют обобщённые гранулы знаний и

Заключение

Предложен подход к решению задач управления процессом АП групп специалистов, который позволяет учитывать изменяющиеся внешние и внутренние факторы, а также динамику изменения уровня качества подготовки специалистов и изменять сценарий обучения с учётом текущей ситуации. Для реализации предложенного подхода разработана метаонтология - модель знаний ПрО, отражающая взаимосвязи между предметами, объектами АП и ресурсами, необходимыми для проведения АП.

Разработанная метаонтология позволяет повысить качество решения задач поиска, сбора, агрегирования и анализа исходной информации для процесса интеллектуального управления АП групп специалистов ОТС за счёт сформированных *SWRL*-правил и *SPARQL*-запросов.

Список источников

- [1] **Соловов А.В., Меньшикова А.А.** Трансформация онтологии образования: от классно-урочной системы к смарт-инновациям // Онтология проектирования. 2022. Т.12, №4(46). С.470-480. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-470-480.
- [2] **Рыбина Г.В.** Интеллектуальные обучающие системы на основе интегрированных экспертных систем. М.: Директ-Медиа, 2023. 132 с.
- [3] **Рыбина Г.В.** Интеллектуальные системы: от А до Я. Серия монографий в трёх книгах. Книга 1. Системы, основанные на знаниях. Интегрированные экспертные системы. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2014. 224 с.
- [4] **Фролов И.А., Борисов В.В.** Сценарно-информационный анализ и моделирование адаптивной подготовки групп специалистов на основе нечёткого онтологического подхода // Прикладная информатика. 2023. Т.18. № 6. С.54–66. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-6-54-66.
- [5] **Фролов И.А.** Метод сценарно-информационного анализа для интеллектуального управления адаптивной подготовкой групп специалистов // XXI национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, КИИ-2023 (Смоленск, 16-20 октября 2023 г.). Труды конференции. В 2-х томах. Т.1. Смоленск: Принт-Экспресс, 2023. С.304-314.
- [6] **Соловов А.В.** Электронное обучение: проблематика, дидактика, технология. – Самара: «Новая техника», 2006. – 462 с
- [7] **Майер Р.В.** Исследование математических моделей дидактических систем на компьютере. [Электронный ресурс]: Глазов: Глазов. гос. пед. ин-т, 2018. http://maier-rv.glazov.net/Mayer_monograph2018.pdf.
- [8] **Рыбина Г.В.** Основы построения интеллектуальных систем. М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2014. 432 с.
- [9] **Петрушин В.А.** Экспертно-обучающие системы. Киев: Наукова. Думка, 1992. – 196 с.
- [10] **Брусиловский П.Л.** Интеллектуальные обучающие системы // Информатика. Информационные технологии. Средства и системы. 1990. № 2. С.3-22.
- [11] **Gruber T.R.** A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993. №5(2). P.199-220.
- [12] **Тарасов В.Б., Калуцкая А.П., Святкина М.Н.** Гранулярные, нечёткие и лингвистические онтологии для обеспечения взаимопонимания между когнитивными агентами // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2012): материалы II Международной научно-технической конференции (Минск, 16-18 февраля 2012) / В. В. Голенков (отв. ред.). Минск: БГУИР, 2012. С.267-278.
- [13] **Алтунин А.В.** Теоретическое и практическое применение методов принятия решений в условиях неопределённости: Том 1. Общие принципы принятия решений в условиях различных видов неопределённости. [б.м.]: Издательские решения, 2019. 484 с.
- [14] **Харитонов Е.В.** Метод согласования субъективных измерений в иерархиях матриц отношений предположения // Математическая морфология: электронный математический и медико-биологический журнал, 1999. Т.3. №2. С.52-57.
- [15] **Шибанов Г.П.** Количественная оценка деятельности человека в системах человек-техника. – М.: Машиностроение. 1983. 263 с.

Сведения об авторе

Фролов Игорь Анатольевич, 1981 г. рождения. Окончил Военную академию войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации (ВА ВПВО ВС РФ) в 2003 г., к.т.н. (2020). Преподаватель кафедры ВА ВПВО ВС РФ. В списке научных трудов около 20 работ в области ИИ. igor-frolov-81@mail.ru.



Поступила в редакцию 11.04.2024, после рецензирования 16.05.2024. Принята к публикации 24.05.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-205-216

Ontological approach to managing adaptive training for specialist groups

© 2024, I.A. Frolov

Military Academy of Military Air Defense of the Armed Forces of the Russian Federation, Smolensk, Russia

Abstract

An integrated approach to solving the problems of managing the adaptive training process for groups of specialists is proposed, allowing for the consideration of changing external and internal factors, as well as the dynamics of changes in the specialists' training levels. This approach enables rapid adjustment of the training scenario to current situations. The implementation is based on ontological and predictive modeling of the adaptive training process. The article describes the meta-ontology for adaptive training of specialist groups in organizational and technical systems for automated training process management. It discusses an approach to solving problems of collecting, summarizing, and analyzing the cycle of intelligent management of adaptive training for specialist groups using meta-ontology. The developed meta-ontology enables automatic determination of trainees' knowledge and skills, stored in their profiles and updated based on completed training stages. This increases the efficiency of forming control actions (educational and training tasks) and improves the quality of training.

Keywords: *adaptive training, meta-ontology, specialists group, subject ontologies, control actions, educational and training tasks.*

For citation: *Frolov I.A. Ontological approach to managing adaptive training for specialist groups [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 205-216. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-205-216.*

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures

- Figure 1 - Ontological model of adaptive training subjects
- Figure 2 - Ontological model of adaptive training objects
- Figure 3 - Resource ontological model for adaptive training
- Figure 4 - An example of a meta-ontology query about the composition of a group
- Figure 5 - An example of a meta-ontology query about specialists who have studied security requirements
- Figure 6 - An example of a rule that defines the required knowledge to continue training
- Figure 7 - The results of adaptive training of a specialist

References

- [1] **Solovov AV, Menshikova AA.** Transformation of the ontology of education: from a classroom lesson system to smart innovations [In Russian]. *Ontology of design.* 2022; 12(4): 470-480. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-470-480.
- [2] **Rybina GV.** Intelligent learning systems based on integrated expert systems [In Russian]. Textbook. Moscow: Direct-Media, 2023. 132 p.
- [3] **Rybina GV.** Intelligent systems: from A to Z. A series of monographs in three books [In Russian]. Book 1. Knowledge-based systems. Integrated expert systems. Moscow: LLC "Nauchtehlitizdat", 2014. 224 p.
- [4] **Frolov IA, Borisov VV.** Scenario-information analysis and modeling of adaptive training of groups of specialists based on a fuzzy ontological approach [In Russian]. *Applied Informatics.* 2023; 18(6): 54-66. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-6-54-66.
- [5] **Frolov IA.** Method of scenario-information analysis for intelligent management of adaptive training of groups of specialists [In Russian]. XXI National Conference on Artificial intelligence with international participation, KII-2023 (Smolensk, October 16-20, 2023). Proceedings of the conference. In 2 volumes. Vol.1. Smolensk: Print-Express, 2023. P.304-314.
- [6] **Solovov AV.** Electronic learning: problems, didactics, technology [In Russian]. Samara: "New Technique", 2006. 462 p.
- [7] **Mayer RV.** Research of mathematical models of didactic systems on a computer. [Electronic resource]: monograph [In Russian]. Glazov: Glazov. state Pedagogical Institute, 2018.
- [8] **Rybina GV.** Fundamentals of building intelligent systems [In Russian]. Moscow: Finance and statistics; INFRA-M, 2014. 432 p.
- [9] **Petrushin VA.** Expert training systems [In Russian]. Kiev: Naukova Dumka, 1992. 196 p.
- [10] **Brusilovsky PL.** Intelligent learning systems [In Russian]. Informatics. Information technologies. Tools and systems. 1990; 2: 3-22.
- [11] **Gruber TR.** A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition.* 1993; 5(2): 199-220.
- [12] **Tarasov VB, Kalutskaya AP, Svyatkina MN.** Granular, fuzzy and linguistic ontologies for ensuring mutual understanding between cognitive agents [In Russian]. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems.* 2012. P.267-278.
- [13] **Altunin AV.** Theoretical and practical application of decision-making methods in conditions of uncertainty: Volume 1 [In Russian]. Vol.1. General principles of decision-making in conditions of various types of uncertainty. Publishing solutions, 2019. 484 p.
- [14] **Kharitonov EV.** The method of matching subjective measurements in the hierarchies of the relationship matrices of the pre-reading [In Russian]. *Mathematical Morphology: Electronic Mathematical and Biomedical Journal,* 1999; 3(2): 52-57.
- [15] **Shibanov GP.** Quantitative assessment of human activity in human-engineering systems [In Russian]. Moscow: Mechanical engineering. 1983. 263 p.

About the author

Igor Anatolyevich Frolov (b. 1981) graduated from the Military Academy of Military Air Defense of the Armed Forces of the Russian Federation in 2003, Candidate of Technical Sciences (2020). Lecturer of the department of the Military Academy of the Armed Forces of the Russian Federation. The list of scientific papers includes about 20 works in the field of AI. igor-frolov-81@mail.ru.

Received April 11, 2024. Revised May 16, 2024. Accepted May 24, 2024.



Проектирование интеллектуальной противопожарной системы

© 2024, Г.Ф. Малыхина¹✉, П.С. Жиракова², А.В. Милицын²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
Институт компьютерных наук и кибербезопасности (ИКНК),
Высшая школа компьютерных технологий и информационных систем, Санкт-Петербург, Россия

² СПбПУ, ИКНК, Высшая школа управления кибер-физическими системами, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Противопожарные системы используют извещатели, основанные на пороговой обработке измерительных сигналов датчиков факторов пожара и выработке сигнала о пожаре в соответствии с логической функцией. Применение искусственных нейронных сетей позволяет путём их обучения проектировать извещатели, основанные на информации от сети датчиков. Для обучения искусственных нейронных сетей необходимы большие наборы данных, которые предложено получать путём моделирования пожара на суперкомпьютере. Натурные испытания представляют собой дорогостоящий эксперимент, который подвержен случайным факторам, ограничен одним-двумя помещениями и не даёт полного представления о развитии пожара. Поэтому проектирование интеллектуальных пожарных систем относится к классу модельно-ориентированного проектирования. Путём моделирования получены большие наборы данных для обучения алгоритмов пожарной системы и расширен круг решаемых задач. Предложен коллектив нейронных сетей для: поиска оптимального расположения многопараметрических датчиков; определения типа горящего материала; обнаружения возгорания на ранних этапах; локализации зоны возгорания, что позволяет выбрать адекватные средства тушения. Искусственные нейронные сети позволяют прогнозировать развитие пожара, строить карту распределения опасных факторов для поиска оптимального пути эвакуации людей. Приведён пример модельно-ориентированного проектирования судовой противопожарной системы.

Ключевые слова: интеллектуальная противопожарная система, судно, суперкомпьютер, модельно-ориентированное проектирование, обучение, искусственная нейронная сеть.

Цитирование: Малыхина Г.Ф., Жиракова П.С., Милицын А.В. Проектирование интеллектуальной противопожарной системы // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.217-229. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-217-229.

Финансирование: исследование частично финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии» (соглашение № 075-15-2022-311 от 20.04.2022). Вычисления выполнены в суперкомпьютерном центре СПбПУ.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Необходимость раннего обнаружения и своевременного предотвращения развития пожара на судне определяет целесообразность использования новых технологий, позволяющих поддерживать требуемый уровень противопожарной безопасности. Недостатком существующих противопожарных систем (ПС) является применение пороговых датчиков, которые не позволяют создавать интеллектуальные системы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Датчики, имеющие относительно узкую область охвата помещения и распределённые равномерно по помещению, не учитывают вероятность возгорания в огнеопасных зонах. Отсутствие видеокамер и специально настроенной видеоаналитики не позволяет быстро обна-

ружить возгорание во всём пространстве помещения. В процессе разработки ПС проводят натурные испытания, которые позволяют не только проверить правильность проектных решений, но и накопить статистику показаний измерительных приборов и датчиков для улучшения алгоритмов работы ПС. Для проведения натурных испытаний строят специальные стенды, которые, несмотря на большие затраты, не являются точной копией помещений, где будет развернута ПС. В результате натурных испытаний сложно получить большие наборы данных, необходимые для обучения ИНС, невозможно моделировать катастрофическое развитие пожара, охватывающего множество помещений и угрожающего жизни людей, невозможно решать задачу расчёта оптимальных путей их эвакуации.

Интеллектуальная ПС, основанная на онтологии, позволяет организовать инженерные знания в области проектирования ПС. Такая ПС создаётся на базе модельного проектирования путём построения модели для суперкомпьютера и выполнения численного моделирования вместо натурального эксперимента [1]. Применение ИНС позволяет распознавать тип источника возгорания, локализовать зоны очага пожара, прогнозировать развитие пожара в каждой точке помещения и повысить оперативность принятия решения в борьбе с пожаром на судне, правильно выбирать средства тушения и находить пути безопасной эвакуации.

1 Структура ПС

Современное судно включает помещения для экипажа и пассажиров, жилые и общественные помещения, зоны отдыха, технические и служебные помещения, складские помещения, помещения машинного отделения, рулевые и навигационные помещения. К техническим помещениям относятся генераторы, системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Технические и служебные помещения на судне имеют важное значение для нормальной эксплуатации судна. В машинном отделении располагается силовое оборудование судна, двигатели разного типа: дизельные, бензиновые, газотурбинные или электрические. Рулевые и навигационные помещения имеют большое значение для обеспечения безопасности и эффективности судовождения. В них расположены системы управления движением судна, навигационное оборудование, системы диагностики.

В процессе проектирования ПС необходимо учитывать материалы и геометрические размеры помещений, размещённое в них оборудование, вентиляцию, электрические сети, мебель и вероятное расположение горючих материалов.

ПС содержит датчики основных факторов пожара, в частности температуры, видимости, концентрации газов и дыма. Система видеонаблюдения выполняет функцию обнаружения возгорания в поле видимости. При фиксированном расположении датчиков их связь с центральным вычислительным блоком может быть проводной. При изменении условий возможного возникновения пожара в помещениях судна (размещение горючих материалов, выполнение ремонтных работ и др.) целесообразно использовать беспроводный интерфейс, позволяющий размещать датчики в новой, адекватной ситуации, положение. Укрупнённая онтологическая модель ПС показана на рисунке 1.

В ПС может быть использован ряд датчиков для измерения температуры: термометры сопротивления; термопары; полупроводниковые датчики [2]. Датчики для измерения концентрации веществ в воздухе: термохимические, электрохимические и фотоколориметрические [3]. Датчики видимости предназначены для регистрации летучих продуктов процесса горения – мелких частиц копоти, гари [4]. Они способны обнаруживать появление летучих частиц реакции горения, так называемый серый и чёрный дым. Современные ПС используют одно- и многопараметрические датчики, извещатели и многопараметрические многокритериальные извещатели. Модель принятия решений в ПС показана на рисунке 2.

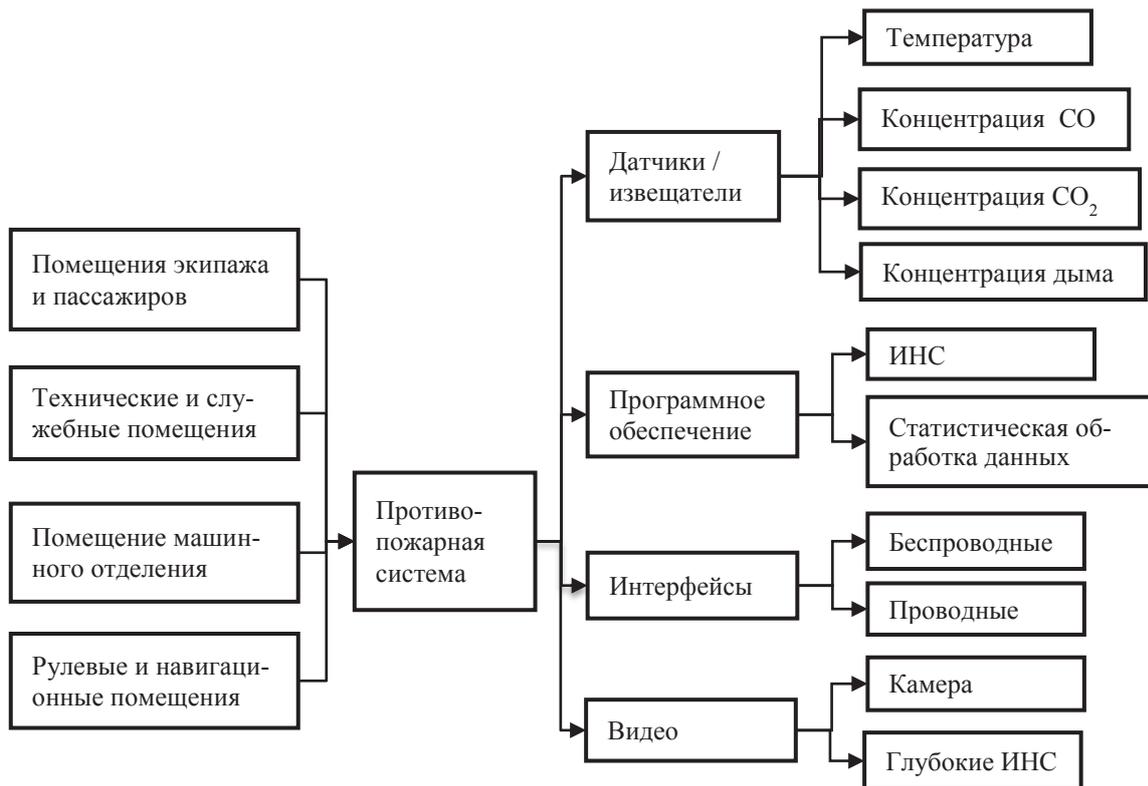


Рисунок 1 – Укрупнённая онтологическая модель противопожарной системы

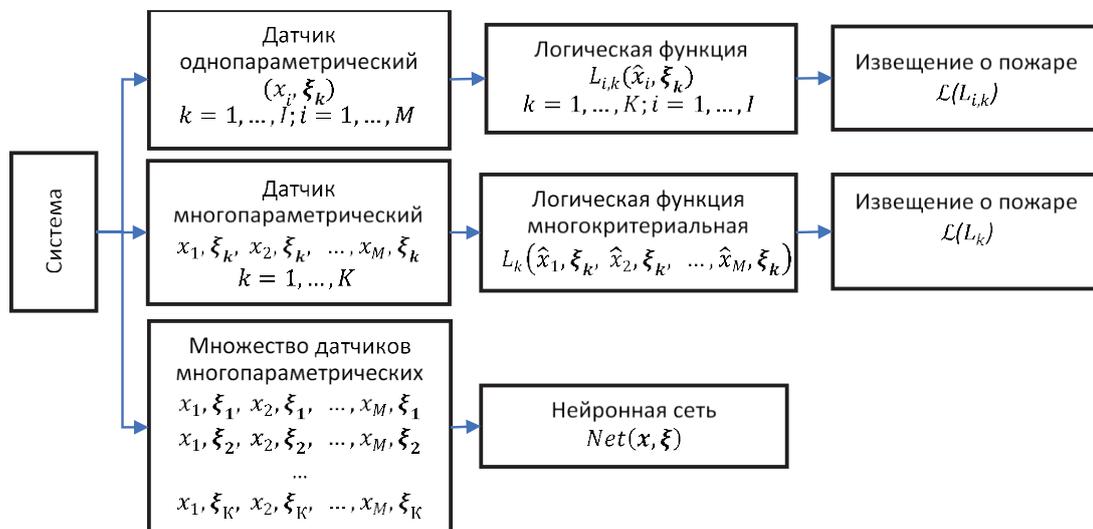


Рисунок 2 – Модель принятия решений в ПС

Датчик однопараметрический - конструктивно обособленное устройство, которое содержит первичный измерительный преобразователь для выработки сигнала $x_i, i = 1 \dots I$ измерительной информации. В ПС используются I однопараметрических датчиков в координатах $\xi_k, k = 1, \dots, K$ [5]. Многопараметрический датчик имеет несколько измерительных преобразователей $x_1, \xi_k, x_2, \xi_k, \dots, x_M, \xi_k$ для выработки нескольких сигналов измерительной информации. Некоторые пожарные извещатели, в зависимости от конструкции, могут являться датчиками, передающими измеренные показания. Извещатели, в отличие от датчиков, не яв-

ляются средствами измерения, поскольку применяют к результатам измерения пороговую обработку для получения логических значений и применения к ним логической функции $L_{i,k}(\hat{x}_i, \xi_k)$. Однопараметрические пожарные извещатели выполняют измерение фактора пожара, последующую пороговую обработку фактора и/или его производной и формируют логический сигнал $\mathcal{L}(L_{i,k})$ по уровню опасного фактора и/или его производной.

Многопараметрические пожарные извещатели выполняют пороговую обработку нескольких сигналов многопараметрических датчиков, формируют логические значения для нескольких сигналов и/или их производных $L_k(\hat{x}_1, \xi_k, \hat{x}_2, \xi_k, \dots, \hat{x}_M, \xi_k)$, и логические функции $\mathcal{L}(L_k)$, учитывающие несколько факторов пожара и/или их производных. В многокритериальных извещателях применяют сложные логические функции [6].

Недостатком существующих ПС является принятие решения о пожаре на основе функций двоичной логики, применённой к сигналам каждого извещателя.

Перспективным представляется подход, который основан на анализе совокупности показаний всех многопараметрических датчиков, расположенных в контролируемом помещении, и формирование решения, сигнализирующего о пожаре, на основе машинного обучения [7].

2 Модельно-ориентированное проектирование ПС

Для проектирования ПС необходимо либо провести множество натуральных экспериментов в помещениях судна или разработать компьютерную модель помещений и динамическую модель развития пожара в них. В программе *Fire Dynamic Simulator (FDS)*¹ используется модель развития пожара путём решения уравнений Навье-Стокса для низкоскоростного теплового потока. Для создания модели помещения использована программа геометрического проектирования *AutoCAD*. Пример трёхмерной геометрической модели помещений корабля-музея «Аврора» показан на рисунке 3.

Модель помещений должна быть дополнена описанием свойств материалов помещений, расположения вентиляции и свойств горючих материалов, которые могут находиться в помещении. Моделирование реального помещения имеет высокую вычислительную сложность, поэтому необходимо использовать высокопроизводительную вычислительную технику (в работе использовались ресурсы суперкомпьютерного центра СПбПУ).

В модели помещения выделяют зоны, внутри и на границах которых рассчитывают опасные факторы пожара по методу конечных разностей. Вычисление внутри каждой ячейки можно проводить на отдельном процессоре параллельно с вычислением внутри других ячеек. *FDS* поддерживает два стандарта для распараллеливания *Open Multi-Processing (OpenMP)* и *Message Passing Interface (MPI)* [8, 9]. Размер ячеек сетки выбирают исходя из минимального размера интересующих предметов в помещении. При увеличении размера сетки могут возникнуть ошибки и деформации предметов. Поэтому точность моделирования повышается при использовании неравномерной сетки, размеры элементов которой зависят от размеров объектов. В результате общее количество элементов сетки составляло 10–20 млн.

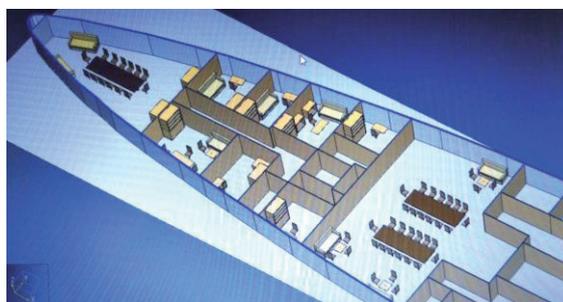


Рисунок 3 – Модель части помещений корабля-музея «Аврора»

¹ *FDS* - это инструмент для моделирования пожара, разработанный Национальным институтом стандартов и технологий (*National Institute of Standards and Technology – NIST*). <https://mst.su/fds/>.

Проведено несколько расчётов с различным распределением ресурсов. При использовании *OpenMP* на одном узле сетевого кластера с одной расчётной сеткой за 48 часов было смоделировано около одной минуты пожара. При расчётах с помощью *MPI* на нескольких компьютерах сетевого кластера использовались неравномерные сетки. Расчётная область помещения была разделена на несколько сеток по числу доступных процессоров, каждой сетке присваивался собственный процесс. При задействованных четырёх узлах кластера за 48 часов расчётов было смоделировано четыре минуты пожара.

Программа визуализации *Smokeview (SMV)* позволяет получать визуализацию результатов моделирования [10].

3 Результаты экспериментов

В помещении учебно-тренировочного комплекса Гефест², представляющем дизельный отсек судна, были проведены четыре вида испытаний:

- интенсивное тление ветоши, смоченной органическим растворителем (время тления 810 с.);
- горение мусорной корзины при постепенном возрастании интенсивности горения до уровня значительного (время горения 320 с.);
- горение невысокой интенсивности ветоши, смоченной органическим растворителем (время горения 807 с.);
- интенсивное горение мебели, смоченной органическим растворителем (время горения 136 с.).

При проведении натуральных экспериментов были использованы тепловые, газовые и дымовые пожарные извещатели. Тепловые извещатели срабатывали при условии, когда конвекционная тепловая энергия пожара увеличивалась и достигала порога. Газовые извещатели реагировали на СО, выделяющийся при тлении или горении материалов. Дымовые извещатели реагировали на продукты горения, изменяющие поглощение излучения в видимом диапазоне спектра.

По результатам экспериментов выполнено сравнение натурального эксперимента с результатами моделирования (см. рисунки 4 и 5).

Применение теплового максимально-дифференциального пожарного извещателя комплекса «Касатка» АО «НПФ «Меридиан», сработавшего при температуре 26-27 °С, показано на рисунке 4б. Применение инкрементного извещателя тепла показано на рисунке 5б. Показания газового извещателя комплекса «Гамма-01 Ф» ООО «НПО пожарная автоматика» показаны на рисунках 4в и 5в. Показания оптико-электронного извещателя дыма комплекса «Гамма-01 Ф» ООО «НПО пожарная автоматика», контролирующего отражение и рассеивание частичками дыма оптического излучения, показаны на рисунках 4г и 5г.

Сопоставление натурального и вычислительного экспериментов показало их близкие результаты. Вместе с тем выявлены различия, обусловленные неточностью задания характеристик материалов горения, неточностью определения начала горения, случайными движениями воздушных потоков, влияющими на процесс горения в натурном эксперименте. Например, изменение концентрации дыма (рисунок 5г) в натурном эксперименте показало наличие выбросов в начале горения, вызванное случайными потоками воздуха, которое может приводить к ложным срабатываниям.

² УТК - ПВ.1 "ГЕФЕСТ" Учебно-тренировочный комплекс для подготовки экипажей кораблей и судов к действиям в аварийных ситуациях. https://www.aqua-servis.com/?page_id=77.

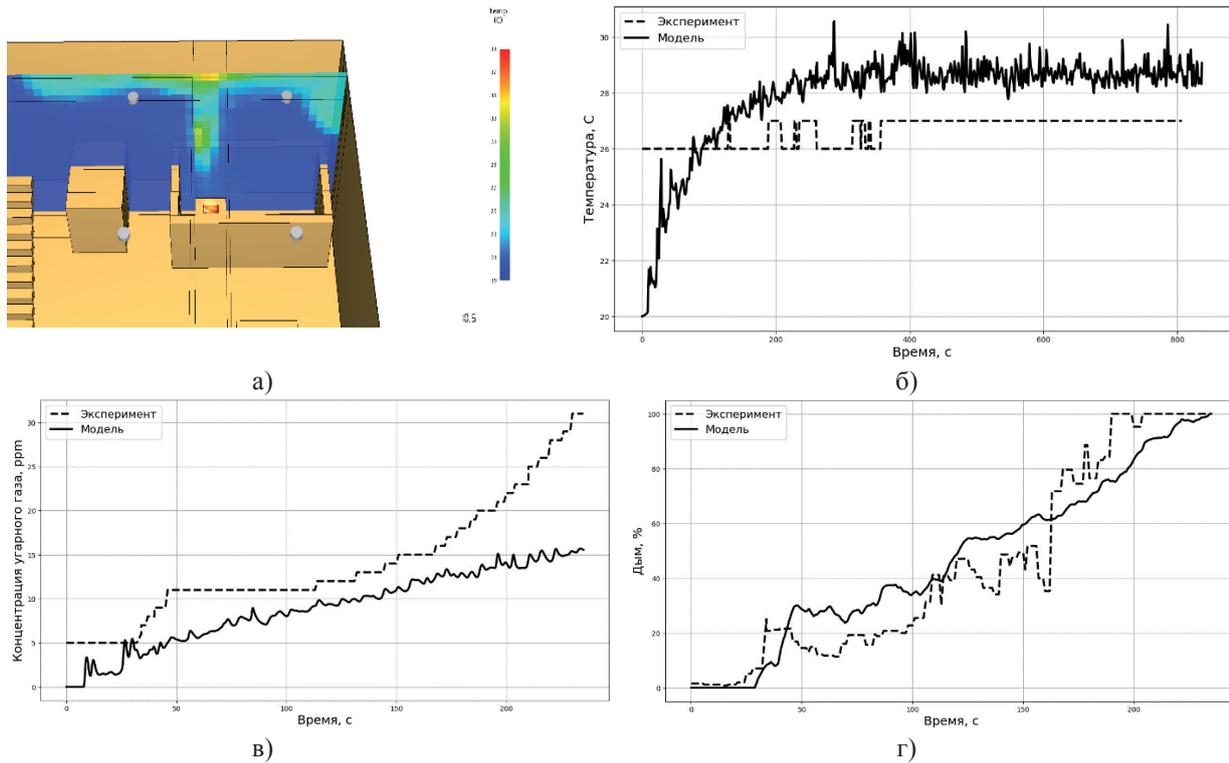


Рисунок 4 – Тестовый очаг: хлопчатобумажная ветошь, смоченная органическим растворителем, в открытом металлическом ящике имитатора горения твёрдых предметов при включённой вентиляции:

площадь $\leq 1,0$ м², дистанция $\leq 2,5$ м, интенсивность – значительное тление;

а) визуализация горения; б) температура; в) концентрация CO; г) концентрация дыма

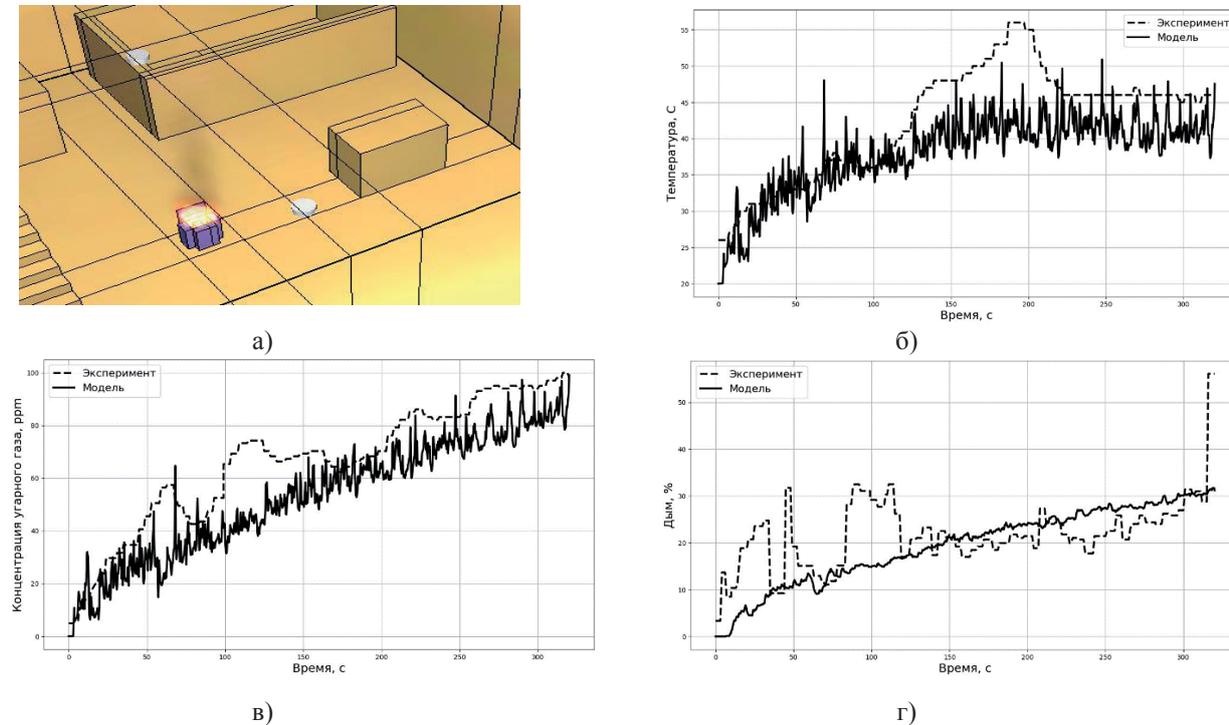


Рисунок 5 – Тестовый очаг: тряпки, бытовой мусор, бумага, скомканная в пластмассовой корзине:

площадь $\leq 1,0$ м², дистанция $\leq 3,0$ м, интенсивность – постепенный рост от малого до значительного горения. Время эксперимента 320 с.

а) визуализация горения; б) температура; в) концентрация CO; г) концентрация дыма

При натуральных испытаниях невозможно воспроизвести пожар, охвативший помещение полностью, а также пожар, распространившийся на множество соседних помещений. Такая модель необходима, чтобы контролировать развитие пожара и находить пути эвакуации людей.

Интеллектуальные модули судовой ПС, использующие ИНС с супервизорным обучением, функционируют при больших наборах данных для обучения и валидации. Было выполнено моделирование на суперкомпьютере и получены наборы данных, характеризующие температуру, концентрацию СО и концентрацию дыма на множестве виртуальных датчиков, размещённых в помещении с интервалом 10 см [11].

4 Поиск оптимального расположения датчиков

Для решения этой задачи использован генетический алгоритм [12]. При этом факторами, определяющими оптимальное расположение датчиков, являются вероятность появления очага пожара в координатах $[\zeta_1, \zeta_2]^T$, геометрические размеры помещения, наличие и тип горючих материалов, расположение вентиляции. Целевой функцией является время обнаружения возгорания по правилу $Q(t)$.

На первом этапе в результате моделирования получены результаты измерения факторов пожара виртуальными датчиками, расположенными на верхней плоскости равномерно с интервалом 10×10 см.

На втором этапе определяют начальное положение каждого из N многопараметрических датчиков $\xi_i = [\zeta_{1,i}, \zeta_{2,i}]^T, i = 1 \dots N$, которое выбирают случайно на сетке размером 10×10 см.

На третьем этапе циклически выполняют генерацию нового положения датчиков с координатами $\Xi(i) := [\zeta_{1,i}, \zeta_{2,i}, \dots, \zeta_{N,i}]^T$.

На четвёртом этапе выбирают целевую функцию $Fire(t, S)$, характеризующую время обнаружения возгорания. Минимизация целевой функции $\mathcal{F}(x) = \min_t [Fire(t, S)]$, где S – множество показаний каждого датчика из N многопараметрических датчиков. Значение целевой функции определяется с использованием ИНС, функционирование которой характеризуется рекуррентными уравнениями: $v_l = W_l u_l, u_l = \varphi_l(v_{l-1})$, где v_{l-1} – вектор входов l -го слоя ИНС, u_l – вектор выходов, W_l – матрица весов l -го слоя, φ_l – активационная функция, которая действует по координатам. В результате обработки сигналов датчиков, расположенных в координатах $\Xi(i) := [\zeta_{1,i}, \zeta_{2,i}, \dots, \zeta_{N,i}]^T$, выход ИНС $v_L = f(u_L)$ фиксирует начало возгорания $Fire(\Xi, t) = net(t, v_L)$ в момент времени t .

На пятом этапе выполняют отбор расположений датчиков $\Xi_{best}(i) := Selection(\Xi(i))$, для которых время обнаружения возгорания минимально (селекция).

На шестом этапе выполняют небольшое направленное смещение датчиков на сетке путём смешивания координат отобранных датчиков по специальному алгоритму мутации и получают новый вектор $\Xi'(i) := [\zeta'_{1,i}, \zeta'_{2,i}, \dots, \zeta'_{N,i}]^T$.

Затем выполняется модификация некоторых координат датчиков случайным образом и повторяются этапы алгоритма.

Новое положение датчиков $\Xi(i) := Revenant(\Xi'(i))$ получают путём отбора лучшего из полученных.

Ниже показан псевдокод поиска оптимального расположения датчиков.

- 1) Чтение данных моделирования;
- 2) $\xi_i = [\zeta_{1,i}, \zeta_{2,i}]^T, i = 1 \dots N$ — начальное положение N датчиков;
while $i < T$, цикл генерации нового положения датчиков;
- 3) $\Xi(i) := [\zeta_{1,i}, \zeta_{2,i}, \dots, \zeta_{N,i}]^T$ — координаты датчиков;
- 4) $Fire(\Xi, t) = net(t, v_L)$ — вычисление времени t обнаружения пожара;
- 5) $\Xi_{best}(i) := Selection(\Xi(i))$ — отбор лучших положений датчиков (индивидуумов);
- 6) $Q(t) := Variation(\Xi_{best}(i))$ — смещение датчиков (скрещивание) и оценка целевой функции $Q(t)$;
- 7) $\Xi'(i) := [\zeta'_{1,i}, \zeta'_{2,i}, \dots, \zeta'_{N,i}]^T$ — небольшое случайное смещение датчиков (мутация);
- 8) $\Xi(i) := Revenant(\Xi'(i))$ — формирование нового положения датчиков (отбор);
End while

5 Нейросетевые методы и алгоритмы судовой ПС

Система принятия решения о возгорании построена на основе рекуррентного персептрона, размерность входного слоя которого определяется количеством датчиков и количеством измеряемых ими параметров пожара. ИНС имеет два скрытых слоя с нелинейными активационными функциями и выходной слой с двумя нейронами и линейными функциями активации. Обучение ИНС выполнено методом обратного распространения ошибки Левенберга-Маркварда, который относится к группе псевдо-ньютоновских методов второго порядка [13].

5.1 Классификация по типу источника возгорания

Для решения этой задачи применены сиамские ИНС, структура которых показана на рисунке 6.

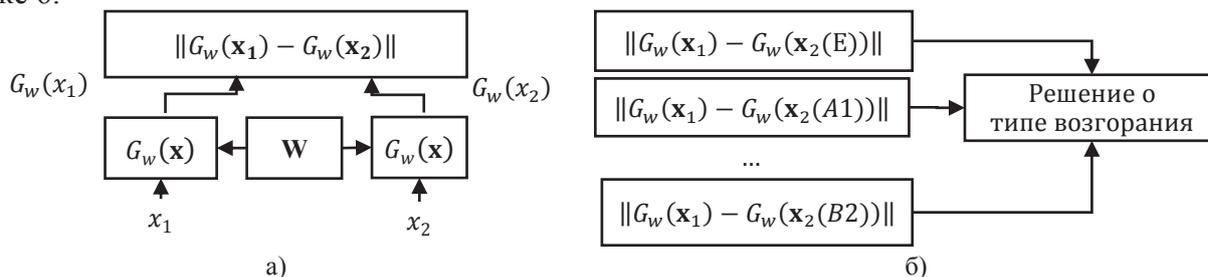


Рисунок 6 – Сиамские ИНС для определения типа источника возгорания:
а) структура сиамской ИНС; б) коллектив сиамских ИНС

Рассмотрены источники возгорания нескольких классов: горение кабеля (класс E), бумаги (класс A1), бытовых отходов (класс A2), бензина (класс B1), спиртосодержащих веществ (класс B2). Классы источников возгорания различались по показаниям датчиков температуры, концентрации CO и дыма. На вход каждой ИНС поступают текущие и предыдущие показания датчиков, поскольку важное значение имеет динамика изменения показаний датчиков. Каждая сиамская ИНС сигнализирует о конкретном типе возгорания [14, 15].

На вход каждой сети поступают векторы \mathbf{x}_1 и \mathbf{x}_2 , которые содержат показания датчиков при отсутствии возгорания и показания датчиков при наличии возгорания данного класса. ИНС основана на оценке расстояния, которое можно рассматривать как меру схожести между измеренными значениями факторов пожара определённого типа. Для вычисления схожести используют две нейронные сети с одинаковыми весами \mathbf{W} для двух входных векторов $G_{\mathbf{W}}(\mathbf{x}_1)$ и $G_{\mathbf{W}}(\mathbf{x}_2)$.

Количество входных параметров зависит от K датчиков в помещении, количества числа последовательных показаний T , снимаемых с датчиков $\mathbf{x}_i = x_i(t), x_i(t - 1), \dots, x_i(t - T)$, и количества нейронов N_{Input} входного слоя сиамских ИНС $n = KTN_{Input}$. Скрытые слои содержат 8 и 5 нейронов. В результате моделирования была получена оценка вероятности правильного обнаружения i -го типа возгорания $\hat{P}(i) = \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^J \left(\frac{m_i}{M_i} \right)$, где m_i – число успешных обнаружений, M_i – число компьютерных экспериментов, которая составила 0.88-0.98 и средняя вероятность правильных обнаружений для пяти типов возгорания $\hat{P} = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^I \hat{P}(i)$, где N_i – число типов возгораний, $N_i = 5$, которая составила 0.94.

5.2 Определение зоны очага пожара

В ряде случаев важно определить место расположения очага возгорания для локального применения автоматизированного средства тушения в зоне очага пожара (классы A1, A2,

В1). Для локализации очага пожара были использованы ИНС, имеющие структуру, показанную на рисунке 6. Имея одинаковую структуру, сиамские ИНС обучены решению другой задачи. В частности, для обучения были использованы данные, полученные в результате моделирования, дополненные данными эксперимента, взятыми на временных интервалах начала горения. В натуральных и компьютерных экспериментах были использованы источники горения: дизельное топливо, электрический кабель, дерево (бук), гептан, хлопчатобумажная ткань. Расположение источников возгорания в помещении площадью 7×5 м представлено на рисунке 7.

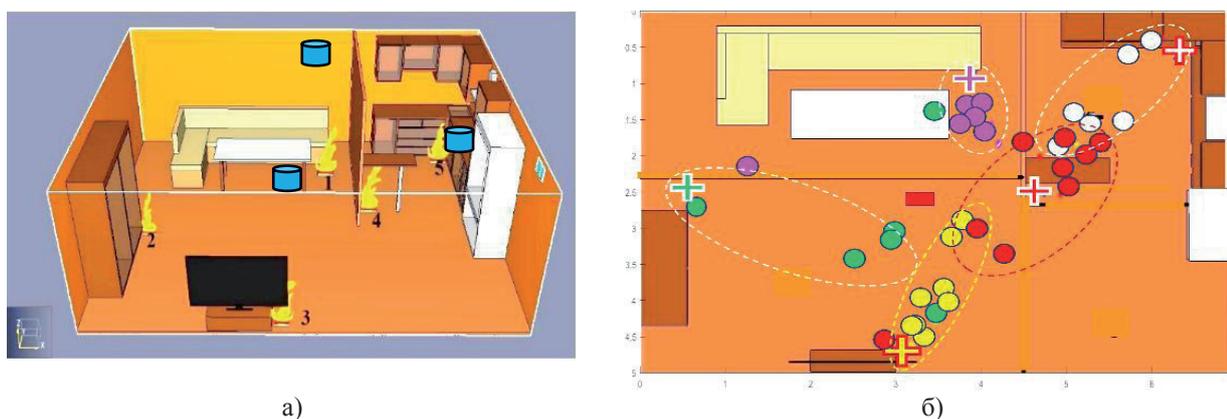


Рисунок 7 – Результаты локализации очагов возгорания в помещении судна: а) помещение судна с обозначенными очагами пожара и многопараметрическими датчиками; б) проекция помещения с указанием очагов возгорания (крестики) и результатами их локализации (пунктирные овалы)

Виртуальные многопараметрические датчики расположены на сетке 10×10 см. Три виртуальных датчика моделируют реальные датчики класса «Барк М-Э эксперт», использованные в натуральных испытаниях. Входными данными являются показания виртуальных датчиков (температура, концентрация СО и концентрация дыма) в течение пяти секунд после начала возгорания и оптимальные координаты датчиков, полученные на предыдущем этапе (см. раздел 4). На выходе ИНС обучена представлять координаты источников возгорания ξ_1 и ξ_2 . Многократное моделирование первых пяти секунд возгорания в пяти положениях очага позволило получить области возгорания. Геометрия помещения, расположение многопараметрических датчиков и очагов пожара показаны на рисунке 7.

Компьютерное моделирование проведено в двух вариантах: при равномерном расположении трёх многопараметрических датчиков и при оптимальном расположении (см. раздел 5.1). Характеристикой правильности локализации источника возгорания является дисперсия ошибки локализации, которая определяется по формуле:

$$\sigma_j^2 = \frac{\sum_{k=1}^K \|\xi_{k,j} - \xi_{0,j}\|}{K}, \quad (2)$$

где $\xi_{0,j}$ – действительное положение источника возгорания в j – ом эксперименте $j = 1, \dots, 5$, $\xi_{k,j}$ – результат определения положения источника возгорания при k – ом повторении j – ого эксперимента $k = 1, \dots, 7$.

Моделирование показало, что при оптимальном расположении датчиков дисперсия зоны локализации уменьшилась приблизительно в 2 раза.

Условием правильной локализации k – той зоны возгорания в j –ом испытании является $\|\xi_{k,j} - \xi_{k,0}\| \leq \theta$, где θ – характеристика допустимого размера зоны. Оценки вероятности правильной локализации k – го очага возгорания определяются по формуле $\hat{P}(k) = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^J \frac{m_{j,k}}{M_k}$, где m_k – число правильных результатов обнаружения в k – той зоне, при выполнении M_k экспериментов; и оценка средней вероятности правильной локализации K зон

возгорания $\hat{P} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \hat{P}(k)$. В проведённом эксперименте вероятность правильной локализации зоны возгорания составила 92%.

Таким образом, применение генетического алгоритма при расстановке датчиков позволяет сократить время обнаружения пожара и повысить достоверность локализации зоны возгорания.

Заключение

Предлагаемый нейросетевой метод формирует извещение на основе совокупности показаний всех многопараметрических датчиков, расположенных в контролируемом помещении. В отличие от существующих методов извещения о возгорании на основе логических функций расширяется круг решаемых задач. Коллектив нейронных сетей позволяет найти оптимальное расположение многопараметрических датчиков, определить тип горящего материала, обнаружить возгорание на ранних этапах, а также локализовать зону возгорания.

Большие объёмы данных, необходимые для обучения ИНС ПС, могут быть получены путём компьютерного моделирования. Этот подход позволит решить ряд новых задач: прогнозирование развития пожара, адаптивное подавление мешающих факторов (нормальный нагрев помещения, изменение газового состава, появление пыли), построение динамической карты распределения опасных факторов и поиск оптимального пути эвакуации людей [15]. Динамические карты распространения пожара во времени представляют распределение основных факторов пожара, температуры, концентрации вредных газов и дыма в пространствах помещений судна.

Показано применение способа получения информации для обучения ИНС ПС путём создания верифицированной модели конкретного фрагмента предметной области на основе использования решения задач по прецеденту [16].

Принципиальным вопросом в проектировании судовой ПС является исследование помещений судна, учёт наличия вентиляции, размещения опасных предметов геометрии помещений. Результатом является подробная геометрическая 3D модель судна, включающая указания на физико-химические свойства материалов.

При проектировании ПС важным является сочетание натуральных испытаний и компьютерного моделирования. Натурные испытания возможны для отдельных помещений, в то время как для моделирования доступны все помещения судна. Ограничением является сложность модели и производительность вычислений.

Онтологический подход предполагает применение широкого класса моделей ПС, к которым относятся, в частности, генетический алгоритм оптимизации расположения датчиков, ИНС с супервизорным обучением для классификации состояний объекта и для аппроксимации зависимостей опасных факторов пожара.

Список источников

- [1] *Гвоздев В.Е., Бежаева О.Я., Сафина Г.Р.* Многоаспектное моделирование ситуаций в задачах обеспечения функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №1(47). С.125-138. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-125-138.
- [2] *Пасынков В.В., Чиркин Л.К.* Полупроводниковые приборы. СПб.: Издательство Лань, 2002. 480 с.
- [3] *Fraisl D., Hager G., Bedessem B. et al.* Citizen science in environmental and ecological sciences. *Nat Rev Methods Primers*. 2022. 2, 64. DOI:10.1038/s43586-022-00144-4.
- [4] Пожарная безопасность. Энциклопедия. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. 416 с.
- [5] ГОСТР 8.673-2009. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. 2019.

- [6] ГОСТ 34698-2020. Межгосударственный стандарт Извещатели пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний. Дата введения 2023-07-01.
- [7] *Лазовская Т.В., Малыхина Г.Ф., Тархов Д.А.* От информационно-измерительных к киберфизическим системам. Мягкие измерения и вычисления. 2023. Т. 62. № 1. С. 73-84.
- [8] *Chivers I., Sleightholme J.* OpenMP. In: Introduction to Programming with Fortran. Springer, Cham. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-75502-1_33.
- [9] *Prost J.P.* MPI-IO. In: Padua, D. (eds) Encyclopedia of Parallel Computing. Springer, Boston, MA. 2011. DOI: 10.1007/978-0-387-09766-4_297.
- [10] *Ling D., Kan K.* Numerical Simulations on Fire and Analysis of the Spread Characteristics of Smoke in Supermarket. In: Lin, S., Huang, X. (eds) Advanced Research on Computer Education, Simulation and Modeling. CISM 2011. Communications in Computer and Information Science, 2011. vol 176. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-21802-6_2.
- [11] *Гусева А.И., Малыхина Г.Ф., Милицын А.В.* Моделирование информационно-измерительной системы, предназначенной для обнаружения пожара на судне. В сборнике: Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020). Москва, 2020. С.485-488.
- [12] *Meray A., Boza R., Siddiquee M.R., Reyes C., M. Hadi Amini, Nagarajan Prabakar.* Subset Sensor Selection Optimization: A Genetic Algorithm Approach With Innovative Set Encoding Methods Journal: IEEE Sensors Journal, 2023; 23(22). DOI: 10.1109/JSEN.2023.3322596.
- [13] *Haykin S.* Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Prentice Hall PT. 1999. 842 p.
- [14] *Valero-Mas J.J., Gallego A.J., Rico-Juan J.R.* An overview of ensemble and feature learning in few-shot image classification using siamese networks. *Multimed Tools Appl.* 2024. 83, 19929–19952. DOI:10.1007/s11042-023-15607-3.
- [15] *Дусакаева С.Т., Савинов В.В.* Мобильное приложение для поиска оптимального маршрута в университетском городке. *Онтология проектирования.* 2023. Т.13, №3(49). С.455-464. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-3-455-464.
- [16] *Федунов Б.Е.* Решение задач по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем тактического уровня на этапах выполнения миссии подвижным объектом. *Известия РАН. Теория и системы управления.* 2023, № 1. С.137–147. DOI:10.31857/S0002338823010018.

Сведения об авторах



Малыхина Галина Федоровна, 1954 г. рождения. Окончила Ленинградский политехнический институт имени М.И. Калинина в 1973 г., д.т.н. (1996), профессор Высшей школы компьютерных технологий и информационных систем ИКНК СПбПУ, профессор. В списке научных трудов 166 работ в областях: кибернетика, автоматика и вычислительная техника, математика, информатика и др. РИНЦ СПИН 6511-9450. SCOPUS ID 56413033100 ORCID 0000-0002-1026-8727, Researcher ID O-2269-2016. malyhina_gf@spbstu.ru ✉.

2023 г. Студентка

Жиракова Полина Сергеевна, 2001 г. рождения. Окончила СПбПУ в 2023 г. Студентка 1-го курса магистратуры ИКНК СПбПУ по направлению «Киберфизические системы и технологии». В списке научных трудов две работы в области теории управления. РИНЦ СПИН 5148-5610, ID 1212282. zhirakova.ps@edu_spbstu.ru.



Милицын Алексей Владимирович, 1972 г.р., окончил СПбПУ в 1995 г. Старший преподаватель Высшей школы управления кибер-физическими системами ИКНК СПбПУ. Область научных интересов - интеллектуальные системы управления, киберфизические системы, интеллектуальные системы безопасности, искусственный интеллект, информационные технологии. Автор 10 печатных работ. SCOPUS ID 57194215918, Researcher ID HZL-6530-2023, ORCID ID 0000-0001-9931-0129, РИНЦ СПИН 3351-0411, ID 660773. militsyn_av@spbstu.ru

Поступила в редакцию 07.03.2024, после рецензирования 06.04.2024. Принята к публикации 10.05.2024.



Design of an intelligent fire protection system

© 2024, G.F. Malykhina¹✉, P.S. Zhirakova², A.V. Militsyn²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Institute of Computer Science and Information Systems, Higher School of Computer Technologies and Information Systems, St. Petersburg, Russia

² SPbPU, Institute of Cybersecurity and Computer Science, Higher School of Cyberphysical Systems and Control, St. Petersburg, Russia

Abstract

Fire protection systems utilize detectors that process signals from fire sensors using threshold-based methods and generate a fire signal based on a logical function. Artificial neural networks can enhance these detectors by processing information from a network of sensors after being trained. To train these neural networks, extensive data sets are necessary, which can be obtained through fire simulations on a supercomputer. Field tests are costly, subject to random factors, limited to one or two rooms, and do not provide a comprehensive picture of fire development. Thus, designing intelligent fire systems falls under model-based design. Through modeling, large data sets were generated for training fire system algorithms, expanding the range of tasks they can address. A group of neural networks is proposed for optimizing the placement of multi-parameter sensors, identifying the type of burning material, detecting fires at early stages, and localizing the fire zone to select appropriate extinguishing agents. Artificial neural networks enable the prediction of fire development, mapping hazardous factors' distribution to find optimal evacuation routes. An example of model-based design for a ship fire protection system is provided.

Keywords: intelligent fire protection system, ship, supercomputer, model-based design, training, artificial neural network.

For citation: Malykhina G.F., Zhirakova P.S., Militsyn A.V. Design of an intelligent fire protection system [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2024; 14(2): 217-229. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-217-229.

Financial Support: The research is partially funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the World-Class Research Center: Advanced Digital Technologies program (agreement No. 075-15-2022-311 of 04/20/2022). The calculations were performed at the supercomputer center of St. Petersburg Polytechnic University.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 – Ontological model of fire protection system

Figure 2 – Decision-making models in fire protection system

Figure 3 – A model of a section of the premises of the museum ship Aurora

Figure 4 – Test hearth: cotton rags soaked with organic solvent, in an open metal box, simulated burning of solid objects, with ventilation on, area ≤ 1.0 m², distance ≤ 2.5 m, intensity - significant smouldering; a) - visualisation of combustion; b) - temperature; c) - CO concentration; d) - smoke concentration

Figure 5 – Test hearth: rags, household rubbish, paper crumpled in a plastic basket, area ≤ 1.0 m², distance ≤ 3.0 m, intensity - gradual increase from small to significant combustion. Time of experiment: 05:20 = 320 c; a) - visualisation of combustion; b) - temperature; c) - CO concentration; d) - smoke concentration

Figure 6 – Siamese ANNs for fire source type determination; a) - structure of Siamese ANN, b) - collective of Siamese ANNs

Figure 7 – Results of localization of fire sources in the ship's room; a) - AutoCAD drawing of the ship's room with marked fire sources and multi-parameter sensors; b) - projection of the room with indication of fire sources (crosses) and results of their localization (circles)

References

[1] Gvozdev VE, Bezhaeva OYa, Safina GR. Multi-aspect modeling of situation in the functional safety control tasks

- of hardware and software complexes [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(1): 125-138. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-125-138.
- [2] **Pasynkov VV, Chirkin LK**. Semiconductor devices [In Russian]. Saint Petersburg: Lan, 2009. 480 p.
- [3] **Fraisl D., Hager G., Bedessem B. et al.** Citizen science in environmental and ecological sciences. *Nat Rev Methods Primers*. 2022. 2, 64. DOI:10.1038/s43586-022-00144-4.
- [4] Fire detectors [In Russian]. Fire safety. Encyclopedia. Moscow: FGU VNIPO. 2007. 416 p.
- [5] GOSTR 8.673-2009 State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Basic terms and definitions [In Russian]. 2019.
- [6] GOST 34698-2020 Interstate standard Fire detectors. General technical requirements. Test methods [In Russian]. Date of introduction 2023-07-01.
- [7] **Lazovskaya TV, Malykhina GF, Tarkhov DA**. From information-measuring to cyber-physical systems [In Russian]. *Soft measurements and calculations*. 2023; 62(1): 73-84.
- [8] **Chivers I, Sleightholme J**. OpenMP. In: Introduction to Programming with Fortran. Springer, Cham. 2018. DOI:10.1007/978-3-319-75502-1_33.
- [9] **Prost JP**. MPI-IO. In: Padua, D. (eds) Encyclopedia of Parallel Computing. Springer, Boston, MA. 2011. DOI:10.1007/978-0-387-09766-4_297.
- [10] **Ling D, Kan K**. Numerical Simulations on Fire and Analysis of the Spread Characteristics of Smoke in Supermarket. In: Lin, S., Huang, X. (eds) Advanced Research on Computer Education, Simulation and Modeling. CESM 2011. Communications in Computer and Information Science, vol 176. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI:10.1007/978-3-642-21802-6_2.
- [11] **Guseva AI, Malykhina GF, Milityn AV**. Modeling of an information-measuring system designed to detect a fire on a ship [In Russian]. In the collection: Proceedings of the XIII International Conference on Applied Mathematics and Mechanics in the Aerospace Industry (AMMAI'2020). Moscow, 2020. P.485-488.
- [12] **Meray A, Boza R, Siddiquee MR, Reyes C, M. Hadi Amini, Nagarajan Prabakar**. Subset Sensor Selection Optimization: A Genetic Algorithm Approach With Innovative Set Encoding Methods Journal: IEEE Sensors Journal, 2023; 23(22). DOI: 10.1109/JSEN.2023.3322596.
- [13] **Haykin S**. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Prentice Hall PT, 1999. 842 p.
- [14] **Valero-Mas JJ, Gallego AJ, Rico-Juan JR**. An overview of ensemble and feature learning in few-shot image classification using siamese networks. *Multimed Tools Appl* 83, 19929–19952 (2024). DOI:10.1007/s11042-023-15607-3.
- [15] **Dusakaeva ST, Savinov VV**. Mobile application for finding the best route on campus [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(3): 455-464. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-455-464.
- [16] **Fedunov BE**. Solving problems based on precedent in the knowledge bases of on-board intelligent systems at the tactical level at the stages of mission execution by a mobile object [In Russian]. *News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. 2023; 1: 137–147. DOI:10.31857/S0002338823010018.

About the authors

Galina Fedorovna Malykhina (b.1954), graduated from the Leningrad Polytechnic Institute named after M.I. Kalinin in 1973, D. Sc. Eng. (1996). Professor at Higher School of Computer Science and Information Systems, SPbPU. She is a counter of more than 166 publications in the field of cybernetics, automation and computer science, mathematics, informatics, etc. RSCI SPIN 6511-9450. SCOPUS ID 56413033100 ORCID 0000-0002-1026-8727, Researcher ID O-2269-2016. malykhina_gf@spbstu.ru. ✉

Polina Sergeevna Zhirakova (b. 2001), graduated from the SPbPU in 2023. First year Master's student in the field of Cyberphysical Systems and Technologies at the Higher School of Cyberphysical Systems and Control of the Institute of Cybersecurity and Computer Science of the SPbPU. She is a counter of 2 publications in the field of control systems. RSCI SPIN 5148-5610, eLibrary author ID 1212282. zhirakova.ps@edu_spbstu.ru.

Alexey Vladimirovich Milityn (b. 1972), graduated from the SPbPU in 1995. He is a senior lecturer at the Higher School of Cyberphysical Systems and Control at the Institute of Cybersecurity and Computer Science of the SPbPU. He is a counter of 10 publications in the field of intelligent control systems, cyberphysical systems, intelligent security systems, artificial intelligence, and information technology. SCOPUS ID 57194215918, Researcher ID HZL-6530-2023, ORCID ID 0000-0001-9931-0129, RSCI SPIN 3351-0411, eLibrary author ID 660773. milityn_av@spbstu.ru.

Received March 7, 2024. Revised April 06, 2024. Accepted May 10, 2024.



Технология сквозной разработки мобильных приложений для людей с ограниченными интеллектуальными возможностями

© 2024, В.В. Гурьев ✉, О.А. Шабалина, Н.П. Садовникова, А.А. Воронина, С.В. Косяков, Н.М. Дмитриев

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ), Волгоград, Россия

Аннотация

Рассмотрены особенности разработки мобильных приложений для людей с ограниченными интеллектуальными возможностями. Предложена технология разработки адаптируемых мобильных приложений для пользователей с ограниченными интеллектуальными возможностями, основанная на применении шаблонной многомодульной архитектуры с возможностью выбора готовых функциональных решений из хранилища модулей. Описан способ разработки адаптируемого интерфейса мобильного приложения, включающий создание шаблонов экранов, на которых размещаются элементы интерфейса, разделение элементов шаблонов на обязательные и опциональные и сопоставление каждому элементу наборов возможных изображений. Предложен способ адаптации интерфейса с помощью конфигурационной панели, обеспечивающий возможность настройки интерфейса под каждого пользователя без изменения программного кода. Описана веб-система, обеспечивающая поддержку этапов создания и эксплуатации мобильных приложений с адаптируемым интерфейсом. Приведены примеры мобильных приложений для пользователей с ограниченными интеллектуальными возможностями. Описание проектных и технологических решений, разработанных в рамках предложенного подхода, представлено в виде онтологической модели, использование которой позволяет извлекать знания для создания приложений, доступных людям с ограниченными интеллектуальными возможностями.

Ключевые слова: ограниченные интеллектуальные возможности, мобильное приложение, жизненный цикл, адаптируемый интерфейс, конфигурационная панель, веб-система.

Цитирование: Гурьев В.В., Шабалина О.А., Садовникова Н.П., Воронина А.А., Косяков С.В., Дмитриев Н.М. Технология сквозной разработки мобильных приложений для людей с ограниченными интеллектуальными возможностями // Онтология проектирования. 2024. Т.14, №2(52). С.230-242. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-230-242.

Благодарности: Авторы благодарят студентов и аспирантов кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» ВолГТУ за участие в разработке мобильных приложений, а также сотрудников реабилитационных и медицинских центров за организацию тестирования этих приложений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения¹ почти 200 миллионов человек в мире имеют интеллектуальные нарушения, т.е. отклонения в развитии умственных способностей. В Международной классификации болезней (МКБ)² интеллектуальные нарушения (умственная отсталость) определяются как состояние задержанного или неполного развития психики, которое характеризуется нарушением способностей, обеспечивающих общий уровень интеллектуальности. Многие люди с ограниченными интеллектуальными возможностями (ОИВ) могут испытывать трудности в различных аспектах своей повседневной жизни,

¹ World Health Organization. <https://www.who.int/>.

² ICD. <https://icd.who.int/>.

таких как передвижения, путешествия, домашняя работа, использование денег, телефона, поиска работы и др. В современном обществе стремятся обеспечить качественную жизнь людям с ОИВ³ (участие в общественной жизни, доступ к цифровым технологиям и др. [1, 2]). Перспективным направлением в этой сфере является внедрение мобильных приложений (МП), помогающих повысить самостоятельность людей с ОИВ [3-7].

При разработке МП для людей с ОИВ требуется решить ряд задач, связанных с особенностями этой категории пользователей. Одним из способов повышения доступности программного обеспечения (ПО) является возможность адаптировать функционал и интерфейс ПО для конкретного пользователя [8]. Современные МП предусматривают настройки интерфейса (шрифтов, цветовой палитры, звукового сопровождения и т.д.), которые можно осуществить на этапе эксплуатации МП. Осуществляет такие настройки пользователь. Однако возможности людей с ОИВ сильно различаются. Для них требуется более глубокая персонализированная адаптация интерфейса (возможность изменения количества элементов управления, выбора различных пиктограмм для отображения элементов управления, использования или неиспользования текста и др.). Многие люди с ОИВ не смогут самостоятельно настроить интерфейс, что также нужно принимать во внимание при разработке МП.

Разработкой МП для людей с ОИВ занимаются не только специализированные компании, но и специалисты, профессиональная деятельность которых связана с обеспечением качества жизни людей с ОИВ. Такие специалисты не всегда обладают достаточной квалификацией как разработчики МП, что сказывается на скорости разработки и качестве решений. Для разработки МП для людей с ОИВ требуются проектные и технологические решения, позволяющие снизить трудоёмкость разработки МП и обеспечивающие возможность адаптации МП под конечных пользователей с ОИВ на этапе эксплуатации без изменения программного кода.

При разработке ПО часто используются методы и средства онтологического моделирования [9]. Онтологическое представление процесса разработки МП для людей с ОИВ, как самостоятельной категории ПО, позволит применять эти знания при создании МП.

1 Подходы к разработке МП

Известно несколько подходов к разработке МП, основными из которых являются нативный, кроссплатформенный, гибридный и прогрессивный [10]. Нативные приложения разрабатываются на языках программирования и в средах, предоставляемых владельцем платформы, работают непосредственно в операционной системе устройства. Кроссплатформенные приложения могут быть написаны на разных языках программирования и в разных средах, но они компилируются в приложение, работающее непосредственно в операционной системе устройства. Разработка гибридных веб-приложений проводится с использованием *Web*-технологий. В отличие от нативных, гибридные приложения работают в *Web*-контейнере, который обеспечивает среду выполнения браузера и *API* для нативных устройств через *Apache Cordova*⁴. *Web*-приложения, которые используют набор возможностей браузера (например, работу в автономном режиме, запуск фоновых процессов и добавление ссылки на домашний экран устройства), для обеспечения удобства работы приложения выделяют в самостоятельную категорию прогрессивных *Web*-приложений. Модель жизненного цикла (ЖЦ) МП рассматривается как самостоятельная категория моделей ЖЦ ПО, отличающаяся содержанием и количеством этапов [11, 12].

Для управления МП разрабатывается специализированное ПО, применяемое на разных этапах ЖЦ МП. Так, для управления разработкой МП используются *MDM* системы [13]. Типовой функционал таких систем включает конструктор интерфейсов, функции доработки программного кода, публикации обновлений МП. Для администрирования МП, разработанных для использования в различных видах профессиональной деятельности, на этапе эксплуатации применяют *MAM* системы⁵. Их типовой функционал включает адаптацию интерфейса МП под конечного пользователя, управление его аккаунтом, сбор статистики. Разработку МП можно вести с использованием платформ *MADP*⁶, которые включают функции управления МП, а также инструменты управления МП.

³ Инвалидность и дискриминация. <https://www.coe.int/ru/web/compass/disability-and-disablism>.

⁴ *Apache Cordova*. <https://cordova.apache.org/>

⁵ *Mobile application management (MAM)*. <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/resources/Mobile-management>.

⁶ *How to Select a Mobile Application Development Platform (MADP)?* <https://www.credencys.com/blog/how-to-select-a-mobile-application-development-platform-madp/>.

Большая часть ПО, применяемого при разработке МП, поддерживает только один из этапов ЖЦ МП, в результате чего затрудняется выполнение других этапов ЖЦ, которые реализуются в иных системах или программах, не связанных между собой.

Разработка МП для людей с ОИВ сопряжена с высокими рисками, связанными с невозможностью заранее предусмотреть, как такие пользователи будут реагировать на интерфейсные решения и смогут ли они правильно выбирать требуемые действия. Поэтому качество МП для людей с ОИВ в большой степени зависит от того, насколько пользователи с ОИВ привлекались к участию в тестировании МП. Применение успешных интерфейсных решений, реализованных в МП и апробированных пользователями с ОИВ, для разработки новых МП может повысить качество таких МП и уверенность разработчиков МП в их доступности пользователям с ОИВ. Для учёта особенностей пользователей с ОИВ может потребоваться разработка специальных функций, не зависящих от назначения разрабатываемого МП [14, 15]. Повторное использование кода таких функций позволит упростить процесс и уменьшить время разработки МП.

В зависимости от характера и проявления интеллектуальных ограничений потенциальные пользователи МП с ОИВ могут встречаться с различными трудностями (например, невозможность прочитать текст на экране МП, понять назначение элементов управления и других объектов интерфейса, выбирать и перемещать объекты МП, управлять МП и т.д.). Поэтому функционал МП должен включать опции настройки экранов для каждого конечного пользователя без потери полноценного доступа к нему. Не все пользователи с ОИВ могут настроить интерфейс приложения самостоятельно, но такую настройку могут осуществить опекающие их люди.

2 Разработка МП с адаптируемым интерфейсом

2.1 Модульная разработка МП

При создании МП применяют технологии модуляризации, разработанные различными компаниями (Лаборатория Касперского⁷, *SurfStudio*⁸ и др.). Анализ применимости методов повторного использования кода при разработке МП для людей с ОИВ проведён по следующим критериям: процесс переноса модуля в другое приложение должен быть понятным разработчику, не обладающему большим опытом; архитектура модулей должна содержать минимальное количество слоёв; способ хранения модулей должен позволять хранить все версии релизов модулей, а также историю их изменения; технология должна описывать архитектуру МП в шаблонах для генерации базового кода. Проведённый анализ показал, что наиболее подходящей является технология, разработанная компанией *SurfStudio*.

Разработана многомодульная архитектура МП как модификация архитектуры *SurfStudio*: слойное деление на модули заменено на деление по слоям внутри модуля, что позволило сократить количество модулей, но оставить слойное деление. Модифицированная таким образом архитектура разделяет приложение на три уровня модулей: модуль приложения, функциональные модули, библиотечные модули.

Модуль приложения связывает вместе функциональные модули. Функциональные модули соответствуют полноэкранному, согласованному функциональным возможностям пользователя в приложении. Модуль приложения имеет внутреннюю архитектуру, которая состоит из трёх слоёв. В первом слое располагаются источники данных и запросы к ним, например,

⁷ *Kaspersky*. <https://www.kaspersky.ru/>.

⁸ Принципы построения многомодульных мобильных приложений *SurfStudio*. <https://github.com/surfstudio/SurfAndroidStandard/blob/snapshot-0.4.0/docs/common/multimodule/detail.md>.

запросы к *API* или базе данных (БД). Во втором слое содержится бизнес логика приложения. В третьем слое располагаются компоненты, необходимые для визуализации интерфейса.

В библиотечных модулях функциональность разделена между несколькими модулями. Библиотеки могут зависеть друг от друга, они предоставляют общий функционал, который повторно используется в нескольких функциях.

Модульная разработка МП для пользователей с ОИВ включает этапы: выбор примера с шаблонами генерации базовых классов для экрана; разработка архитектуры МП на основе выбранного шаблона; поиск готовых модулей в хранилище; подключение готовых модулей в МП; выбор модулей для выгрузки в репозиторий.

Разработка МП для пользователей с ОИВ на основе модуляризации позволяет разработчикам использовать готовые решения, применяемые в предыдущих проектах, и добавлять новые решения как модули для повторного использования.

2.2 Разработка адаптируемого интерфейса МП

Разработка адаптируемого интерфейса МП для людей с ОИВ основана на концепции шаблонных интерфейсов [16]. Процесс проектирования интерфейса включает разработку шаблонов всех экранов МП, на которых размещаются все элементы интерфейса, требуемые для доступа к функционалу МП, и разделение элементов шаблонов на обязательные и опциональные элементы. Обязательными являются элементы, которые необходимы для работы отдельно взятого приложения и должны включаться в интерфейс каждого пользователя МП. Опциональные элементы могут включаться в интерфейс в зависимости от возможностей и ограничений пользователя. Каждому элементу управления интерфейса сопоставляется область на экране, в которой этот элемент может быть размещен. При настройке интерфейса МП для каждого пользователя имеется возможность выбрать изображения всех элементов интерфейса из БД или отключить элемент интерфейса, если он относится к категории необязательных. Такую настройку интерфейса МП может осуществлять конечный пользователь с ОИВ либо пользователь, знающий возможности и ограничения своего подопечного.

Процесс конфигурирования шаблонов экранов МП включает выбор элементов интерфейса и их изображений на экране МП (пиктограммы и/или другие графические иллюстрации). Для конфигурирования интерфейса на этапе эксплуатации без изменения программного кода разработан метод конфигурирования интерфейса с помощью конфигурационной панели (КП), которая разрабатывается на этапе реализации МП и встраивается в систему управления для каждого МП.

КП включает область настроек, которая содержит виджеты (графическое приложение, которое выводит информацию на экран смартфона и др.) для настройки элементов интерфейса, конфигурируемого МП, и область, в которой отображается текущая страница интерфейса МП. Разработана модель интерфейса МП, представленная *JSON*⁹-объектом, полями которого являются страницы интерфейса МП. Поле содержит информацию о параметрах конфигурации элемента: обязательность/необязательность, размер и цвет элемента, принадлежность к разряду общих элементов. Под общими элементами в модели представления понимаются элементы, которые содержатся более чем на одной странице. Общие элементы необходимы для возможности настройки элемента интерфейса на всех страницах, на которых он представлен. Имеется возможность настраивать повторяющиеся элементы без привязки к общим, настраивая элемент на каждой странице, где он представлен. Поле, описывающее общие элементы, содержится в корне модели представления, как и страницы МП.

В случае, если описание составлено не в соответствии с требованиями, в процессе генерации интерфейса МП пользователю будет выведено сообщение, объясняющее, в чём заключается ошибка в его описании с целью помочь пользователю в редактировании описания.

Процесс генерации интерфейсов МП включает следующие действия: добавление приложения в систему (выполняется разработчиком МП) с названием и описанием приложения, а

⁹ *JSON* (англ. *JavaScript Object Notation*) — текстовый формат обмена данными, основанный на *JavaScript*.

также файлом, описывающим интерфейс; описание интерфейса (должно выполняться с применением расширения языка *JavaScript*); редактирование загруженного приложения; просмотр списка приложений в системе; удаление приложения.

Разработка адаптируемого интерфейса включает: обработку файла описания интерфейса МП; рендеринг (визуализацию) блока представления интерфейса МП.

3 Веб-система разработки МП для пользователей с ОИВ

Для разработки МП для пользователей с ОИВ предложена веб-система, обеспечивающая поддержку всех этапов ЖЦ МП [17]. Её архитектура включает подсистемы управления МП на этапах разработки и эксплуатации, *API* для МП, БД для хранения модулей, данных пользователей, интерфейсов и т.д. Основной функционал *MDM* подсистемы включает просмотр хранилища модулей, выбор и подключение одиночного модуля в проект разрабатываемого МП, добавление файла описания шаблонов страниц МП, генерацию и редактирование КП для МП. После тестирования разработанного МП модули, определённые разработчиком как применимые для повторного использования, могут добавляться в хранилище модулей.

Результатом работы с подсистемой является МП с шаблонным интерфейсом с элементами, заданными по умолчанию, пригодное для использования в случае, если интерфейс удовлетворяет возможностям конечного пользователя. Если необходима адаптация интерфейса под конечного пользователя, то подсистема предоставляет возможности для конфигурирования интерфейсов экранов МП с помощью КП, сгенерированной для этого МП. Архитектура системы в нотации *ArchiMate* приведена на рисунке 1.

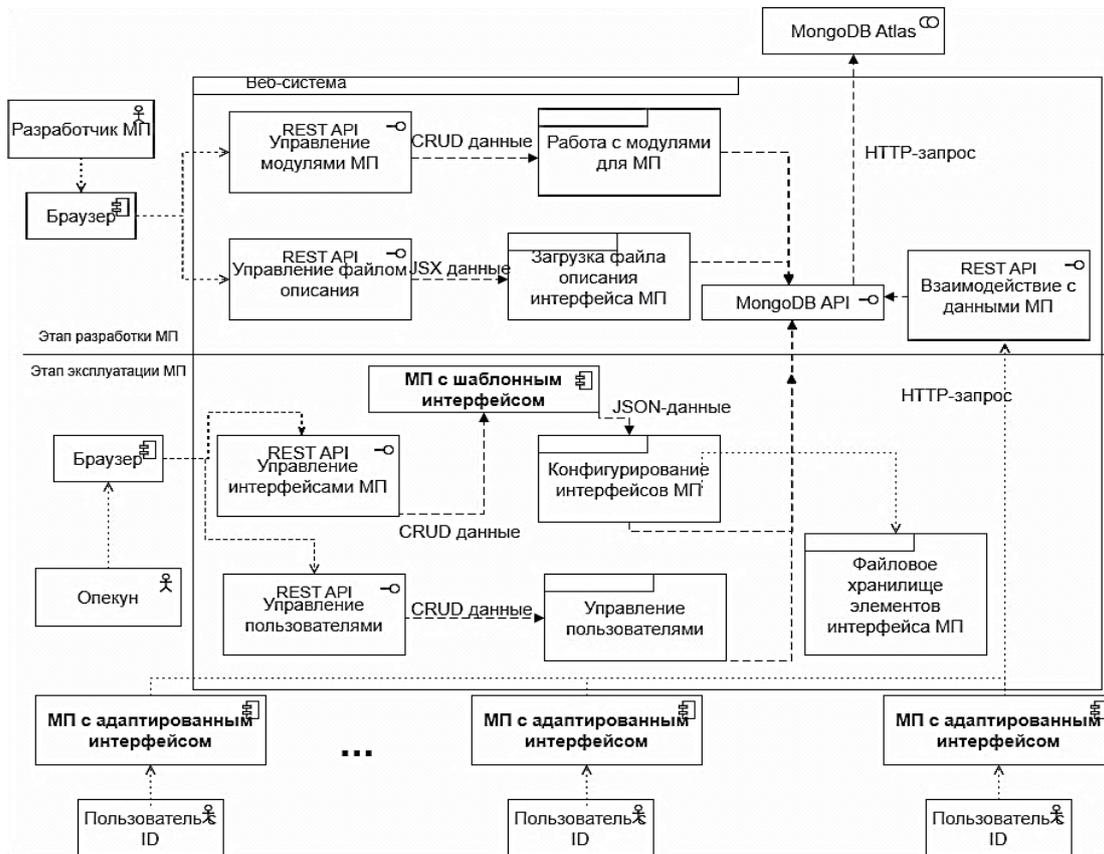


Рисунок 1 - Архитектура системы

Подсистема работы с модулями МП поддерживает разработку МП на основе многомодульной архитектуры с возможностью выбора готовых функциональных решений из хранилища модулей. Для генерации базового кода функционального модуля используются шаблоны. Шаблонизатором является *FreeMarker*¹⁰, который подходит для написания сложных шаблонов.

Разработан способ хранения функциональных модулей. Модули имеют структурированное описание в файле *README.md*. Структура описания модуля включает компоненты: назначение модуля, тип модуля, код для подключения, документация для работы с модулем.

Подсистема загрузки файла интерфейса МП реализует функции генерации КП. Алгоритм генерации КП показан на рисунке 2.

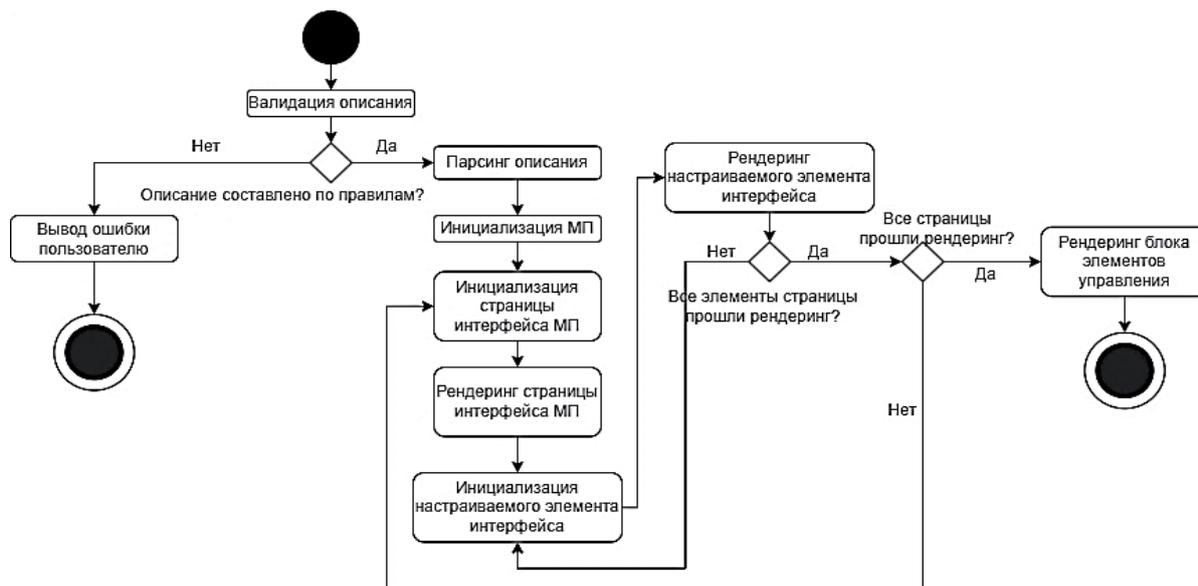


Рисунок 2 – Алгоритм генерации конфигурационной панели

Логическая схема работы системы на этапах ЖЦ МП показана на рисунке 3.

4 Апробация веб-системы разработки МП для пользователей с ОИВ

Разработанная система протестирована на нескольких МП с адаптируемым интерфейсом, предназначенных для разных категорий пользователей с ОИВ. В тестировании принимали участие разработчики МП, потенциальные пользователи веб-системы и пользователи МП (люди с ОИВ). Тестирование системы включало: процесс разработки МП с применением системы; настройку МП под пользователей с ОИВ в системе и работу с разработанными МП этих пользователей с ОИВ. В качестве критериев оценки выбраны трудоёмкость разработки МП и доступность МП для пользователей с ОИВ. Доступность МП оценивалась экспертным путем: сотрудники, работающие с людьми с ОИВ, наблюдали за работой и делали выводы о том, насколько успешно пользователи справлялись с работой.

В рамках апробации были разработаны несколько МП для пользователей с ОИВ:

- мобильная игра для развития навыков распознавания и различения предметов, окружающих человека в повседневной жизни (для пользователей с тяжёлыми множественными нарушениями развития);

¹⁰ What is Apache FreeMarker™? <https://freemarker.apache.org/>.

- комплекс МП «e-Board» для информирования клиентов медицинских и реабилитационных центров для людей с ОИВ;
- МП «AIT Test» для выявления предпочтений пользователей с ОИВ, проявивших интерес к трудовой деятельности, и выбора для них подходящих рабочих мест;
- мобильная игра «Money Game» для тренировки навыков совершения покупок.

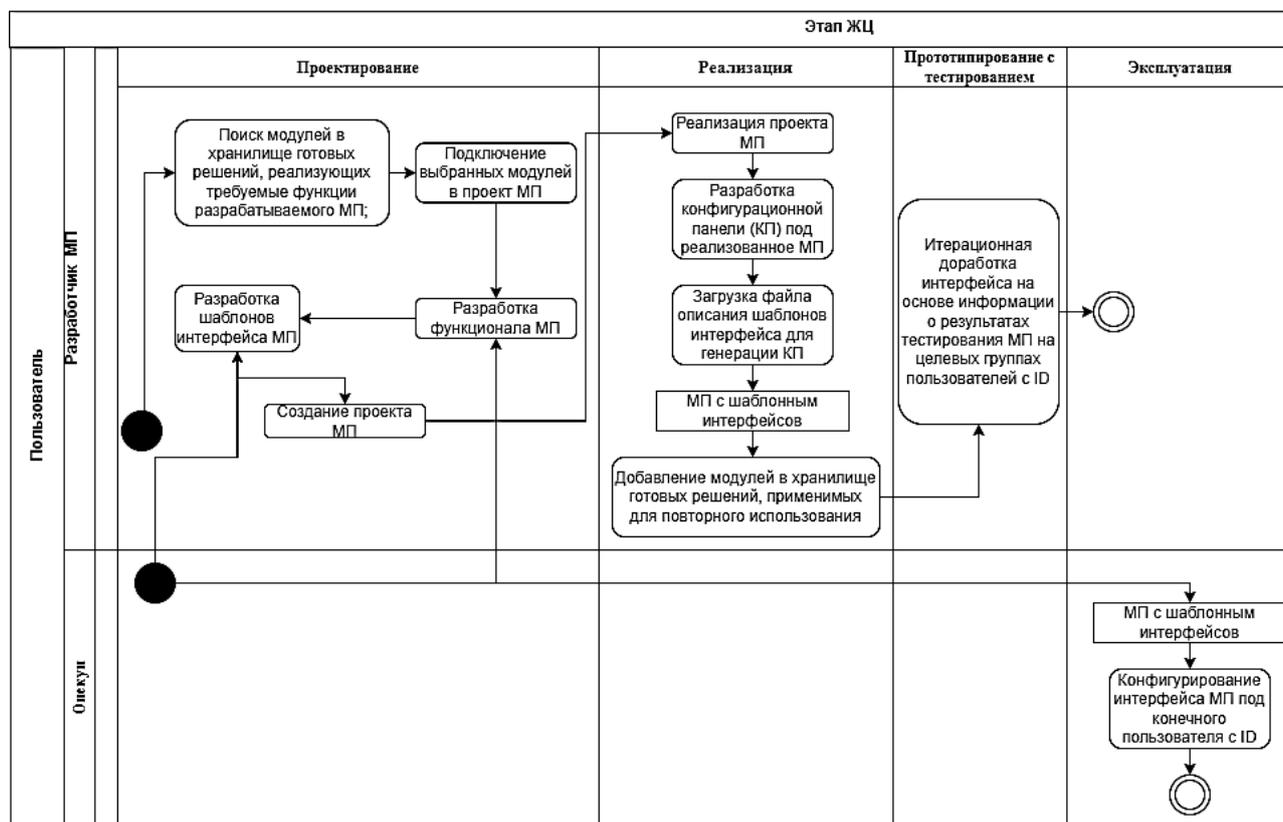


Рисунок 3 – Логическая схема работы системы на этапах жизненного цикла мобильного приложения

Для оценки временных затрат на разработку МП был проведён анализ фактической трудоёмкости разработки МП (T_{ϕ}) с применением системы в сравнении с трудоёмкостью разработки таких же МП с применением стандартных средств разработки (T_c), определённых экспертом. Пример оценки трудоёмкости разработки МП «AIT Test», приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Анализ временных затрат на разработку МП «AIT Test»

Функционал	Трудоёмкость разработки, час.	
	T_{ϕ}	T_c
Разработка архитектуры	0 (использован шаблон многомодульной архитектуры)	8
Разработка экрана авторизации	0 (выбран готовый модель их хранилища модулей)	16
Разработка экрана тестирования	12 (повторно использован код взаимодействия с API сервера)	16
Разработка экрана успешного окончания тестирования	7.45 (использован шаблон для генерации базовых классов для реализации экрана)	8
Разработка КП	4	0
Тестирование	6	2
Итого	29.45	50

Результаты оценки трудоёмкости всех разработанных МП показали, что применение веб-системы позволяет сократить временные затраты на разработку МП в среднем в два раза.

Тестирование разработанных МП проводилось в сотрудничестве с коллективами Волгоградского психоневрологического интерната¹¹ и медицинского центра *MPI Oosterlo*¹², специализирующимся на работе с людьми с ОИВ. В тестировании участвовали сотрудники, как пользователи веб-системы, и пациенты с ОИВ, как пользователи МП. Сотрудники тестировали функции веб-системы, настраивали интерфейсы для пользователей МП и помогали пользователям работать с МП. Сотрудники отметили, что пациенты с большим интересом участвовали в тестировании, практически все они смогли управлять МП без помощи (или с минимальной помощью) сотрудников. Успешная работа пользователей с ОИВ с МП показала, что настройка интерфейса МП для каждого пользователя сотрудниками, которые хорошо знают своих подопечных, обеспечила доступность МП для пользователей с разными возможностями и ограничениями.

Результаты тестирования показали, что применение веб-системы позволяет разрабатывать МП, помогающие людям с ОИВ развивать различные навыки повседневной жизни и социализироваться в современном обществе.

5 Онтологическое представление процесса разработки МП для пользователя с ОИВ

Категоризация МП для пользователей с ОИВ позволяет объединить знания о таких МП, как об объектах разработки, и описать их как самостоятельную область знаний. В качестве формальной модели представления знаний выбрана онтологическая модель. Использование этой модели позволяет извлекать знания о различных аспектах процесса разработки МП для пользователей с ОИВ, технологиях и средствах разработки и применять их для создания МП, доступных людям с различными интеллектуальными возможностями и ограничениями. Онтология процесса разработки МП для пользователей с ОИВ представлена на рисунке 4.

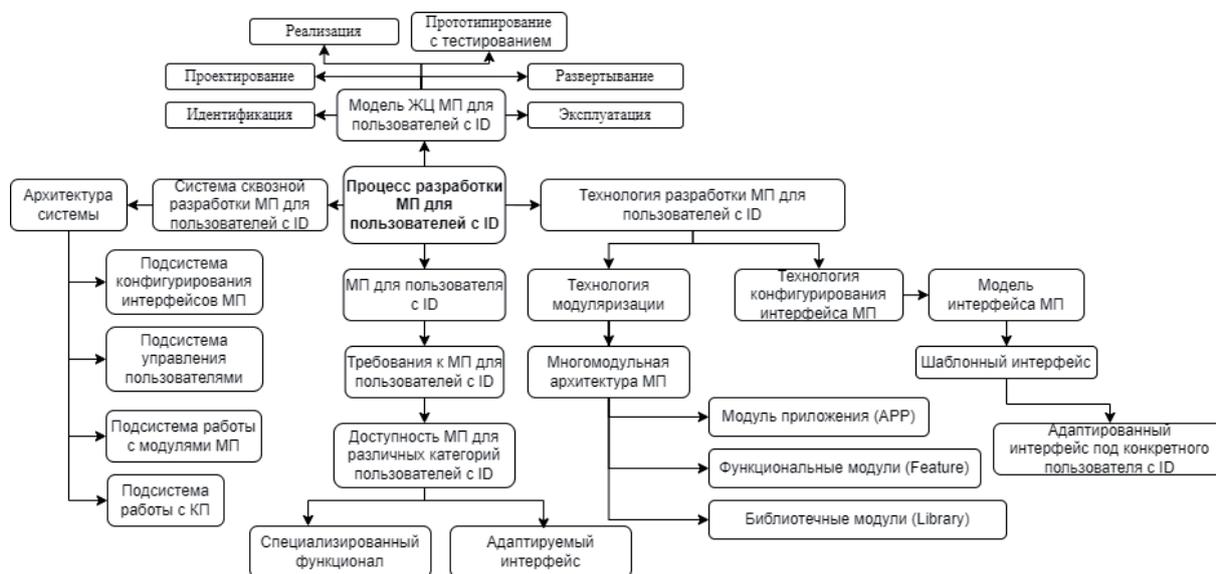


Рисунок 4 – Онтологическая модель процесса разработки мобильных приложений для пользователей с ограниченными интеллектуальными возможностями

¹¹ ГБССУ СО ГПВИ "Волгоградский психоневрологический интернат" <https://442fz.volganet.ru/025001/>.

¹² MPI Oosterlo <https://www.mpi-oosterlo.be/>.

Заключение

В работе описан подход к разработке МП для пользователей с ОИВ, включающий набор моделей, методов и технологий и обеспечивающий поддержку всех этапов ЖЦ МП. Новизна подхода заключается в применении шаблонной многомодульной архитектуры с возможностью выбора готовых функциональных решений из хранилища модулей и КП, позволяющих адаптировать интерфейс разработанных МП для конечного пользователя без изменения программного кода. Описаны веб-система для автоматизированной разработки МП для пользователей с ОИВ и приведены примеры разработанных МП с адаптируемым интерфейсом. Описание проектных и технологических решений, разработанных в рамках предложенного подхода, представлено в виде онтологической модели.

Список источников

- [1] **Кос А.В., Карпова Г.Г., Антонова Е.П.** Качество жизни лиц с ограниченными возможностями в условиях проживания в интернатах. *Журнал социологии и социальной антропологии*. 2009. №2. С.131-152.
- [2] **Прыжкова О.В.** Улучшение качества жизни молодых людей с ограниченными возможностями. *Гуманитарный трактат*. 2019. №69. С.9-12.
- [3] **Korcak P., Zwierzchowska A.** Using mobile applications in the process of enhancing and restoring abilities in individuals with intellectual disability and other disabilities – a literature review. *Advances in Rehabilitation*. 2020. No34(4). P.36-41. DOI:10.5114/areh.2020.100774.
- [4] **Alanazi A.** Smartphone apps for transportation by people with intellectual disabilities: are they really helpful in improving their mobility? *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2022. No17(1). P.1-7. DOI: 10.1080/17483107.2020.1820085.
- [5] **Martin A.J., Strnadová I., Loblinz J., Danker J.C., Therese M.** Cumming The role of mobile technology in promoting social inclusion among adults with intellectual disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities (JARID)*. 2021. No34 (3). P.840-851. DOI: 10.1111/jar.12869.
- [6] **Juan C., Ida W., Letizia J., Susanna P., Stefano C., Javier G., Gunnar H., Henriette M.** Developing software for motivating individuals with intellectual disabilities to do outdoor physical activity. In Proceedings of the ACM/IEEE 42nd International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Society (ICSE-SEIS '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 81–84. DOI: 10.1145/3377815.3381376.
- [7] **Макуха Л., Котов С., Казакова У.** Мобильное приложение для людей с ограниченными возможностями. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2022. №6-1; 154-157. DOI: 10.24412/2500-1000-2022-6-1-154-157.
- [8] **Bennett R., Vijaygopal R.** Adoption of new transportation assistive technologies by people with mild intellectual disabilities. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2023. C.1-11. DOI: 10.1080/17483107.2023.2286522.
- [9] **Хорошевский В.Ф.** Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №4(34). С.429-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-366-386.
- [10] What is Mobile Application Development? <https://aws.amazon.com/ru/mobile/mobile-application-development/>.
- [11] **Kaur A., Kaur K.** Suitability of Existing Software Development Life Cycle (SDLC) in Context of Mobile Application Development Life Cycle (MADLC). *International Journal of Computer Applications*. 2015. P.1-6 DOI:10.5120/20441-2785.
- [12] **Venkata N., Divya D., Taeghyun K., Manikanta I.** Factors Influencing Quality of Mobile Apps: Role of Mobile App Development Life Cycle. *International Journal of Software Engineering & Applications*. 2014. C.15-34. DOI: 10.48550/arXiv.1410.4537.
- [13] **Yamin M., Basel K.** Mobile device management (MDM) technologies, issues and challenges. Proceedings of ACM International Conference Proceeding Series, Gjøvik, Norway, 2019. P.143-147.
- [14] **Igual R., Plaza I., Martín L., Corbalan M., Medrano C.** Guidelines to Design Smartphone Applications for People with Intellectual Disability: A Practical Experience. In book: Ambient Intelligence - Software and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Heidelberg. 2013. vol 219. P.65-69. DOI: 10.1007/978-3-319-00566-9_9.

- [15] **Mauro J., Marcelo G. Alejandro R.** An AAC Mobile-Based Application for People with Intellectual Disability: A Case Study in Brazil. *Advances in Human-Computer Interaction*. 2020. P.1-12. DOI: 10.1155/2020/8932707
- [16] **Shabalina O., Guriev V., Kosyakov S., Dmitriev N., Davtian A.** MADM System for the Development of Adaptable Mobile Applications for People with Intellectual Disabilities. Proceedings of the 11th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications. (15–17 July. 2020 Piraeus, Greece). 2020. P.1-8, DOI: 10.1109/IISA50023.2020.9284409.
- [17] **Guriev V., Voronina A., Kataev A., Petrova T.** A System for Management of Adaptable Mobile Applications for People with Intellectual Disabilities. In: Kravets A.G., Shcherbakov M.V., Groumpos P.P. (eds) Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. CIT&DS 2023. Communications in Computer and Information Science, vol 1909. Springer, Cham. 2019. P.474-484. DOI:10.1007/978-3-031-44615-3_33.

Сведения об авторах



Гурьев Владислав Витальевич, 1997 г. рождения. Магистр информатики и вычислительной техники ВолгГТУ (2021), аспирант ВолгГТУ. В списке научных трудов 7 работ и 4 регистрации программы для ЭВМ. Область научных интересов – методы интеллектуального анализа данных. Author ID (Scopus): 57211168318. vladgurjev@mail.ru ✉.

Шабалина Ольга Аркадьевна, 1954 г. рождения. Окончила ВолгГТУ в 1978 г., к.т.н. (2005). Доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования ВолгГТУ. В списке научных трудов более 200 работ в области разработки моделей, методов и средств создания прикладного программного обеспечения. Author ID (РИНЦ): 476044; Author ID (Scopus): 55331038300; Researcher ID (WoS): E-1752-2011. ORCID 0000-0002-8160-306X.



o.a.shabalina@gmail.com.



Садовникова Наталья Петровна, 1967 г. рождения. Окончила Волгоградский государственный университет в 1990 г., д.т.н. (2014). Профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования ВолгГТУ. В списке научных трудов более 200 работ в области анализа данных, компьютерного моделирования, создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Author ID (РИНЦ): 427120; Author ID (Scopus): 55912160300; Researcher ID (WoS): M-1564-2015. n_sadovnikova@vstu.ru.

Воронина Ангелина Андреевна, 1997 г. рождения. Магистр информатики и вычислительной техники ВолгГТУ (2021), аспирант ВолгГТУ. В списке научных трудов 15 работ и 2 регистрации программы для ЭВМ. Область научных интересов – методы интеллектуального анализа данных, машинное обучение. Author ID (Scopus): 57205188808. angelina.vaa@gmail.com.



Косяков Станислав Валерьевич, 1996 г. рождения. Магистр информатики и вычислительной техники ВолгГТУ (2020), разработчик в "SberDevices". В списке научных трудов 4 работы и 1 регистрация программы для ЭВМ. Область научных интересов – методы интеллектуального анализа данных, мобильные приложения. Author ID (Scopus): 57211169538. luckyvegas888@gmail.com.

Дмитриев Никита Михайлович, 1997 г. рождения. Магистр информатики и вычислительной техники ВолгГТУ (2022), разработчик в "VK". В списке научных трудов 2 работы. Область научных интересов – проектирование пользовательских интерфейсов. Author ID (Scopus): 57221472597. nikitadmitriev97@mail.ru.



Поступила в редакцию 22.12.2023, после рецензирования 12.04.2024. Принята к публикации 29.04.2024.



End-to-end mobile application development technology for people with intellectual disabilities

© 2024, V.V. Guryev ✉, O.A. Shabalina, N.P. Sadovnikova, A.A. Voronina, S.V. Kosyakov, N.M. Dmitriev

Volgograd State Technical University (VSTU), Volgograd, Russia

Abstract

The features of developing mobile applications for users with intellectual disabilities are examined. A technology for developing mobile applications is proposed, utilizing a template multi-module architecture that allows for the selection of ready-made functional solutions from a module repository. A method for developing an adaptable mobile application interface is described, including the creation of screen templates with interface elements, categorizing template elements into mandatory and optional, and matching each element with sets of possible images. A web system is outlined that supports the stages of creating and operating mobile applications with an adaptable interface. Examples of developed mobile applications demonstrate their effectiveness for users with intellectual disabilities. A method is proposed for adapting the mobile application interface using a configuration panel, which supports the life cycle of mobile applications for this user category. An ontology was selected as a formal model for representing knowledge, enabling the extraction of knowledge for developing mobile applications with an adaptable interface and applying it to create applications accessible to people with intellectual disabilities.

Keywords: *limited intellectual capabilities, mobile application, life cycle, adaptable interface, configuration panel, web system.*

For citation: Guryev VV, Shabalina OA, Sadovnikova NP, Voronina AA, Kosyakov SV, Dmitriev NM. End-to-end mobile application development technology for people with intellectual disabilities [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 230-242. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-230-242.

Acknowledgment: The authors thank students and graduate students of the Department of CAD and PC at VSTU for their active participation in the development of mobile applications for people with ID, as well as employees of rehabilitation and medical centers for organizing testing of mobile applications.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 - System architecture

Figure 2 - Configuration panel generation algorithm

Figure 3 - Logical diagram of the system operation at the stages of the mobile application life cycle

Figure 4 - Ontological model of the mobile applications development process for users with intellectual disabilities

Table 1 - Analysis of time costs for mobile application development «AIT Test»

References

- [1] Kos AV, Karpova GG, Antonova EP. Quality of life of persons with disabilities living in boarding schools [In Russian]. *Journal of Sociology and Social Anthropology*. 2009; 2: 131-152.
- [2] Pryzhkova OV. Improving the quality of life of young people with disabilities [In Russian]. *Humanitarian treatise*. 2019; 69: 9-12.
- [3] Korczak P, Zwierzchowska A. Using mobile applications in the process of enhancing and restoring abilities in individuals with intellectual disability and other disabilities – a literature review. *Advances in Rehabilitation*. 2020; 34(4): 36-41. DOI:10.5114/areh.2020.100774.
- [4] Alanazi A. Smartphone apps for transportation by people with intellectual disabilities: are they really helpful in improving their mobility? *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2022; 17(1): 1-7. DOI: 10.1080/17483107.2020.1820085.

- [5] **Martin AJ, Strnadová I, Loblinzk J, Danker JC, Therese M.** Cumming The role of mobile technology in promoting social inclusion among adults with intellectual disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities* (JARID). 2021; 34(3): 840-851. DOI: 10.1111/jar.12869.
- [6] **Juan C, Ida W, Letizia J, Susanna P, Stefano C, Javier G, Gunnar H, Henriette M.** Developing software for motivating individuals with intellectual disabilities to do outdoor physical activity. In Proceedings of the ACM/IEEE 42nd International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Society (ICSE-SEIS '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 81–84. DOI: 10.1145/3377815.3381376.
- [7] **Makukha L, Kotov S, Kazakova U.** Mobile application for people with disabilities. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2022; 6-1: 154-157. DOI: 10.24412/2500-1000-2022-6-1-154-157.
- [8] **Bennett R, Vijaygopal R.** Adoption of new transportation assistive technologies by people with mild intellectual disabilities. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2023. P.1-11. DOI: 10.1080/17483107.2023.2286522.
- [9] **Khoroshevsky VF.** Design of software systems under the control of ontologies: models, methods, implementations [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 429-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-366-386.
- [10] What is Mobile Application Development? <https://aws.amazon.com/ru/mobile/mobile-application-development/>.
- [11] **Kaur A, Kaur K.** Suitability of Existing Software Development Life Cycle (SDLC) in Context of Mobile Application Development Life Cycle (MADLC) // *International Journal of Computer Applications*. 2015. P.1-6 DOI:10.5120/20441-2785.
- [12] **Venkata N, Divya D, Taeghyun K, Manikanta I.** Factors Influencing Quality of Mobile Apps: Role of Mobile App Development Life Cycle. *International Journal of Software Engineering & Applications*. 2014. P.15-34. DOI: 10.48550/arXiv.1410.4537.
- [13] **Yamin M, Basel K.** Mobile device management (MDM) technologies, issues and challenges. Proceedings of ACM International Conference Proceeding Series, Gjøvik, Norway, 2019. P.143-147.
- [14] **Igual R, Plaza I, Martín L, Corbalan M, Medrano C.** Guidelines to Design Smartphone Applications for People with Intellectual Disability: A Practical Experience. In book: *Ambient Intelligence - Software and Applications*. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Heidelberg. 2013; 219: 65-69. DOI: 10.1007/978-3-319-00566-9_9.
- [15] **Mauro J, Marcelo G, Alejandro R.** An AAC Mobile-Based Application for People with Intellectual Disability: A Case Study in Brazil. *Advances in Human-Computer Interaction*. 2020. P.1-12. DOI: 10.1155/2020/8932707.
- [16] **Shabalina O, Guriev V, Kosyakov S, Dmitriev N, Davtian A.** MADM System for the Development of Adaptable Mobile Applications for People with Intellectual Disabilities. Proceedings of the 11th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications. (15–17 July. 2020 Piraeus, Greece). 2020. P.1-8, DOI: 10.1109/IISA50023.2020.9284409.
- [17] **Guriev V, Voronina A, Kataev A, Petrova T.** A System for Management of Adaptable Mobile Applications for People with Intellectual Disabilities. In: Kravets, A.G., Shcherbakov, M.V., Groumpos, P.P. (eds) *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science*. CIT&DS 2023. Communications in Computer and Information Science, vol 1909. Springer, Cham. 2019. P.474-484. DOI: 10.1007/978-3-031-44615-3_33.

About the authors

Vladislav Vitalievich Guryev (b. 1997). Master of Informatics and Computer Engineering at the VSTU (2021), PhD student in Informatics and Computer Engineering at the VSTU. The list of scientific works includes 7 works and 4 registrations of computer programs. Area of scientific interests includes data mining methods, design of high-load systems. Author ID (Scopus): 57211168318. vladgurjev@mail.ru ✉.

Olga Arkadyevna Shabalina (b. 1954). Graduated from the VSTU in 1978, Ph.D. (2005). Associate Professor, Department of Computer-Aided Design and Exploratory Design Systems, VSTU. The list of scientific papers includes more than 200 works in the field of developing models, methods and tools for creating application software. Author ID (RSCI): 476044; Author ID (Scopus): 55331038300; Researcher ID (WoS): E-1752-2011. ORCID 0000-0002-8160-306X. o.a.shabalina@gmail.com.

Natalya Petrovna Sadovnikova (b. 1967). Graduated from the Volgograd State University in 1990, Doctor of Technical Sciences. (2014). Professor of the Department of Computer-Aided Design and Exploratory Design at the VSTU. The list of scientific papers includes more than 200 works in the field of data analysis, computer modeling, and the creation of intelligent decision support systems. Author ID (RSCI): 427120; Author ID (Scopus): 55912160300; Researcher ID (WoS): M-1564-2015. n_sadovnikova@vstu.ru.

Angelina Andreevna Voronina (b. 1997). Master of Informatics and Computer Engineering at the VSTU (2021), PhD student in Informatics and Computer Engineering at the VSTU. The list of scientific works includes 15 works and 2

registrations of computer programs. The area of scientific interests includes methods of data mining, methods of intelligent data processing based on machine learning, machine learning. Author ID (Scopus): 57205188808. *angelina.vaa@gmail.com*.

Stanislav Valerievich Kosyakov (b. 1996). Master of Informatics and Computer Engineering at the VSTU (2020), a developer at "SberDevices". The list of scientific papers includes 4 works and 1 registration of a computer program. The area of scientific interests includes data mining methods, mobile development. Author ID (Scopus): 57211169538. *luckyvegas888@gmail.com*.

Nikita Mikhailovich Dmitriev (b. 1997). Master of Informatics and Computer Engineering at the VSTU (2022), developer at "VK". There are 2 papers in the list of scientific works. The area of scientific interests includes user interface design. Author ID (Scopus): 57221472597. *nikitadmitriev97@mail.ru*.

Received December 22, 2023, Revised April 12, 2024. Accepted April 29, 2024.



Построение онтологии для систематизации характеристик сети Интернета вещей

© 2024, О.С. Исаева

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН (ИВМ СО РАН), Красноярск, Россия

Аннотация

Представлена формализация модели сети Интернета вещей, предназначенной для мониторинга технологических помещений с телекоммуникационным оборудованием в Федеральном исследовательском центре «Красноярский научный центр СО РАН». Сеть включает измерительные устройства, телекоммуникационную среду, серверы для сбора данных и прикладное программное обеспечение. Для информационного взаимодействия используется схема «издатель-подписчик» и облегченный протокол с невысокой нагрузкой на каналы связи. Создана онтология, описывающая архитектуру сети и свойства устройств, которые собирают, передают, хранят и обрабатывают данные. Онтология содержит классы, представляющие понятия предметной области, отношения, свойства данных, диапазоны их изменения, критические значения, ограничивающие атрибуты элементов онтологии. Объекты онтологии имеют собственное цифровое представление в базах данных, включая результаты измерений, получаемые датчиками сети Интернета вещей, прецеденты аномальных данных, их статистические и частотные характеристики. Формализация позволила выявить неявные зависимости между объектами, связать их с характеристиками процессов, наблюдаемых устройствами сети Интернета вещей, и решать практические задачи. Рассмотрена задача выбора характеристик, влияющих на изменение схем информационного взаимодействия. Выполнен опрос экспертов и построена модель Кано для приоритизации характеристик, влияющих на принятие решений об организации схемы информационного взаимодействия в сети Интернета вещей.

Ключевые слова: Интернет вещей, издатель, брокер, подписчик, онтология, анализ задержек, частотный анализ, модель Кано, реинжиниринг сети.

Цитирование: Исаева О.С. Построение онтологии для систематизации характеристик сети Интернета вещей // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С. 243-255. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-243-255.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Интернет вещей (*Internet of Things, IoT*) – это современная сетевая парадигма, обеспечивающая коммуникации между разнородными физическими и виртуальными системами. Международным союзом электросвязи для стандартизации Интернета вещей разработан стандарт (*Internet of Things Global Standards Initiative, IoT-GSI*), в котором определена иерархическая архитектура IoT-сетей [1, 2], включающая следующие уровни [3]:

- *сенсорный* (уровень устройств, выполняющих сбор информации о состоянии наблюдаемых объектов, настройка их энергосбережения, поддержка сетевых протоколов);
- *сетевой* (маршрутизация, передача информации – аналог сетевого и транспортного уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем);
- *сервисный* (обработка и хранение данных);
- *прикладной* (услуги на основе данных IoT-устройств).

Дополнительно определены два вертикальных уровня – *управление и безопасность* [4]. Стабильность такой многоуровневой архитектуры обеспечивается специальными инстру-

ментами получения, хранения, обработки и анализа данных. Для обнаружения и смягчения последствий кибератак проводится ряд работ:

- строятся модельные сценарии сетевого поведения *IoT*-устройств [5];
- в системы безопасности интегрируются методы анализа временных рядов [6];
- для поиска аномалий создаются и используются публичные наборы данных [7];
- к структурированным записям сеансов связи добавляются сведения из неструктурированных журналов обращений [8, 9], статистические характеристики, параметры интенсивности и продолжительности передачи пакетов данных и пр., для анализа которых применяются методы машинного обучения [10].

Такие работы включают решения задач сетевого администрирования, обеспечения кибербезопасности, анализа данных и обнаружения сетевых аномалий [11].

Для учёта мобильности и разнородности устройств, разнотипности протоколов сетевого взаимодействия и обеспечения работы с большими объёмами данных в *IoT*-сети требуется структурирование и систематизация характеристик входящих в неё элементов [12]. Для многоуровневых моделей сложных объектов сокращение размерности достигается построением и анализом онтологий, извлечением существенных признаков из определений понятий, разделением их на группы обобщённых свойств, характеризующихся сопоставимыми отношениями с внешней средой, и определением родовидовой связи между существенными признаками [13]. Семантическая связность таких исследований обеспечивается созданием унифицированного словаря концептов и формальным описанием структуры их взаимосвязей. Такие онтологии позволяют обмениваться данными о киберугрозах, улучшая уровень защиты, ускоряют работу моделей машинного обучения, используемых в антивирусных «движках». На их основе строятся векторы атаки, для которых выявляются характерные виды уязвимостей и выбираются соответствующие средства защиты и системные обновления, необходимые для предотвращения инцидентов [14]. Онтологии позволяют решать задачи проектирования и развития телекоммуникационных сетей, обеспечивая включение в них новых сегментов на основе моделей, расширяющих доменную онтологию телекоммуникационных услуг специфическими характеристиками гибридных телекоммуникационных сетей и функциями операторов связи [15].

Целью данной работы является построение онтологии, в которой формализованы основные понятия технологии Интернета вещей и систематизированы характеристики элементов *IoT*-сети, реализованной в Федеральном исследовательском центре «Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН». Исследование проводится на базе сети Интернета вещей, выполняющей мониторинг технологических помещений с телекоммуникационным оборудованием [16]. Онтология содержит как фактические, так и расчётные параметры, что позволяет выявлять взаимосвязи понятий и рассматривать характеристики работы устройств. Построенная онтология применяется для выбора настроек брокеров, собирающих и распределяющих данные в *IoT*-сети.

1 Описание онтологии

Используется редактор *Protégé*, в котором под онтологией понимается формальное описание понятий (классов), образцов классов, их свойств (функций и атрибутов) и ограничений на свойства [17]. Этот инструмент позволяет строить категоризованную иерархическую структуру элементов и предоставляет методы мониторинга зависимостей, реконструкции скрытых знаний, а также создания и выполнения семантических запросов к данным. Формальная семантика используемого языка онтологии представляет логические следствия из фактов, как непосредственно заданных, так и полученных в результате логического вывода.

Для построения онтологии рассмотрена архитектура *IoT*-сети Красноярского научного центра СО РАН и данные сетевого трафика. Элементы сети распределены между перечисленными в стандарте *IoT-GSI* уровнями. Иерархическая структура классов приведена на рисунке 1.

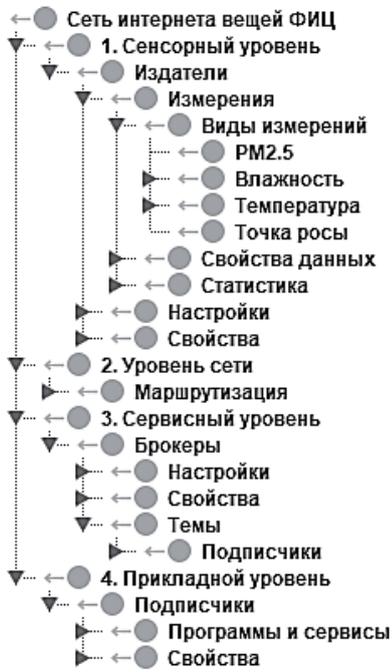


Рисунок 1 – Иерархическая структура классов

На рисунке 1 содержатся сенсорный, сервисный и прикладной уровни, а также уровень сети. К каждому уровню отнесены типы устройств и их характеристики. Информационное взаимодействие между сенсорным и прикладным уровнями организовано по схеме, заданной шаблоном «издатель-подписчик». Используются следующие понятия [18]:

Издатель – устройство, генерирующее данные о состоянии контролируемых объектов. В данном случае - это датчики температуры, влажности и т.д., которые отправляют брокерам сообщения по определённым темам.

Брокер – это сервер и программное обеспечение, которое получает все данные от издателей, а затем распределяет сообщения соответствующим подписчикам.

Подписчик – клиент (приложение или устройство), получающий и потребляющий данные в соответствии с заданными тематическими подписками.

Тема – семантика, определяющая издателя и вид информации и позволяющая подписчику получать необходимые данные.

В такой схеме *IoT*-устройства, являющиеся отправителями сообщений, не связаны с их потребителями. Данные абстрагированы от подписчиков и распределяются через посредника-брокера в соответствии с темами. Это обеспечивает масштабируемость и динамичную топологию сети.

В качестве протокола обмена данными выбран облегчённый протокол с невысокой нагрузкой на каналы связи (*Message Queuing Telemetry Transport, MQTT*) [19]. Основные элементы сети: издатели – устройства *CL-210-E ICP DAS*¹, имеющие функции измерения температуры, влажности и концентрации мелкодисперсной пыли в окружающей среде, брокеры *Eclipse Mosquitto* [20], развёрнутые на кластере *Kubernetes (K8s)*², объединяющем физические серверы и виртуальные машины.

Фрагмент графического представления онтологии, описывающего основные характеристики издателей, приведён на рисунке 2.

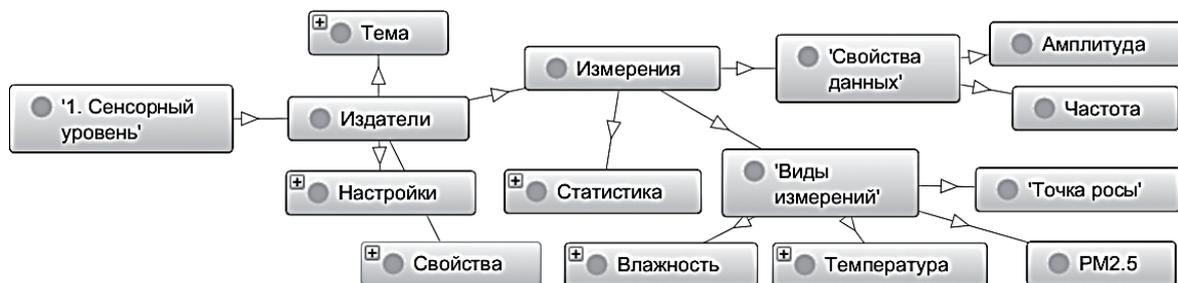


Рисунок 2 – Фрагмент графического представления классов в онтологии

¹ *CL-210-E ICP DAS*. См. например. <https://insat.ru/prices/info.php?pid=139924&yclid=13744516879505686527>.

² *Production-Grade Container Orchestration*. <https://kubernetes.io/>.

На рисунке 2 показаны значимые характеристики издателей, расположенных на сенсорном уровне: измерения (их виды, статистика и свойства данных), свойства устройств, настройки и публикуемые темы.

Элементы *IoT*-сети представлены в виде экземпляров классов онтологии. На рисунке 3 приведён пример описания издателей, данные которых собираются брокерами и контролируются приложениями-подписчиками.

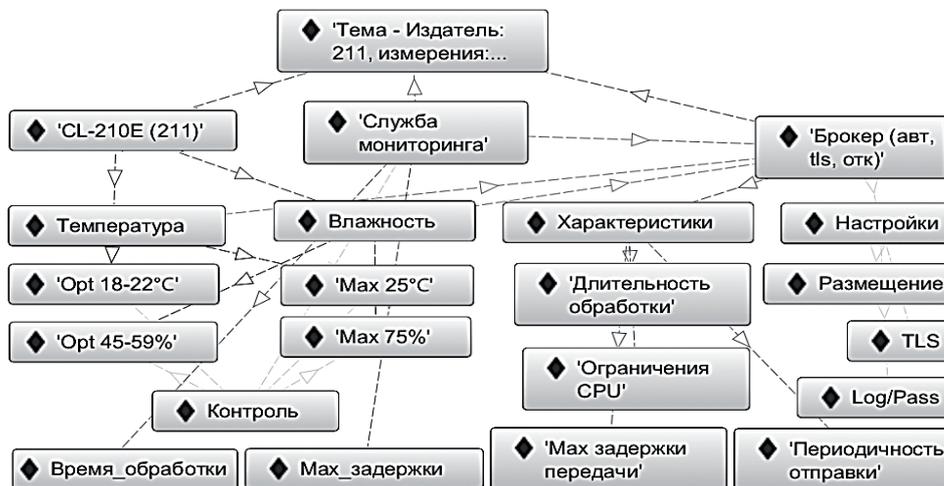


Рисунок 3 – Фрагмент графического представления экземпляров классов

На рисунке 3 показаны взаимосвязи элементов сети и их характеристики. В представленном фрагменте онтологии издатель с именем «CL-210E (211)» связан с брокером, имеющим настройки политик безопасности: доступ по авторизации (Log/Pass), шифрование (TLS³) и размещение в открытой сети. Характеристиками брокера являются: периодичность отправки данных издателем; ограничения, установленные сервером, на котором он размещён; задержки передачи; длительность обработки пакетов данных. Для измеряемых показателей температуры и влажности заданы оптимальные и максимальные значения. В зависимости от имени издателя и типа измерения у брокера формируется тема, на которую подписано программное обеспечение «Службы мониторинга», которое выполняет контроль измеряемых показателей по заданным ограничениям. В онтологию включены технические параметры устройств, необходимые для настройки их функционирования, и расчётные, построенные на основе собираемой статистики.

Машина вывода в редакторе *Protégé* позволяет выявлять зависимости и выполнять контроль структуры и связей между экземплярами данных. Выполненное семантическое моделирование позволяет обобщать и структурировать понятия предметной области (ПрО), быстро извлекать знания об элементах *IoT*-сети и может использоваться для решения задач её настройки и сопровождения.

2 Построение характеристик оценки *IoT*-сети

Рассматриваемая *IoT*-сеть выполняет мониторинг технологических помещений, снабжённых системами кондиционирования, в которых размещено коммуникационное и вычислительное оборудование, обладающее повышенной теплоотдачей. Данные о состоянии окружающей среды в помещениях поступают подписчикам от издателей (*IoT*-датчиков) че-

³ TLS от англ. *Transport Layer Security* - протокол защиты транспортного уровня.

рез брокеров. Одна и та же информация может проходить через разные брокеры. Из онтологии выбираются подписчики, брокеры и издатели, связанные общими темами.

На рисунке 4 приведён фрагмент онтологии, содержащей набор издателей, подписчиков и брокеров, связанных темой. Задачи реинжиниринга сети включают выбор наиболее подходящих брокеров, с которыми взаимодействуют потребители информации, и изменение свойств подписки. На рисунке показан пример выбора брокера, который публикует данные по заданной теме. Название темы формирует издатель «CL-210E (211)» (его характеристики представлены на рисунке 3). Выбранная тема публикуется двумя брокерами, имеющими разные настройки безопасности (указаны в их наименованиях).



Рисунок 4 – Фрагмент онтологии для выбора брокеров по заданной теме

Выполняя фильтрацию записей в базах данных, собираемых от брокеров, можно получить статистику их работы и рассмотреть её зависимость от размещения и настроек. Анализ полученной статистики позволяет специалистам ПрО выбирать брокеров, обладающих значимыми для функционирования сети характеристиками. Для выполнения такого многокритериального выбора применяются различные подходы. В [21] решение задачи построения оптимального маршрута в сети, зависящего от условий её функционирования (задержка передачи

пакетов, коэффициент потери данных, пропускная способность, загруженность буферов, длина маршрута), выполняется на основе нечёткой логики. Все рассматриваемые характеристики входят в нечёткие правила равнозначно и учитываются при их свёртке с одинаковым весом. Проблема выбора конкретных характеристик, которые необходимо учитывать, и определения весовых коэффициентов для построения обобщённой оценки остаётся не решённой.

Для поддержки решения этой задачи в данной работе построена модель Кано [22]. Характеристики, которые по оценкам экспертов попадают в категории базовых, конкурентных, привлекательных или нежелательных, включаются в онтологию и используются для выбора брокеров. Весовые коэффициенты устанавливаются в зависимости от типа категории. Параметры, попавшие в класс нейтральных, влияние на выбор не оказывают.

Чтобы путь от отправки данных до их получения конечным пользователем был наилучшим, требуется учитывать сквозную задержку или время ответа. В статье [23] сквозная задержка определяется как задержка времени ответа от издателя подписчику через брокера. Эта задержка рассчитывается как сумма задержек публикации сообщения брокеру, времени обработки брокером и получения сообщения подписчиком:

$$R(b)_{p \rightarrow s} = R_{p \rightarrow b} + R_b + R_{b \rightarrow s}, \quad (1)$$

где $R(b)_{p \rightarrow s}$ – сквозная задержка, p – издатель, b – брокер, s – подписчик; $R_{p \rightarrow b}$ – задержка, вызванная сетью передачи между b и p ; R_b – среднее время обработки данных брокером; $R_{b \rightarrow s}$ – задержка, вызванная сетью передачи между b и s .

В практических случаях время сквозной задержки связано со всеми возможными коммуникациями между издателями и подписчиками. Время изменяется в зависимости от их местоположения в общей структуре сети. Вычисляется наихудший случай, связанный с темой и брокером, следующим образом:

$$R(b)_{p \rightarrow s} = \sum R(b, th)_{p \rightarrow s}, \quad (2)$$

где $R(b, th)_{p \rightarrow s}$ – сквозная задержка для брокера b и всех тем th в b .

$$R(b, th)_{p \rightarrow s} = \max(R_{pi \rightarrow b}) + R_b(th) + \max(R_{b \rightarrow sj}), \quad (3)$$

где $R_{pi \rightarrow b}$ – задержка, вызванная сетью передачи между брокером b и всеми взаимодействующими с ним по заданной теме th подписчиками p_i ; $R_b(th)$ – среднее время обработки результатов измерений, собираемых по теме th ; $R_{b \rightarrow sj}$ – задержка между брокером b и всеми его подписчиками s_j .

Кроме того, необходимо учитывать загруженность каждого брокера в существующей конфигурации. В простом случае это определяется количеством обрабатываемых тем:

$$S(b) = |\{th_l \in b\}|, \quad (4)$$

где th_l – темы брокера b , $l = \overline{1, L}$, L – количество тем, операция $|\cdot|$ – мощность множества.

Периодичность поступления данных от издателей указывается в их настройках и зависит от характеристик устройств. Для каждого брокера можно рассчитать P_{pub} – максимальную периодичность поступления данных (период дискретизации данных).

В общем случае брокер распределяет данные по подписчикам с такой же периодичностью, что и происходит их получение. Для того, чтобы сократить объём рассылок, уменьшить нагрузку на каналы связи и на ограниченные ресурсы подписчиков при сохранении адекватности представления процессов, за которыми выполняется мониторинг, необходимо обеспечить режим выдачи данных с частотой их обновления, не превышающей скорость протекания событий [24]. В [25] представлен способ определения периодичности публикации данных. Минимальный период дискретизации, отражающий частоту изменения данных, вычисляется по формуле:

$$P_{\min} = 1/F_{\max}, \quad (5)$$

где F_{\max} – максимальная частота по каждому измерению (температура, влажность), рассчитанная для каждого издателя.

Период дискретизации, учитывающий скорость изменения данных, вычисляется на основе статистики, полученной при имитации критических состояний. Для этого вычисляется максимальная скорость изменения показателей:

$$S_{\max} = \max_k (|x(t_k) - x(t_{k-1})| / \Delta t), \quad (6)$$

где $k = \overline{1, N}$, N – количество наблюдений, $x(t)$ – результат в момент времени t , $\Delta t = (t_k - t_{k-1})$.

Для каждого наблюдаемого показателя в онтологии задана величина его допустимого изменения. Эта информация определяется из эксплуатационных требований к технологическим помещениям (например, скорость изменения влажности не должна превышать 6% в час). Период дискретизации вычисляется на основе полученной скорости протекания процессов:

$$P_S = X_{\min} / S_{\max}, \quad (7)$$

где X_{\min} – величина изменения в единицу времени, S_{\max} – максимальная скорость.

Результирующий период дискретизации определяется из (5) и (7):

$$P_d = \min(P_S, P_{\min}). \quad (8)$$

Полученный период дискретизации устанавливается в настройках брокера.

Характеристика брокера безопасность определяется через количество нелегитимных запросов из различных источников. Брокеры имеют различные варианты настройки (признаки С):

- способы доступа (признак C_A – видимость только из внутренней корпоративной сети или из Интернета);

- аутентификации (признак C_L – с авторизацией или без авторизации);
- признак C_E – наличие или отсутствие шифрования данных.

Пример визуализации статистики обращений для выбранного брокера приведён на рисунке 5, величина метки отражает интенсивность запросов в сутки. Из примера видно, что с некоторых адресов идёт большое число попыток доступа, а некоторые адреса осуществляют такие обращения с выраженной периодичностью, что позволяет выявить характер источника и сравнить по этому параметру брокеры с различными настройками.

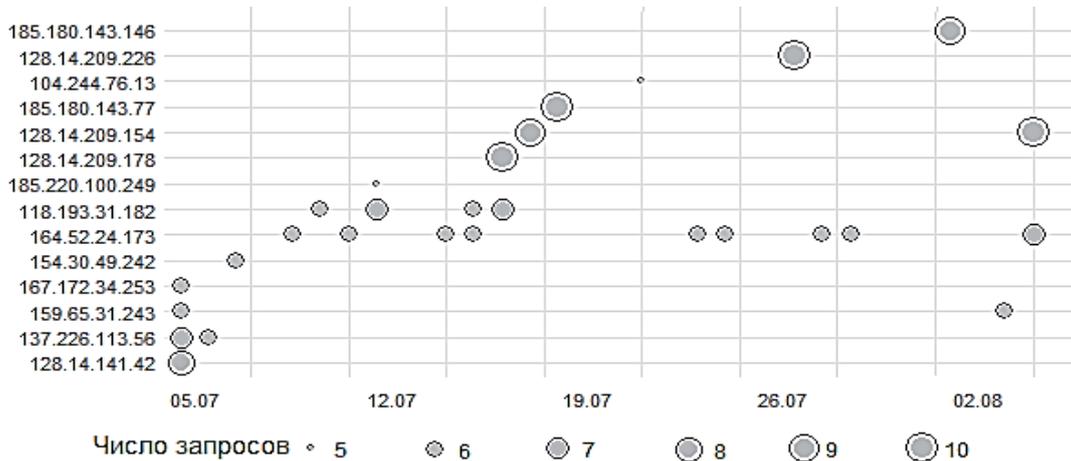


Рисунок 5 – Пример статистики нелегитимных обращений (оси: дата, *ip*-адрес источника обращения)

Выбор данных за разные периоды времени позволяет определять коэффициент безопасности брокера через частоту нелегитимных обращений:

$$F_{IR}(b) = m(b) / M, \quad (9)$$

где $m(b)$ – количество зафиксированных нелегитимных обращений к брокеру b , M – количество внешних запросов.

На выбор брокера может оказывать влияние наличие у него ресурсов, выделенных на хранение данных $Q_S(b)$, и характеристики, такие как быстродействие $Q_W(b)$, возможность обеспечения бесперебойной работы $Q_{Unl}(b)$, наличие альтернативных вариантов подключения к сети $Q_{NC}(b)$, поддержка нескольких протоколов $Q_{Pr}(b)$. Эти показатели могут быть оценены экспертами для каждого брокера.

Для оценки характеристик брокера, наличие или отсутствие которых влияет на его выбор, используется модель пользовательских предпочтений Кано. В настоящий момент применимость модели Кано расширена, и она выведена из сферы потребительской оценки качества производимых товаров в экономические, экологические, организационные области [26].

3 Выбор значимых характеристик оценки *IoT*-сети

Модель Кано позволяет оценивать как объективные так субъективные качества, улучшение которых влияет на экспертный выбор, и используется для того, чтобы получить пользовательский приоритет функций. Объективные качества определяются как необходимые свойства, без которых невозможно выполнение функций брокера. Их выбор основывается на субъективных атрибутах, ценность которых для экспертов сопоставима с объективными качествами.

Для выбора значимых характеристик в соответствии с методом Кано выполнен опрос группы экспертов. В качестве респондентов выбраны специалисты по кибербезопасности, анализу данных и системному администрированию, участвующие в построении *IoT*-сети. Та-

кая выборка оправдана объективной ограниченностью области применимости характеристик, включаемых в онтологию. Категорирование выполняется по следующим вопросам:

- 1) наличие характеристики или положительность её свойства;
- 2) отсутствие характеристики или её отрицательное значение.

Первый тип вопросов называют функциональным, второй – дисфункциональным. На каждый из них выбираются ответы, отражающие отношение к наличию свойства и его отсутствию по следующим вариантам: нравится, ожидаемо, безразлично, допустимо (могу смириться), не нравится. Детально метод Кано описан в работах [22, 26].

Для оценки значимости критериев используется матрица классификации Кано, объединяющая функциональные и дисфункциональные вопросы для приоритизации характеристик. Рассматриваются следующие классы:

- обязательно, должно быть (*Basic requirement, B*);
- желательно, относится к основным свойствам (*One-dimensional requirement, O*);
- дополнительно, влечёт преимущества (*Attractive requirement, A*);
- безразлично (*Indifferent requirement, I*);
- нежелательно, свойство обратно, противоположно (*Reverse requirement, R*);
- сомнительно, противоречиво (*Questionable requirement, Q*).

Распределение приоритетов в матрице классификации приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица классификации Кано

		Дисфункциональные				
		нравится	ожидаемо	безразлично	допустимо	не нравится
Функциональ- ные	нравится	Q	A	A	A	O
	ожидаемо	R	Q	I	I	B
	безразлично	R	I	I	I	B
	допустимо	R	I	I	Q	B
	не нравится	R	R	R	R	Q

Перечень характеристик, которые были предложены экспертам для проведения оценивания, и результат классификации приведены в таблице 2. Полученные классы сгруппированы для каждой характеристики и выбрана основная категория, набравшая наибольшее число голосов. В результате категорирования характеристикам присвоены весовые коэффициенты, определяющие принадлежность к каждому из классов.

Часть характеристик попала в категорию I, они либо пересекались с другими параметрами, влияние которых эксперты оценили как существенное (классы B, O, A, R), либо их наличие или отсутствие не оказывало влияние на выбор экспертов. Характеристики, имеющие противоречивую оценку, отнесены к классу Q и их значимость для данной задачи выбора оценена как сомнительная. Обязательные B, желательные O, дополнительные A и нежелательные R характеристики необходимо учитывать с различными (заданными в таблице) весовыми коэффициентами. Эта информация используется для построения комплексной оценки брокера.

Для реинжиниринга функционирующей сети или добавления в схему нового издателя или подписчика рекомендуется выбирать брокера, имеющего лучшие показатели времени обработки данных ($\min R_b$), обеспечивающего минимальную сквозную задержку ($\min R_{p \rightarrow s}$), с небольшим числом нелегитимных обращений ($\min F_{IR}$), имеющего бо́льший выделенный ресурс ($\max Q_s$). К факторам, которые не имеют критического значения при выборе, но их наличие даёт потенциальные преимущества, относятся характеристики, свидетельствующие о загруженности брокеров, и признаки настройки политик безопасности. Наличие характери-

стик: скорость изменения данных ($\min S_{max}$), период их выдачи ($\max P_d$), поддержка аутентификации (C_L) и шифрования (C_E) могут оказать преимущества при выборе конкретной реализации схемы информационного взаимодействия.

Таблица 2 – Результат классификации характеристик

№	Наименование характеристики (свойства, признака)	Обозначение	Класс	Результат
1.	Задержка от издателя до брокера	$R_{p \rightarrow b}$	I	0
2.	Задержка от брокера до подписчика	$R_{b \rightarrow s}$	I	0
3.	Время обработки данных брокером	R_b	R	-2
4.	Сквозная задержка	$R_{p \rightarrow s}$	R	-2
5.	Количество тем	S	I	0
6.	Скорость изменения данных	S_{max}	A	1
7.	Частота изменения данных	P_{min}	I	0
8.	Период поступления данных	P_{pub}	I	0
9.	Период выдачи данных	P_d	A	1
10.	Частота нелегитимных обращений	F_{IR}	R	-2
11.	Выделенный ресурс	Q_S	B	2
12.	Оценка быстродействия	Q_W	I	0
13.	Обеспечение бесперебойной работы	Q_{Unl}	O	0,5
14.	Наличие альтернативных способов подключения	Q_{NC}	Q	0
15.	Поддержка нескольких протоколов	Q_{Pr}	Q	0
16.	Обеспечение внешнего доступа	C_A	I	0
17.	Поддержка аутентификации	C_L	A	1
18.	Признак шифрования	C_E	O	0,5

Заключение

Проведённое исследование позволило формализовать описание сети Интернета вещей, функционирующей в Красноярском научном центре СО РАН. В построенной онтологии объединены обобщённые понятия Про и характеристики, связанные с реализацией *IoT*-сети. Описана архитектура сети и схема информационного взаимодействия «издатель-подписчик» при различных настройках политик безопасности брокеров данных. Онтология консолидирует знания и представляет объекты, экземпляры объектов, свойства данных: диапазоны их изменения, граничные условия, статистические характеристики, показатели периодичности процессов, контролируемых датчиками; свойства элементов сети - критерии сетевой активности и выделенные ресурсы на хранение и обработку данных. Каждый из экземпляров объектов имеет своё цифровое представление в базах данных.

Выполнена систематизация характеристик *IoT*-сети и экспертный анализ их влияния на выбор брокеров, оказывающих услуги по получению данных от издателей и распределению их подписчикам. Показано, что для реинжиниринга сети и настройки брокеров следует учитывать не только статистику сетевых журналов, но и характеристики, получаемые из анализа наблюдаемых *IoT*-устройствами процессов. Это важно, поскольку устройства Интернета вещей имеют ограниченные возможности по энергопотреблению, использованию памяти, пропускной способности и контролю безопасности. Выбор связанных характеристик, необходимых для расчёта, выполняется запросами в онтологии.

Собранная статистика по брокерам с различными настройками безопасности, типами и источниками нелегитимных обращений, а также прецедентами типичного и аномального поведения может быть учтена не только при выборе брокера, но и при его настройке. Например, используя характеристики, полученные в результате анализа наблюдаемых процессов и

выбора периода выдачи данных, учитывающего скорость их изменения, объём передаваемых данных сокращается без потери сведений о динамике событий. Такой подход применим для настройки энергонезависимых издателей, где снижение частоты передачи данных приведёт к увеличению времени их автономной работы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] *Internet of Things Global Standards Initiative* [Электронный ресурс]. <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>.
- [2] **Росляков А.В., Ваняшин С.В., Гребешков А.Ю.** Интернет вещей. Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. 200 с.
- [3] **Лоднева, О.Н., Ромасевич Е.П.** Анализ трафика устройств Интернета вещей. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2018. Т.14, №1. С.149-169. DOI: 10.25559/SITITO.14.201801.149-169.
- [4] **Javed A., Heljanko K., Buda A., Främling K.** CEFIoT: A Fault-Tolerant IoT Architecture for Edge and Cloud // 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things. 2018. P. 813-818. DOI: 10.1109/WF-IoT.2018.8355149.
- [5] **Haripriya A., Kulothungan K.** Secure-MQTT: An efficient fuzzy logic-based approach to detect dos attack in MQTT protocol for Internet of Things. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2019, N90. DOI: 10.1186/s13638-019-1402-8.
- [6] **Cook A.A., Mısırlı G., Fan Z.** Anomaly detection for IoT time-series data: a survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7. P.6481-6494. DOI:10.1109/JIOT.2019.2958185.
- [7] **Vaccari I., Chiola G., Aiello M., Mongelli M.** MQTTset, a New Dataset for Machine Learning Techniques on MQTT. *Sensors*. 2020. Vol. 20(22). P.6578. DOI: 10.3390/s20226578.
- [8] **Isaev S.V., Kononov D.D.** Analysis of the dynamics of Internet threats for corporate network web services. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. Vol. 3047. P.71-78.
- [9] **Кононов Д.Д., Исаев С.В.** Анализ киберугроз корпоративной сети на основе параллельной обработки данных Netflow. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2023. Т. 24, № 4. С.663-672. DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-663-672.
- [10] **Bhattacharyya D.K., Kalita J.K.** Network anomaly detection: A machine learning perspective. Boca Raton: CRC Press, 2013. 376 p.
- [11] **Nassif A.B., Talib M.A., Nasir Q., Dakalbab F.M.** Machine learning for anomaly detection: A systematic review. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P.78658-78700. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3083060.
- [12] **Omar S., Ngadi A., Jebur H.** Machine learning techniques for anomaly detection: an overview. *International Journal of Computer Applications*. 2013. Vol.79(2). P.32-41. DOI: 10.5120/13715-1478.
- [13] **Микони С.В.** Методика построения многоуровневой модели оценивания сложного объекта. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12(3). С.380-392. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-3-380-392.
- [14] **Мусеев А.** Онтологии в информационной безопасности [Электронный ресурс]. <https://www.kaspersky.ru/blog/cybersecurity-ontology/30977>.
- [15] **Куликов И.А., Жукова Н.А.** Интеграция телекоммуникационных сетей в системе мониторинга с использованием доменных онтологий. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12(3). С.353-366. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-3-353-366.
- [16] **Исаева О.С., Кулясов Н.В., Исаев С.В.** Создание инструментов сбора данных для анализа аспектов безопасности Интернета вещей. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2022. № 3(27). С.113-125. DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.011.
- [17] **Vigo M., Matentzoglou N., Jay C., Stevens R.** Comparing ontology authoring workflows with Protégé: In the laboratory, in the tutorial and in the 'wild'. *Journal of Web Semantics*. 2019. Vol. 57(12). DOI: 10.1016/j.websem.2018.09.004.
- [18] **Dizdarević J., Carpio F., Jukan A., Masip-Bruin X.** A Survey of communication protocols for Internet of Things and related challenges of fog and cloud computing integration. *ACM Computing Surveys*. 2019. Vol. 51(6). P.1-29. DOI: 10.1145/3292674.
- [19] **Munshi A.** Improved MQTT secure transmission flags in smart homes. *Sensors*. 2022. Vol. 22(6). P.2-15. DOI: 10.3390/s22062174.
- [20] Eclipse Mosquitto. An open source MQTT broker [Электронный ресурс]. <https://mosquitto.org>.
- [21] **Татаринов В.И., Комашинский В.И., Иванов А.Ю.** Маршрутизация в гибридных самоорганизующихся беспроводных сетях связи пятого поколения. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023. № 3. С.283-290. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-283-290.

- [22] *Marutschke M., Hayashi Y.* Kano model-based macro and micro shift in feature perception of short-term online courses. *Collaboration Technologies and Social Computing*, 2022. P.112-125. DOI: 10.1007/978-3-031-20218-6_8.
- [23] *Hmissi F., Ouni S.* An MQTT brokers distribution based on mist computing for real-time IoT communications. July 2021. [Preprint]. DOI: 10.21203/rs.3.rs-695717/v1.
- [24] *Исаева О.С., Исаев С.В., Кулясов Н.В.* Формирование адаптивных рассылок брокера данных Интернета вещей. *Информационно-управляющие системы*. 2022. Т. 5, Вып. 120. С. 23-31. DOI: 10.31799/1684-8853-2022-5-23-31.
- [25] *Исаева О.С.* Построение цифрового профиля устройств Интернета вещей. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2023. № 2(30). С. 36-44. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.004.
- [26] *Николаева Н.Г., Исмаилова Р.Н.* Модель Н. Кано: выбор направлений развития испытательной лаборатории. *Компетентность*. 2021. №1. С. 44-51. DOI: 10.24411/1993-8780-2021-10107.

Сведения об авторе

Исаева Ольга Сергеевна, 1976 г. рождения. Окончила Красноярский государственный университет в 1998 г., д.т.н. (2022). Старший научный сотрудник отдела вычислительной механики деформируемых сред Института вычислительного моделирования СО РАН. В списке научных трудов около 100 работ в области ИИ и анализа данных. ORCID: 0000-0002-5061-6765; Author ID (Scopus): 57200530407; Author ID (РИНЦ): 165828. isaeva@icm.krasn.ru



Поступила в редакцию 22.04.2024, после рецензирования 22.05.2024. Принята к публикации 7.06.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-243-255

Building an ontology to systematize the characteristics of the Internet of Things network

© 2024, O.S. Isaeva

Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Abstract

A formalization of the Internet of Things network model designed for monitoring technological premises with telecommunications equipment at the Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS" is presented. The network includes measuring devices, a telecommunications environment, data collection servers, and application software. For information interaction, a "publisher-subscriber" scheme and a lightweight protocol with a low load on communication channels are used. An ontology has been created that describes the network architecture and the properties of devices that collect, transmit, store, and process data. The ontology contains classes representing the concepts of the subject area, relationships, data properties, ranges of their changes, and critical values that limit the attributes of ontology elements. Ontology objects have their own digital representation in databases, including measurement results obtained by Internet of Things network sensors, precedents of anomalous data, and their statistical and frequency characteristics. This formalization made it possible to identify implicit dependencies between objects, connect them with the characteristics of processes observed by Internet of Things network devices, and solve practical tasks. The problem of selecting characteristics that influence changes in information interaction patterns is considered. A survey of experts

was carried out, and a Kano model was built to prioritize the characteristics that influence decision-making on the organization of an information interaction scheme in the Internet of Things network.

Keywords: *Internet of Things, publisher, broker, subscriber, ontology, delay analysis, frequency analysis, Kano model, network reengineering.*

Citation: *Isaeva O.S.* Building an ontology to systematize the characteristics of the Internet of Things network [In Russian]. *Ontology of designing.* 2024; 14(2): 243-255. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-243-255.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and table

Figure 1 - Hierarchical structure of classes

Figure 2 - A fragment of a graphical representation of classes in ontology

Figure 3 - A fragment of a graphical representation of class instances

Figure 4 - Selection of brokers for a given topic

Figure 5 - Statistics of illegitimate requests (axes: date, IP-address of the source of the request)

Table 1 - Kano classification matrix

Table 2 - Characteristic classification result

References

- [1] Internet of Things Global Standards Initiative. <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>.
- [2] **Roslyakov AV, Vanyashin SV, Grebeskov AYu.** Internet of things [In Russian]. Samara: PGUTI; 2015. 200 p.
- [3] **Lodneva ON, Romasevich EP.** Analysis of devices traffic of the Internet of Things [In Russian]. *Modern Information Technologies and IT-Education.* 2018; 14(1): 149-169. DOI: 10.25559/SITITO.14.201801.149-169.
- [4] **Javed A, Javed A, Heljanko K, Buda A, Främling K.** CEFIoT: A Fault-Tolerant IoT Architecture for Edge and Cloud // Proc. of IEEE World Forum on Internet of Things. 2018. P. 813-818. DOI: 10.1109/WF-IoT.2018.8355149.
- [5] **Haripriya A, Kulothungan K.** Secure-MQTT: An efficient fuzzy logic-based approach to detect dos attack in MQTT protocol for Internet of Things. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.* 2019; 90. DOI: 10.1186/s13638-019-1402-8.
- [6] **Cook AA, Misrlh G, Fan Z.** Anomaly detection for IoT time-series data: a survey. *IEEE Internet of Things Journal.* 2020; 7: 6481-6494. DOI:10.1109/JIOT.2019.2958185.
- [7] **Vaccari I, Chiola G, Aiello M, Mongelli M.** MQTTset, a New Dataset for Machine Learning Techniques on MQTT. *Sensors.* 2020; 20(22): 6578. DOI: 10.3390/s20226578.
- [8] **Isaev SV, Kononov DD.** Analysis of the dynamics of Internet threats for corporate network web services. *CEUR Workshop Proceedings.* 2021; 3047: 71-78.
- [9] **Kononov DD, Isaev SV.** Analysis of corporate network cyber threats based on parallel processing of Netflow data. [In Russian]. *Siberian Aerospace Journal.* 2023; 24(4): 663-672. DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-663-672.
- [10] **Bhattacharyya DK, Kalita JK.** Network anomaly detection: A machine learning perspective. Boca Raton: CRC Press, 2013. 376 p.
- [11] **Nassif AB, Talib MA, Nasir Q, Dakalbab FM.** Machine learning for anomaly detection: A systematic review. *IEEE Access.* 2021; 9: 78658-78700. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3083060.
- [12] **Omar S, Ngadi A, Jebur H.** Machine learning techniques for anomaly detection: an overview. *International Journal of Computer Applications.* 2013; 79(2): 32-41. DOI: 10.5120/13715-1478.
- [13] **Mikoni SV.** Methodology for creating a multi-level model for evaluating a complex object [In Russian]. *Ontology of designing.* 2022; 12(3): 380-392. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-3-380-392.
- [14] **Moiseev A.** Ontologies in information security [In Russian]. <https://www.kaspersky.ru/blog/cybersecurity-ontology/30977/>.
- [15] **Kulikov IA, Zhukova NA.** Integration of telecommunication networks in a monitoring system using domain ontologies [In Russian]. *Ontology of designing.* 2022; 12(3): 353-366. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-3-353-366.
- [16] **Isaeva OS, Kulyasov NV, Isaev SV.** Creating data collection tools to analyze security aspects of Internet of Things [In Russian]. *Information and mathematical technologies in science and management.* 2022; 3(27): 113-125. DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.011.

-
- [17] **Vigo M, Matentzoglou N, Jay C, Stevens R.** Comparing ontology authoring workflows with Protégé: In the laboratory, in the tutorial and in the ‘wild’. *Journal of Web Semantics*. 2019; 57(12). DOI: 10.1016/j.websem.2018.09.004.
- [18] **Dizdarević J, Carpio F, Jukan A, Masip-Bruin X.** A Survey of communication protocols for Internet of Things and related challenges of fog and cloud computing integration. *ACM Computing Surveys*. 2019; 51(6): 1-29. DOI: 10.1145/3292674
- [19] **Munshi A.** Improved MQTT secure transmission flags in smart homes. *Sensors*. 2022; 22(6): 2-15. DOI: 10.3390/s22062174.
- [20] Eclipse Mosquitto. An open source MQTT broker. <http://mosquitto.org>.
- [21] **Tatarinov VI, Komashinsky VI, Ivanov AY.** Routing in hybrid self-organizing wireless communication networks of the fifth generation [In Russian]. News of Tula State University. *Technical science*. 2023; 3: 283-290. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-283-290.
- [22] **Marutschke DM, Hayashi Y.** Kano model based macro and micro shift in feature perception of short-term online courses. *Collaboration Technologies and Social Computing*. 2022; 112-125. DOI: 10.1007/978-3-031-20218-6_8.
- [23] **Hmissi F, Ouni S.** An MQTT brokers distribution based on mist computing for real-time IoT communications. July 2021. [Preprint]. DOI: 10.21203/rs.3.rs-695717/v1.
- [24] **Isaeva OS, Isaev SV, Kulyasov NV.** Formation of adaptive publications from the Internet of things data broker. [In Russian]. *Information and Control Systems*. 2022; 5(120): 23-31. DOI: 10.31799/1684-8853-2022-5-23-31.
- [25] **Isaeva OS.** Building a digital profile of IoT devices [In Russian]. *Information and mathematical technologies in science and management*. 2023; 2(30): 36-44. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.004.
- [26] **Nikolaeva NG, Ismailova RN.** Model N. Kano: selection of directions for development of a testing laboratory [In Russian]. *Competency*. 2021; 1: 44-51. DOI: 10.24411/1993-8780-2021-10107.
-

About the author

Olga Sergeevna Isaeva (b. 1976) graduated from the Krasnoyarsk State University in 1998, Doctor of Technical Sciences (2022). Senior researcher at the Department of Computational mechanics of deformable media at the Institute of Computational Modelling SB RAS. The list of scientific papers includes about 100 articles in the field of AI and data analysis. ORCID: 0000-0002-5061-6765; Author ID (Scopus): 57200530407; Author ID (RSCI): 165828. isaeva@icm.krasn.ru

Received April 22, 2024, Revised May 22, 2024. Accepted June 7, 2024.

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 004.89

Обзорная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-256-269



Подходы к автоматизации работ с онтологическими ресурсами¹

© 2024, М.А. Шишенков

ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия

Аннотация

Онтологические модели находят широкое применение в системах информационного обеспечения, предоставляющих информационные ресурсы и услуги для решения управленческих, проектных и научно-технических задач. В частности, применение онтологий предметных областей распространено в системах поддержки принятия решений. При онтологическом моделировании сложных систем возникает потребность в автоматизации процессов работы с онтологическими ресурсами. В работе рассмотрены основные программные комплексы и методологии онтологического моделирования, подходы к автоматизации процессов создания, наполнения и использования онтологических моделей, отражения темпорального аспекта онтологического представления объектов. Цель работы состоит в рассмотрении методов автоматизации жизненного цикла онтологических ресурсов и анализе степени их адаптации в прикладных онтологиях. Отмечены относительно высокая степень автоматизации работы с онтологическими ресурсами в процессе наполнения онтологии и использование больших языковых моделей в данном процессе. Указано на недостаток описания методик автоматизации процессов конвертации информации из таблиц и схем в онтологические модели, валидации наполнения модели и её переработки. Показаны перспективные направления автоматизации работы с онтологическими ресурсами.

Ключевые слова: онтологические модели, онтологические ресурсы, база знаний, автоматизация, информационное обеспечение, большие языковые модели.

Цитирование: Шишенков М.А. Подходы к автоматизации работ с онтологическими ресурсами // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С.256-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-256-269.

Благодарности: автор выражает благодарность заведующему кафедрой автоматизации технологических процессов РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина д.т.н., доценту И.В. Самарину за побуждение к написанию статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Онтологические модели (ОМ), т.е. модели семантического описания, опирающиеся на математический аппарат дескрипционной логики, находят широкое применение как средство представления знаний предметной области (ПрО), автоматизированной проверки согласованности этих знаний, моделирования сложных структур и выявления недостающих концептов в описании ПрО [1]. На основе ОМ разрабатываются системы информационного обеспечения, в частности системы поддержки принятия решений (СППР).

¹ Тема, обсуждаемая в статье, вызвала дискуссию в редколлегии, связанную с полнотой и качеством обзора работ в области онтологического инжиниринга. Но интерес к подобным вопросам и смелость молодого автора, взявшегося за сложную работу по структуризации накопленных знаний, побудили редакцию предложить читателям журнала продолжить начатую дискуссию с надеждой на развитие и раскрытие затронутой темы. Ждём отклики и новые работы в этой области. *Прим. ред.*

Информационное обеспечение (ИО) в данной статье понимается как совокупность информационных ресурсов и услуг, предоставляемых для решения управленческих, творческих и научно-технических задач в соответствии с этапами их выполнения [2]. Создание ОМ сложных систем требует взаимодействия экспертов в ПрО, администраторов баз знаний (БЗ) и данных (БД), разработчиков онтологий и лиц, принимающих решения [3]. Этот процесс трудоёмкий, выполняется «вручную» и подвержен влиянию человеческого фактора, что отражается на качестве ИО.

Целью данной статьи является рассмотрение подходов к автоматизации работ с ОМ на различных этапах их жизненного цикла (ЖЦ) и оценка степени внедрения указанных подходов в экспертных системах (ЭС). Внедрение инструментов автоматизации работы с онтологиями в различных ПрО рассмотрено на широком спектре ЭС, фреймворков и подходов.

1 Фреймворки онтологического моделирования

ОМ являются ответом на вызовы Индустрии 4.0. В работе [1] представлен перечень онтологических фреймворков, разработанных для описания ПрО промышленности. Приведены характеристики стандартов, устанавливающих онтологии верхнего уровня в области робототехники. При построении ОМ распространено применение стандартов W3C².

Перспективы применения ОМ в процессах обеспечения повторного использования системной информации, повышения качества информационного поиска, обеспечения взаимодействия объектов информационной инфраструктуры, управления контекстами искусственного интеллекта (ИИ) и моделирования процессов рассмотрены в статье [4]. Отмечена необходимость разработки системы дополненного интеллекта, совмещающей взаимодействие с человеком ЭС и систем автономного оптимального управления.

Взаимодействие нейросетевых моделей с ОМ – БЗ (*T-box*) и БД (*A-box*) – описано в статье [3]. Рассмотрен спектр технологий ИИ от статистических до символьных моделей, описана степень их применимости в системах усовершенствованного интеллекта. Перспективной представлена автоматизация работы с БЗ при помощи больших языковых моделей (*Large Language Model – LLM*).

При работе с онтологическими ресурсами (ОР), т.е. с БД и БЗ, применяются различные фреймворки. Широкое распространение в исследованиях имеет свободно распространяемый редактор онтологий *Protégé* [5]. В России распространена облачная онтологическая платформа *IACPaaS* [6]. В промышленных проектах могут применяться проприетарные онтологические платформы³.

Разработка больших ОМ может вестись коллективно. Процесс совместной разработки онтологий поддерживается платформой *IACPaaS* и редактором *Web Protégé* [7]. Данный подход позволяет повысить качество ОМ за счёт согласования экспертных оценок.

Онтологии могут разрабатываться автономно, однако такой подход сопряжён с необходимостью согласования ОР [8]. Интеграция нескольких онтологий основана на принципах алгебры множеств, позволяет вести разработку онтологий с опорой на имеющиеся модели. При создании, согласовании и обеспечении совместимости ОР различных ПрО рекомендуется применять метаонтологии. К числу известных метаонтологий можно отнести *BFO*, *Dolce*, *gUFO*⁴ [9].

² Спецификации W3C. [https://www.w3.org/TR/?tags\[0\]=data](https://www.w3.org/TR/?tags[0]=data).

³ Онтологические платформы: Онтологик (<http://www.ontologic.ru/>); Архиграф (<https://arhigraph.ru/>); OCA (<https://tas-project.ru/index.html>); Онто (<https://ontonet.ru/>).

⁴ Метаонтологии: *BFO* (*Basic Formal Ontology*, https://en.m.wikipedia.org/wiki/Basic_Formal_Ontology); *Dolce* (<https://www.loa.istc.cnr.it/dolce/overview.html>); *gUFO* (<https://nemo-ufes.github.io/gufo/>).

Разработка и взаимодействие с ОМ может вестись в рамках объектно-ориентированного подхода (ООП) с использованием библиотек языка Python – *Rdflib*⁵ и *Owlready2* [10]. Использование языков программирования упрощает интеграцию ОМ и LLM, позволяет вести разработку средств извлечения онтологически значимой информации из неструктурированных документов, приложений-сервисов формирования ИО из ОМ.

2 Отражение темпоральности и ЖЦ в онтологиях

Для применения ОМ в целях описания ЖЦ оборудования и систем *необходим учёт темпорального аспекта рассматриваемых объектов* за счёт расширения аппарата онтологического описания.

Структура БЗ для описания процессов ЖЦ представлена в статье [11], в которой *указаны преимущества от внедрения ОМ в бизнес-процессы на различных стадиях ЖЦ*, приведён базовый перечень концептов и ролей, описывающих объекты и их отношения на различных стадиях ЖЦ. В работе не рассмотрена структура концептов и ролей, позволяющая учитывать темпоральный аспект рассмотрения объекта.

ГОСТ ИСО 15926⁶ утверждает модель описания ЖЦ объектов нефтегазовой отрасли в рамках стандартов *W3C*. На данный момент *стандарт не содержит описание процесса создания онтологий, учитывающих ЖЦ*, но предоставляет модель данных, методологию составления шаблонов оборудования и описания темпорального аспекта ресурсов.

В работе [12] приведён подход к описанию объекта на стадиях ЖЦ и *предложена реализация темпорального аспекта рассмотрения объекта через онтологию времени*, импортируемую в онтологию ЖЦ из *common core ontologies (CCO)*⁷. CCO представляет набор онтологий, расширяющих метаонтологию *BFO* распространёнными понятиями ПрО, и может быть использована для описания процессов, объектов и их параметров, а также их взаимодействие на различных стадиях ЖЦ.

Подход к отражению темпоральных данных, выраженных в относительной или нечёткой форме, без меток времени, представлен в статье [13]. Применён математический аппарат интервальной алгебры Джеймса Аллена и байесовских сетей для сравнения и упорядочивания информации о временных областях событий с использованием машины логического вывода. Данное решение может быть полезно для описания процессов на ранних стадиях ЖЦ, когда сроки процессов не могут быть определены достоверно.

3 Теоретические основы автоматизации работ с онтологиями

3.1 Автоматизация создания онтологий

ЖЦ ОР можно представить как последовательность операций по постановке вопросов компетенций, разработке, утверждению, рефакторингу и уточнению *T-box* и *A-box* модели, запросов к ОМ. Схема ЖЦ ОР представлена на рисунке 1.

Подход к автоматизированному составлению T-box ОМ представлен в статье [14]. Приведены примеры применения различных LLM и моделей векторизации в процессах определения терминов из корпусов структурированной информации, построения их таксономии.

⁵ Библиотека для работы с онтологиями *Rdflib* (<https://github.com/RDFLib/>).

⁶ ГОСТ Р ИСО 15926-2-2010. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Интеграция данных жизненного цикла для перерабатывающих предприятий, включая нефтяные и газовые производственные предприятия. Часть 2. Модель данных. М.: Стандартинформ, 2010. 253 с.

⁷ Онтологии среднего уровня на основе *BFO Common Core* [Электронный ресурс]. <https://github.com/CommonCoreOntology/CommonCoreOntologies-ontologyrepository.com>.

Рассматривается извлечение БЗ, заложенных в *LLM* на этапе её обучения (подстройки модели по тестовой выборке), путём составления запросов на естественном языке (ЕЯ). Процесс формирования онтологии с использованием *LLM* представлен в статье как последовательность обучения *LLM* на большом корпусе БЗ ПрО и последующих запросах, уточняющих основные концепты и таксономию корпуса.

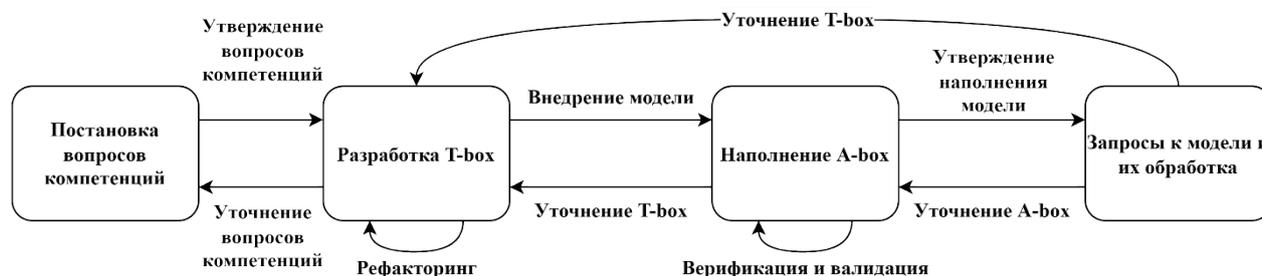


Рисунок 1 – Жизненный цикл онтологического ресурса

Процесс построения онтологии научной ПрО на основе текстов на ЕЯ может быть автоматизирован за счёт применения шаблонов онтологического проектирования [15]. Предложен набор онтологических шаблонов, отражающих основные понятия научных ПрО, используемых для наполнения данными, автоматически извлекаемыми из текстов на ЕЯ. Предложен комплекс систем *KLAN*, *PatTerm* и *FATON* для извлечения метаинформации из текстов на основе лексико-семантических паттернов, которые формируются на основе паттернов онтологического проектирования, разработанных на основе библиотеки онтологических признаков.

3.2 Автоматизация наполнения онтологии

В обзорной статье [16] рассмотрен процесс наполнения *A-box* *OM* из гетерогенных документов. Отмечена необходимость использования инструментов анализа информации документов для её автоматизированного внесения в онтологию. Приведён перечень вопросов, определяющих выбор инструментов извлечения информации.

- Каков уровень автоматизации наполнения онтологии?
- Какие виды входных документов используются в системе?
- Являются ли инструменты извлечения информации специфическими для ПрО?
- Какие виды концептов и ролей могут быть извлечены рассматриваемыми инструментами?
- Какие правила проверки применяются для извлечённой информации?

В статье приведено сравнение инструментов автоматизированного наполнения *OM* (*Hearst*, *Arequakt*, *WordNet*, *Adaptive*, *ISOLDE* и др.).

Отмечена высокая точность автоматического наполнения *OM* при использовании специфических для рассматриваемых ПрО инструментов извлечения информации из гетерогенных документов, малое число инструментов, работающих с метаонтологиями, частое использование *Wikipedia* как источника знаний и отсутствие подходов к тестированию систем автоматизированного наполнения для больших онтологий.

В работе [17] представлен подход к автоматизированному наполнению *A-box* *OM*, разработанной в *Protégé*, из двумерных чертежей с использованием САПР *OntoCAD*. *OntoCAD* использует разработанный *Autodesk* формат *DXF* и парсер *FreeCAD*. САПР поддерживает загрузку файла онтологии в формате *OWL* для классификации объектов *A-box*, свойства объектов определяются их геометрией и взаимным расположением на рабочем пространстве.

Подход к использованию лексико-синтаксических шаблонов для автоматизации наполнения онтологий представлен в работе [18]. Показано применение сформированных вручную онтологических шаблонов-грамматик для автоматического наполнения онтологии данными корпусов текстов. Данные для наполнения онтологии формируются в результате анализа морфологическим парсером структурированного текста на ЕЯ. Разработано общедоступное программное обеспечение (ПО), реализующее разработанный метод⁸.

На основании рассмотренных подходов сформирована концептуальная схема процесса наполнения онтологии и применяемых в нём инструментов (см. рисунок 2).



Рисунок 2 – Процесс автоматизации формирования *A-box* модели и применяемые в нём инструменты

3.3 Автоматизация обработки запросов к ОМ

В статье [19] показано использование *ОМ* в целях генерации *ПО* из набора функциональных блоков. Выделены общие черты онтологического подхода с подходами генеративного программирования. Функциональные блоки *ПО* формируются из согласованной системы онтологических паттернов и внутренних спецификаций.

Формирование *SPARQL* запросов к *БЗ* с использованием *LLM* представлено в работе [20]. Рассмотрено применение модели векторизации предложений *BERT*, шаблонов *SPARQL* запросов и свободно-распространяемой модели *Vicuna-13B*. Показано достижение *F1*-меры точности 99% при составлении запросов к тестовой выборке *SciQA*. Предложено использование представленного подхода для анализа графовых БД, таких как *Wikidata*.

Подход, использующий *LLM* в работе с *ОР*, представлен в статье [21]. Рассмотрено использование плагина к редактору онтологий *Protégé*, позволяющего задействовать запросы к *LLM GPT-3* для перевода предложений на *ЕЯ* в набор выражений в функциональном син-

⁸ Репозиторий с программным обеспечением «*Ontology Extender*». <https://github.com/WInterFox/OntologyExtender>.

таксисе OWL. Использование данного инструмента показано как перспективное для автоматизированного анализа документов, написанных в декларативной форме (нормативная документация и технические задания).

4 Применение онтологий в системах ИО

Для оценки подходов к автоматизации работ с ОР рассмотрены работы по созданию систем ИО на основе онтологий.

Статья [22] посвящена применению онтологического подхода для описания слабо формализованной информации об объектах топливно-энергетического комплекса на примере системы подготовки газа. Представлена разработанная система поддержки концептуального проектирования. *Приведены подходы для описания таксономии, партномии, процессной модели, модели требований.* Учтена возможность создания матрицы ролей для моделирования доступа к ОМ. Расчётные модели находятся вне БЗ, также как и модули оптимизации результатов. В работе применяется ПО построения диаграмм *draw.io*, *Python* и БД для формирования полного цикла разработки конфигураций оборудования для комплексной подготовки газа. Подход апробирован на одном из газовых месторождений «Газпром Нефть», *отмечено снижение трудоёмкости проектных работ.*

В работе [23] рассмотрено использование онтологического подхода для разработки СППР для исследований *HAZOP* (от англ. *HAZard and OPerability*, опасность и работоспособность). Представлены правила логического вывода, применяемые в процессе обнаружения угроз. Приведён примере полуавтоматического определения угроз при хранении гексогена. Не автоматизируется экспертное определение и занесение в модель информации о проводимых операциях, доступном измерительном оборудовании, внешних угрозах. *Качество и полнота модели зависят от качества и полноты описания объекта и процессов в форме связанных концептов семантической сети.* Отмечена высокая вычислительная сложность модели в случаях избыточной детализации описания объектов и процессов.

Статья [24] посвящена использованию ОМ в системе обеспечения безопасного строительства и реновации в рамках подхода *Building Information Modelling (BIM)*. Предложена ОМ угроз жизни и здоровью в процессе реновации зданий, реализованная на *UML* и средствах *Protégé API*. *ОМ позволяет выявлять группы угроз здоровью в процессе реновации исходя из модели объекта реновации и используемых правил логического вывода.* Предоставление информации пользователю осуществляется через *GUI*.

В работе [25] рассмотрены вопросы валидации и верификации ПО посредством применения тестирующих онтологий. Представлен систематический подход к построению онтологии тестирования ПО, перечислены вопросы компетенций, на которые должна отвечать заданная онтология. *Предложено использовать онтологии в качестве БЗ и средства документирования процесса тестирования.*

В статье [26] рассмотрено применение аппарата онтологического описания в целях консолидации экспертных знаний об объектах и процессах перерабатывающей промышленности. Представлена схема функциональной архитектуры фреймворка онтологического описания объектов. Описано взаимодействие пользователя и эксперта с рассматриваемым фреймворком. *Представлен аппарат визуализации знаний в виде Р-графов, широко применяемых в перерабатывающей отрасли.* Применение онтологии рассмотрено на примерах установки производства этилена и типового химического процесса. Наполнение модели осуществляется вручную с опорой на модель данных *ISO 15926*.

В статье [27] представлено создание системы поддержки построения доказательств с использованием инструментов платформы онтологического моделирования *IACPaas*. *Реализованы такие компоненты системы как редактор базы математических знаний, редактор модели онтологии базы математических знаний, редактор базы способов рассуждений, итеративный верификатор доказательств и интерфейс пользователя.* В работе подразумевается ручной метод наполнения онтологии.

Работа [28] посвящена использованию ОМ *MOODY*, разрабатываемой в редакторе *Protégé*, для описания эволюционных алгоритмов и мультиобъектной оптимизации. *Описан процесс построения онтологии автоматического создания конфигураций эволюционных алгоритмов, их экспорта во внешние системы.*

В работе [29] рассмотрено построение онтологий для автоматизации процессов проектирования трубопроводных систем энергетики. *Предложен подход к разработке комплексной системы ОР, включающей метаонтологию, онтологию ПрО, онтологии задач, онтологии ПО.* ОМ являются средством запроса информации из БД, системой обработки и структурирования информации, средством автоматического решения задач ПрО. Применение представленной методологии показано на примере оптимизации диаметров трубопроводов.

Подход к онтологическому описанию при создании цифровых двойников систем энергетики представлен в работах [30, 31]. Рассмотрено применение цифровых объектов топливно-энергетического комплекса в задачах прогнозирования, этапы построения модели цифрового объекта.

Подход к онтологическому описанию сложной организационно-технической системы управления показан в работе [32]. *Представляется полезным совмещение организационных онтологий, построенных с использованием данного подхода, и онтологий технологических процессов, рассмотренных в других работах.* Подобный синтез моделей позволит сформировать более полную модель рассматриваемой ПрО.

В статье [33] показано применение онтологического подхода в процессе разработке интеллектуальных СППР (ИСППР). *На языке дескрипционной логики приведены перечни применяемых для разработки ИСППР технологий, принципов и подходов.* Представлена архитектура типовой ИСППР.

В работе [34] показано использование онтологического подхода для создания СППР диагностики заболеваний и синдромов. Для разработки использованы средства облачной платформы *IACPaaS*. *Представленная онтология позволяет автоматизированным образом формировать знания о диагностике заболеваний в зависимости от их классификации.*

Применение ОМ в создании *ВМ*-систем рассмотрено в работе [35]. *Предложена архитектура СППР, состоящей из ОМ, БД и метаданных об объектах строительства, пользовательского интерфейса формирования рекомендаций.* Предлагается ПО с использованием технологий *SQL, OPC UA, RESTful* и БЗ.

В статье [36] представлен пример применения ОМ в программно-аналитическом комплексе системы обеспечения устойчивости качества электроэнергии. *Предложена модель взаимодействия автоматизированных систем, БД и БЗ.* Описан процесс имитации принятия решений за счёт аппарата базы правил и динамического графа. Предложено дополнение ОМ нейросетевой модели для модернизации алгоритма обработки отклонений плановых показателей электроэнергии от фактических. Рассмотрено применение БЗ в качестве модели цифрового двойника в технологических и управленческих аспектах объекта.

В статье [37] рассмотрена архитектура интеллектуальной контрольно-аварийной системы, интегрирующей онтологическую БЗ с системой диагностики автономных необитаемых подводных аппаратов. *Предлагается система обработки данных сенсоров для адаптации к аварийным ситуациям.* Данные о диагностических ситуациях и конфигурациях аппаратов хранятся в БЗ. Для ведения БЗ используются средства платформы *IACPaaS*; прототипы интеллектуальной контрольно-аварийной системы и решателя разработаны на языке *Python*.

Сравнение рассмотренных подходов по степени автоматизации процессов работы с ОР представлено в таблице 1.

5 Результаты анализа степени автоматизации работ с ОР

Для сравнения работ, приведённых в таблице 1, введена система оценивания, представленная в таблице 2. При сравнении учитываются инструменты автоматизации при работе с СППР, структуры *T-box* и *A-box* ОМ не рассматриваются.

С учётом системы оценок, указанных в таблице 2, по данным таблицы 1 составлена усреднённая оценка степени внедрения подходов к автоматизации работы с ОМ. Графическое отображение данной оценки показано на рисунке 3. Из рисунка 3 видно, что процесс создания ОМ наименее автоматизирован в прикладных онтологиях ПрО.

Из рассмотренных работ можно отметить большое внимание формированию тезаурусов ПрО, составлению ограничений и правил логического вывода. В трети случаев тезаурусы формируются на основании метаонтологий или накопленных БЗ. Отражение темпорального аспекта представления объекта реализуется в тех ОМ, для которых подразумевается интеграция с автоматизированными системами или цифровыми двойниками.

В рассмотренных работах предлагаются различные подходы и структуры для формирования сложных концептов из простых. Процесс наполнения онтологии зачастую предполагается осуществлять вручную или на основании уже нормализованных, машиночитаемых данных. Меньше внимания уделяется процессам валидации *A-box* и интеграции онтологии с системами реального времени.

Значительный объём фактической информации содержится в схемах, чертежах и таблицах, однако они практически не рассматриваются как источники информации для наполнения *A-box*.

Таблица 1 – Сравнение реализаций систем информационного обеспечения на основе онтологических моделей

Наименование работы	Этап ЖЦ и его автоматизация			Технологические средства			Отражение аспекта времени	Исп. мета онтологий	
	Создание	Наполнение	Исп.	Онто-платформа	Языки ООП	Исп. АСУ			
Автоматическое конфигурирование системы подготовки газа на основе онтологических моделей [22]	Н.А.	Н.А.	А	Protégé	Python, owlready 2	Нет	Модель процесса	Нет	
Ontology-based computer aid for the automation of HAZOP studies [23]			Ч.А.	Нет	Python, owlready 2	Нет	Модель процесса	Нет, планируется ISO 15926	
An ontology-based tool for safety management in building renovation projects [24]		Ч.А.	А	Protégé	C#	Нет	Модель процесса	Нет	
ROoST-Reference Ontology on Software Testing [25]			Ч.А.	Protégé API, OntoUML	Нет	Нет	Модель процесса	SABiO, UFO	
An ontology-based procedure knowledge framework for the process industry [26]		Н.А.	Ч.А.	Protégé, Neo4J	Нет	Нет	Модель процесса	ISO 15926	
Реализация оболочки и портала знаний по верификации математических доказательств на платформе IACPaaS [27]				А	IACPaaS	Нет	Нет	Нет	Базы знаний IACPaaS
MOODY An ontology-driven framework for standardizing multi-objective evolutionary algorithms [28]			Protégé	Нет	Нет	Нет	Нет	Интеграция с OPTION	
Разработка онтологий для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем энергетики [29]		Ч.А.	Ч.А.	Нет	Java, C++, Python, Fortran	Нет	Нет	Нет	
Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем; Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики [30, 31]				Н.А.	Нет данных	Нет данных	Цифровые двойники	На стороне цифрового двойника	Нет
Онтологический подход к представлению знаний о методологии моделирования сложной системы управления [32]			Н.А.	Нет данных	Нет данных	Нет	Модель процесса	Нет	
Модель комплексной поддержки разработки интеллектуальных СППР [33]		Ч.А.	Ч.А.	Fuseki, Protégé	Нет данных	Нет	Нет	Нет	Этап выбора базовых онтологий
Онтология медицинской диагностики для интеллектуальных систем поддержки принятия решений [34]				IACPaaS	Нет	Нет	Да, интервалы и единицы измерения времени	Базы знаний IACPaaS	
Ontology-Based Expert System for Automated Monitoring of Building Energy Systems [35]			Нет данных	Python	Нет	Нет	Нет	АЕС/FM, ВРО, OMG и др.	
Формирование модели интеллектуального программного аналитического комплекса в электроэнергетике [36]		А	А	Protégé	Нет	ERP, SCADA, АСКУЭ	Да, исп. динамических графов	Нет	
Описание и диагностирование неисправностей в автономных необитаемых подводных аппаратах на основе онтологий [37]				IACPaaS	Python	Система диагностики АНПА	Да, при чтении атомарных признаков потоков диагностических данных	Базы знаний IACPaaS	

Сокращения: этап не автоматизирован (Н.А.), частично автоматизирован (Ч.А.), автоматизирован (А), использование (Исп.), автоматизированные системы управления (АСУ), объектно-ориентированное программирование (ООП).

Таблица 2 – Таблица оценивания подходов к построению систем ИО

Параметр	Оценка		
	1	2	3
Автоматизация этапа работы с онтологическим ресурсом	Этап не автоматизирован	Этап частично автоматизирован	Этап автоматизирован
Отражение темпорального аспекта рассмотрения	Темпоральный аспект не отражён	Темпоральный аспект отражён вне онтологии	Темпоральный аспект отражён в онтологии
Переиспользование онтологических моделей	Базовая онтология не используется	Предусмотрен выбор базовой онтологии	Указана используемая базовая онтология

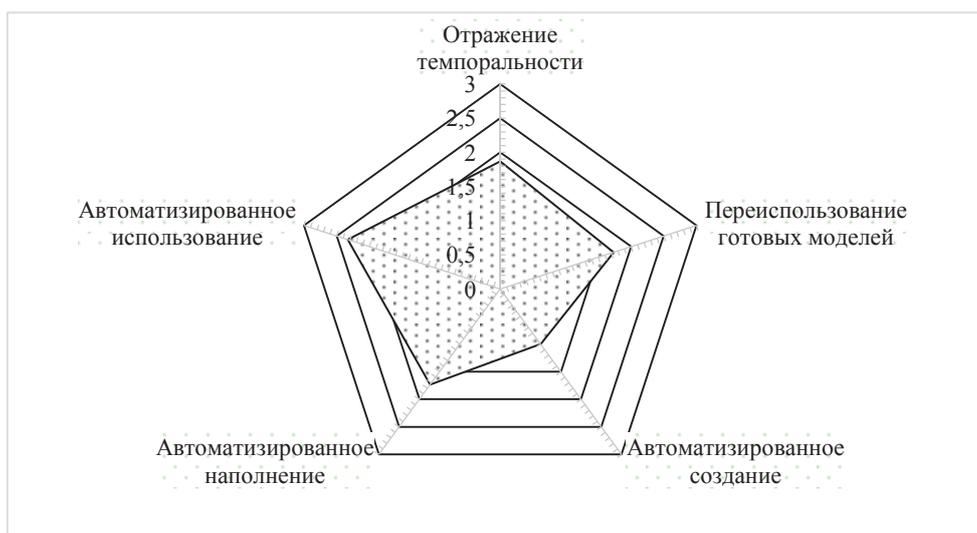


Рисунок 3 – Усреднённая оценка степени автоматизации систем информационного обеспечения на основе онтологических моделей (расшифровка числовых значений дана в таблице 2)

Наибольшее распространение имеют подходы к автоматизации использования информации, содержащейся в онтологии. Этому способствует высокая доступность программных библиотек языка программирования *Python*, позволяющих осуществлять запросы к модели и их обработку в рамках объектно-ориентированного подхода.

Следует отметить высокую степень переиспользования онтологий, свободно размещённых в сети Интернет. Широко применяются онтологические редакторы, распространяемые свободно или в облаке, а проприетарные системы - существенно меньше.

Заключение

В работе представлен обзор онтологических фреймворков, подходов к автоматизации процессов разработки, наполнения и использования ОР. В ходе анализа выявлен недостаток подходов к автоматизированному формированию *T-box* онтологии. Представляется перспективным применение *LLM* для наполнения *A-box* онтологии по данным неструктурированных текстовых документов. Распространено использование ОМ вместе с программными библиотеками языка программирования *Python* и метаонтологиями. Отмечается малая степень интеграции ОМ с системами реального времени, недостаток описания методик автоматизации процессов конвертации информации из таблиц и схем в ОМ, валидации наполнения модели и её рефакторинга. Указанные аспекты автоматизации работы с ОР можно рассматривать как перспективные направления дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Samprath Kumar VR, Khamis A, Fiorini S, et al.** Ontologies for Industry 4.0. The Knowledge Engineering Review. 2019; 34:e17. DOI:10.1017/S0269888919000109.
- [2] **Лаврик О.Л., Калюжная Т.А.** Содержание понятий "информационное обеспечение", "информационное сопровождение", "поддержка научных исследований" как этапы информационного обслуживания ученых // Вестник Томского гос. ун-та. Культурология и искусствоведение. 2020. №40. С. 305-319. DOI: 10.17223/22220836/40/28.
- [3] **Rouse W.B.** AI as Systems Engineering Augmented Intelligence for Systems Engineers. INSIGHT, 2020. 23(1), 52–54. DOI:10.1002/inst.12286.
- [4] **Madni A.M.** Exploiting Augmented Intelligence in Systems Engineering and Engineered Systems. INSIGHT, 2020. 23(1), 31–36. DOI:10.1002/inst.12282.
- [5] **Musen M.A.** Protégé Team. The Protégé Project: A Look Back and a Look Forward. AI Matters. 2015 Jun;1(4):4-12. DOI: 10.1145/2757001.2757003. PMID: 27239556; PMCID: PMC4883684.
- [6] **Gribova V., Kleschev A., Moskalenko Ph., Timchenko V., Fedorischev L., Shalfeeva E.** The IACPaaS cloud platform: features and perspectives // In proc. of Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (25-29 Sept. 2017, Vladivostok, Russia). IEEE, 2017. P.80-84. DOI: 10.1109/RPC.2017.8168073.
- [7] **Кудрявцев Д.В., Беглер А.М., Гаврилова Т.А., Лецева И.А., Кубельский М.В., Тушканова О.Н.** Метод визуальной коллективной разработки онтологического графа знаний. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2019. №1. С.27-38. DOI: 10.14357/20718594190103.
- [8] **Мартынов В.В., Скуратов А.К., Филосова Е.И., Фандрова Л.П., Шаронова Ю.В.** Технологии и операции управления онтологическими ресурсами на примере нефтедобывающей области. *Наука и Образование*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. №7. С.151–159.
- [9] **Arp R., Smith B., Spear A.** Building ontologies with nasic Formal Ontology, MIT Press, 2015.
- [10] **Lamy J.B.** Owlready: Ontology-oriented programming in Python with automatic classification and high-level constructs for biomedical ontologies. *Artificial Intelligence In: Medicine 2017*; 80:11-28
- [11] **Wilde A.S., Wanielik F., Rolinck M., Mennenga M., Abraham T., Cerdas F., Herrmann C.** Ontology-based approach to support life cycle engineering: Development of a data and knowledge structure. *Procedia CIRP*. 2022; 105. 398-403. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.066.
- [12] **Mohd Ali, Munira & Rai, Rahul & Otte, Neil & Smith, Barry.** A product life cycle ontology for additive manufacturing. *Computers in Industry*. 2018; 105. 191-203. DOI: 10.1016/j.compind.2018.12.007.
- [13] **Achich N., Ghorbel F., Hamdi F., Métais E., Gargouri F.** Approach to Reasoning about Uncertain Temporal Data in OWL 2. *Procedia Computer Science*. 2020. 176. DOI: 10.1016/j.procs.2020.09.110.
- [14] **Babaei Giglou H., D'Souza J., Auer S.** LLMs4OL: Large Language Models for Ontology Learning. 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-47240-4_22.
- [15] **Загорюлько Ю.А., Сидорова Е.А., Загорюлько Г.Б., Ахмадеева И.Р., Серый А.С.** Автоматизация разработки онтологий научных предметных областей на основе паттернов онтологического проектирования. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №4(42). С.500-520. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-500-520.
- [16] **Lubani M., Noah S.A.M., Mahmud, R.** Ontology population: Approaches and design aspects. *Journal of Information Science*, 2018. 016555151880181. DOI:10.1177/0165551518801819.
- [17] **Hafner P., Hafner V., Wicaksono H., Ovtcharova J.** Semi-automated ontology population from building construction drawings. *International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development 2013*. 379-386. DOI:10.5220/0004626303790386.
- [18] **Сытник А.А., Шульга Т.Э.** Метод полуавтоматического наполнения русскоязычных онтологий на основе лексико-семантических шаблонов. *Информатизация образования и науки*. 2021. № 4(52). С.77-89.
- [19] **Хорошевский В.Ф.** Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №4(34). С.429-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [20] **Taffa T.A., Ricardo U.** Leveraging LLMs in Scholarly Knowledge Graph Question Answering. arXiv:2311.09841. 2023; 10 p.
- [21] **Patricia Mateiu, Adrian Groza.** Ontology engineering with Large Language Models. 2023 DOI: 10.48550/arXiv.2307.16699.
- [22] **Глухих И.Н., Шевелев Т.Г., Панов Р.А., Изотов А.М., Писарев М.О., Лисс Д.А., Быков В.С., Абрамов А.В., Нониева К.З.** Автоматическое конфигурирование системы подготовки газа на основе онтологических моделей. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №4(46). С.518-531. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-4-518-531.

- [23] **Single J.I., Schmidt J., Denecke J.** Ontology-based computer aid for the automation of HAZOP studies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. 68, 104321. DOI:10.1016/j.jlp.2020.104321
- [24] **Doukari O., Wakefield J., Martinez P., Kassem M.**, An ontology-based tool for safety management in building renovation projects, *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108609>.
- [25] **Souza E., Falbo R., Vijaykumar N.** ROoST: Reference Ontology on Software Testing. *Applied Ontology*. 2017. 12. 1-32. DOI: 10.3233/AO-170177.
- [26] **Cao J., He Y.L., Zhu Q.X.** An ontology based procedure knowledge framework for the process industry. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2020. 99. DOI: 10.1002/cjce.23873.
- [27] **Клеуцев А.С., Тимченко В.А.** Реализация оболочки и портала знаний по верификации математических доказательств на платформе IACPaaS. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №3(29). С.427-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-428-448.
- [28] **José F. Aldana-Martín, María del Mar Roldán-García, Antonio J. Nebro, José F. Aldana-Montes.** MOODY: An ontology-driven framework for standardizing multi-objective evolutionary algorithms, *Information Sciences*. Volume 661. 2024. 120184. ISSN 0020-0255. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.120184>.
- [29] **Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С.** Разработка онтологий для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем энергетики. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №4(50). С.548-561. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561.
- [30] **Массель Л.В., Массель А.Г.** Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №1(47). С.44-54. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-1-44-54.
- [31] **Массель Л.В., Ворожцова Т.Н.** Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №3(37). С.327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
- [32] **Ерженин Р.В., Массель Л.В.** Онтологический подход к представлению знаний о методологии моделирования сложной системы управления. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №4(38). С.463-476. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-463-476.
- [33] **Загорюлько Г.Б.** Модель комплексной поддержки разработки интеллектуальных СППР. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №4(34). С.462-479. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-462-479.
- [34] **Грибова В.В., Петряева М.В., Окунь Д.Б., Шалфеева Е.А.** Онтология медицинской диагностики для интеллектуальных систем поддержки принятия решений. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №1(27). С.58-73. DOI:10.18287/2223-9537-2018-8-1-58-73.
- [35] **Herve Pruvost; Andreas Wilde; and Olaf Enge-Rosenblatt.** Ontology-Based Expert System for Automated Monitoring of Building Energy Systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2023. Volume 37, Issue 1. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001065.
- [36] **Антонов, В.В., Родионова Л.Е., Кромина Л.А., Фахруллина А.Р., Баймурзина Л.И.** Формирование модели интеллектуального программного аналитического комплекса в электроэнергетике. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №4(50). С.507-519. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-507-519.
- [37] **Тимошенко А.А., Зувев А.В., Мурсалимов Э.Ш., Грибова В.В., Инзарцев А.В.** Описание и диагностирование неисправностей в автономных необитаемых подводных аппаратах на основе онтологий. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, № 3(45). С.310-324. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-3-310-324.

Сведения об авторе

Шишеников Максим Алексеевич, 2000 г. рождения. Окончил РГУ Нефти и Газа имени И.М. Губкина магистр по специальности «Управление в технических системах» (2023 г). Научный сотрудник лаборатории автоматизации ООО «НИИ Транснефть». Область научных интересов: автоматизация, трубопроводный транспорт нефти, онтологическое моделирование, информационное обеспечение. SPIN-код elibrary: 8702-0708. shishenkovma@gmail.com.



Поступила в редакцию 26.03.2024, после рецензирования 07.05.2024. Принята к публикации 14.05.2024.



Approaches to automating processes of working with ontological resources

© 2024, M.A. Shishenkov

Limited Liability Company the Pipeline Transport Institute, Moscow, Russia

Abstract

Ontological models are extensively used in information support systems that offer resources and services for solving management, design, and scientific and technical problems. Specifically, domain ontologies are commonly utilized in decision support systems. In the ontological modeling of complex systems, there arises a need to automate the processes of handling ontological resources. This work discusses the main software systems and methodologies for ontological modeling, approaches to automating the processes of creating, populating, and using ontological models, and considers the temporal aspect of the ontological representation of objects. The aim of the work is to explore methods for automating the life cycle of ontological resources and to analyze the extent of their adaptation in applied ontologies. The work highlights a relatively high degree of automation in the process of populating ontologies and the use of large language models in this process. However, it points out the lack of methods for automating the conversion of information from tables and diagrams into ontological models, as well as for validating and processing the content of the model. Promising directions for automating work with ontological resources are also indicated.

Keywords: *ontological models, ontological resources, knowledge base, automation, information support systems, large language models.*

For citation: *Shishenkov M.A. Approaches to automating processes of working with ontological resources [In Russian]. Ontology of designing. 2024; 14(2): 256-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-256-269.*

Acknowledgment: The author expresses gratitude to the head of the Department of Automation of Technological Processes of the National University of Oil and Gas «Gubkin University» (Moscow, Russia) I.V. Samarin for the impetus to create the article.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 - Life cycle of an ontological resource

Figure 2 - The process of automating the formation of an A-box model and the tools used in it

Figure 3 - Average assessment of the implementation of information support systems based on ontological models

Table 1 - Comparison of implementations of information support systems based on ontological models

Table 2 - Table for evaluating approaches to building information support systems”

References

- [1] **Sampath Kumar VR, Khamis A, Fiorini S, et al.** Ontologies for Industry 4.0. *The Knowledge Engineering Review*. 2019; 34:e17. DOI:10.1017/S0269888919000109.
- [2] **Lavrik OL, Kalyuzhnaya TA.** The content of the concepts “information support”, “information maintenance”, “support for scientific research” as stages of information services for scientists. [In Russian]. *Vestnik Tomsk. state un-ty. Cultural studies and art history*. 2020; 40. P.305-319. DOI: 10.17223/22220836/40/28.
- [3] **Rouse WB.** AI as Systems Engineering Augmented Intelligence for Systems Engineers. *INSIGHT*, 2020; 23(1): 52–54. DOI:10.1002/inst.12286.
- [4] **Madni AM.** (2020). Exploiting Augmented Intelligence in Systems Engineering and Engineered Systems. *INSIGHT*, 23(1), 31–36. DOI:10.1002/inst.12282.
- [5] **Musen MA.** Protégé Team. The Protégé Project: A Look Back and a Look Forward. *AI Matters*. 2015 Jun;1(4):4-12. DOI: 10.1145/2757001.2757003. PMID: 27239556; PMCID: PMC4883684.

- [6] **Gribova V, Kleschev A, Moskalenko Ph, Timchenko V, Fedorischev L, Shalfeeva E.** The IACPaaS cloud platform: features and perspectives // In proc. of Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (25-29 Sept. 2017, Vladivostok, Russia). IEEE, 2017. P.80-84. DOI: 10.1109/RPC.2017.8168073.
- [7] **Kudryavtsev D, Begler A, Gavrilova T, Leshcheva I, Kubelskiy M, Tushkanova O.** A method for visual collective development of an ontological knowledge graph. [In Russian] *Artificial intelligence and decision making*. 2019; 1: 27-38. DOI: 10.14357/20718594190103.
- [8] **Martynov VV, Skuratov AK, Filosoza EI, Fandrova LP, Sharonova YuV.** Technologies and operations of ontological resource management using the example of the oil production area [In Russian]. *Science and education. MSTU im. N.E. Bauman. Electron. magazine*. 2016; 07: 151–159.
- [9] **Robert Arp, Barry Smith, Andrew Spear:** Building ontologies with nasic Formal Ontology, MIT Press, 2015.
- [10] **Lamy JB.** Owlready: Ontology-oriented programming in Python with automatic classification and high-level constructs for biomedical ontologies. *Artificial Intelligence In: Medicine*. 2017; 80:11-28
- [11] **Wilde AS, Wanielik F, Rolinck M, Mennenga M, Abraham T, Cerdas F, Herrmann C.** Ontology-based approach to support life cycle engineering: Development of a data and knowledge structure. *Procedia CIRP*. 2022; 105: 398-403. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.066.
- [12] **Mohd Ali, Munira & Rai, Rahul & Otte, Neil & Smith, Barry.** A product life cycle ontology for additive manufacturing. *Computers in Industry*. 2018;105: 191-203. DOI: 10.1016/j.compind.2018.12.007.
- [13] **Achich, Nassira & Ghorbel, Fatma & Hamdi, Fayçal & Métais, Elisabeth & Gargouri, Faiez.** Approach to Reasoning about Uncertain Temporal Data in OWL 2. *Procedia Computer Science*. 2020. 176. DOI: 10.1016/j.procs.2020.09.110.
- [14] **Babaei Giglou H, D'Souza J, Auer S.** LLMs4OL: Large Language Models for Ontology Learning. 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-47240-4_22.
- [15] **Zagorulko YuA, Sidorova EA, Zagorulko GB, Akhmadeeva IR, Sery AS.** Automation of the development of ontologies of scientific subject domains based on ontology design patterns [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11(4): 500-520. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-4-500-520.
- [16] **Lubani M, Noah SAM, Mahmud R.** Ontology population: Approaches and design aspects. *Journal of Information Science*, 2018. 016555151880181. DOI:10.1177/0165551518801819.
- [17] **Hafner, P. & Hafner, V. & Wicaksono, Hendro & Ovtcharova, Jivka.** Semi-automated ontology population from building construction drawings. *International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development* 2013. 379-386. DOI:10.5220/0004626303790386.
- [18] **Sytnik AA, Shulga TE.** A method for semi-automatic filling of Russian-language ontologies based on lexical-semantic templates. [In Russian]. *Informatization of education and science*. 2021; 4(52): 77-89.
- [19] **Khoroshevsky VF.** Ontology Driven Software Engineering: Models, Methods, Implementations [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 429-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [20] **Taffa, Tilahun Abedissa and Ricardo Usbeck.** Leveraging LLMs in Scholarly Knowledge Graph Question Answering. arXiv:2311.09841. 2023: 10 p.
- [21] **Patricia Mateiu, Adrian Groza.** Ontology engineering with Large Language Models. 2023 DOI:10.48550/arXiv.2307.16699.
- [22] **Glukhikh IN, Shevelev TG, Panov RA, Izotov AM, Pisarev MO, Liss DA, Bykov VS, Abramov AV, Nonieva KZ.** Automatic configuration of the gas treatment system based on ontological models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12(4): 518-531. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-4-518-531.
- [23] **Single JI, Schmidt J, Denecke J.** Ontology-based computer aid for the automation of HAZOP studies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. 68, 104321. DOI:10.1016/j.jlp.2020.104321
- [24] **Doukari O, Wakefield J, Martinez P, Kassem M.,** An ontology-based tool for safety management in building renovation projects, *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.job.2024.108609.
- [25] **Souza E, Falbo R, Vijaykumar N.** ROoST: Reference Ontology on Software Testing. *Applied Ontology*. 2017. 12. 1-32. 10.3233/AO-170177.
- [26] **Cao J, He YL, Zhu QXg.** An ontology based procedure knowledge framework for the process industry. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2020; 99. 10.1002/cjce.23873.
- [27] **Kleschev AS, Timchenko VA.** Implementation of the shell and knowledge portal for mathematical proofs verification on the IACPaaS platform [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(3): 427-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-427-448.
- [28] **José F. Aldana-Martín, María del Mar Roldán-García, Antonio J. Nebro, José F. Aldana-Montes.** MOODY: An ontology-driven framework for standardizing multi-objective evolutionary algorithms, *Information Sciences*. Volume 661. 2024. 120184. DOI:10.1016/j.ins.2024.120184.
- [29] **Stennikov VA, Barakhtenko EA, Sokolov DV, Mayorov GS.** Development of ontologies for automating computational processes in the energy pipeline system design [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 548-561. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561.

-
- [30] **Massel LV, Massel AG.** Semantic modeling in the construction of digital twins of energy objects and systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(1): 44-54. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-44-54.
- [31] **Massel LV, Vorozhtsova TN.** Ontological approach to the construction of digital twins of energy objects and systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(3): 327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
- [32] **Erzhenin RV, Massel LV.** Ontological approach to the knowledge representation about the methodology of modeling a complex control system [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(4): 463-476. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-463-476.
- [33] **Zagorulko GB.** Model of comprehensive support of intelligent DSS development [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 462-479. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-462-479.
- [34] **Gribova VV, Petryaeva MV, Okun DB, Shalfeeva EA.** Medical diagnosis ontology for intelligent decision support systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(1): 58-73. - DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-1-58-73.
- [35] **Pruvost H, Wilde A, Enge-Rosenblatt O.** Ontology-Based Expert System for Automated Monitoring of Building Energy Systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2023; 37(1). DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001065.
- [36] **Antonov VV, Kromina LA, Rodionova LE, Fakhrullina AR, Baimurzina LI.** Formation of the model of an intellectual software analytical complex in the electric power industry [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 507-519. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-507-519.
- [37] **Timoshenko AA, Zuev AV, Mursalimov ES, Gribova VV, Inzartsev AV.** Description and diagnosis of malfunctions in autonomous uninhabited underwater vehicles based on ontologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12(3): 310-324. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-3-310-324.
-

About the author

Maksim Alekseevich Shishenkov (b. 2000) graduated from the National University of Oil and Gas «Gubkin University» (Moscow, Russia) in 2023, and received a Master's degree in Management in Technical systems. He is a researcher in laboratory of automation in «Pipeline Transport Institute» (Moscow, Russia). His area of scientific interest include: automation, pipeline oil transport, ontological modeling, and information support. SPIN-code elibrary: 8702-0708. shishenkovma@gmail.com.

Received March 26, 2024. Revised May 07, 2024. Accepted May 14, 2024.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.891.2

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-270-278



Структура информационного хранилища системы поддержки принятия клинических решений

© 2024, Д.Р. Богданова ✉, Г.Р. Шахмаметова, А.М. Ниязгулов

Уфимский университет науки и технологий (УУНУТ), Уфа, Россия

Аннотация

Рассматривается построение на основе онтологического подхода информационного хранилища системы поддержки принятия клинических решений слабо-формализуемой предметной области лечения бронхолегочных заболеваний. Приведён обзор подходов к созданию баз знаний в этой предметной области. Описан метод извлечения знаний, основанный на правилах из клинических рекомендаций и поиске зависимостей между словами в предложениях с учётом последовательности применения правил. Информационное хранилище системы поддержки принятия клинических решений наполняется онтологической и продукционной базами знаний при помощи предложенного метода извлечения знаний. Разработана онтология выбранной предметной области, проведены исследования её качества на основе анализа топологии графа при помощи метрик когнитивной эргономичности. Показана эффективность описанного метода извлечения знаний. Разработана оригинальная архитектура системы поддержки принятия клинических решений.

Ключевые слова: онтология, клинические рекомендации, система поддержки принятия решений, продукционные правила, база знаний, информационное хранилище.

Цитирование: Богданова Д.Р., Шахмаметова Г.Р., Ниязгулов А.М. Структура информационного хранилища системы поддержки принятия клинических решений // Онтология проектирования. 2024. Т. 14, №2(52). С. 270-278. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-270-278.

Финансирование: исследование поддержано грантом РФФИ № 22-19-00471.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В медицине особенно актуальна организация процесса обработки, хранения и использования данных ввиду большого объёма накопленной информации в области диагностики и лечения пациентов.

Онтология предметной области (ПрО) – формализованное описание структуры медицинских знаний и терминологии используется для описания знаний о заболеваниях, процедурах лечения, симптомах, физиологии, патологиях и др. *Клинические рекомендации* – согласованные рекомендации для диагностики и лечения пациентов, основанные на методах с доказанной эффективностью. *Информация о пациенте* – личные данные, диагноз, история болезни, результаты анализов, результаты функциональной диагностики.

Указанные данные применяются для создания медицинских информационных, экспертных или рекомендательных систем, в которых накопленную информацию объединяют в базы знаний (БЗ), формируя на их основе методы решения задач (диагностика пациента или назначение лечения). Эффективность использования сформированной БЗ зависит от типа хранимой информации, её структурированности и связей между элементами системы поддержки принятия решений (СППР). По данным исследования [1] лишь 10–20% информации, используемой в медицинских учреждениях, представлено в структурированной форме. Примером представления информации в неструктурированном виде являются тексты клиниче-

ских рекомендаций. При формировании структуры БЗ необходим анализ таких текстов, который в медицинских учреждениях выполняют специалисты.

Для структурирования данных в текстах клинических рекомендаций разработан алгоритм и программное обеспечение (ПО) [2], которые позволяют структурировать текст для последующего использования в БЗ СППР. Разработанные средства автоматически выделяют ключевые слова и строят на их основе карты понятий. Результатом является сформированный набор продукционных правил (ПП), который может применяться при построении СППР. В общем виде ПП можно представить как логические правила, описывающие связи между медицинскими симптомами и заболеваниями, а также определяющие эффективные методы лечения в зависимости от представленных входных данных. Такие правила интегрируются в БЗ и могут быть использованы при диагностике пациента или назначении лечения.

В области построения БЗ клинических рекомендаций используются несколько различных подходов, на основе которых разработаны ПО. В работе [3] предложена архитектура БЗ системы поддержки принятия врачебных решений, основанная на графовой базе данных (БД). В качестве источника знаний использованы клинические рекомендации, из них выделены типы связей и понятий, на их основе создана метамодель для БЗ СППР. В работе [4] представлена медицинская экспертная система на основе БЗ, построенная с использованием семантических сетей и нечёткой логики. Разработанное ПО позволяет врачу на основе данных о диагнозе пациента и течении болезни получать список рекомендаций. СППР, ориентированная на пациента и использование отзывов из социальных сетей, предложена в [5]. Отзывы пациентов анализируются на предмет тональной окраски и преобразуются в структурированные данные, которые используются для создания БЗ о пациенте. В рамках исследования проблемы избыточной массы тела у детей в [6] представлены разработки в области создания БЗ для медицинских экспертных систем. Для формирования БЗ экспертных диагностических систем предложено использовать нечёткие нейронные сети [7]. Перечисленные и другие СППР применяются для решения конкретных задач или затрагивают определённую сферу медицины. Большинство предложенных реализаций находятся на стадии проекта либо прототипа. Зарубежные разработки не обладают поддержкой русского языка, что затрудняет обработку информации и построение БЗ с их помощью.

Возможным средством решения задачи построения информационного хранилища СППР ПрО лечения бронхолёгочных заболеваний может стать онтология [8]. Онтологический подход позволяет связать терминологию и клинические рекомендации и на их основе разработать деревья принятия решений, из которых формируются ПП. Совокупность правил позволит объединить в единую БЗ клинические рекомендации [9].

1 Извлечение знаний для формирования информационного хранилища

1.1 Структура метода

В СППР объектами исследования являются рентгенологические снимки, истории болезней, симптомы заболеваний, клинические рекомендации, представленные в описательном виде. Для их описания необходимо использование специальных технологий обработки слабоструктурированных и слабоформализованных данных [10]. Одной из таких технологий является метод извлечения знаний, определяемый построенными деревьями зависимостей между словами в предложении с учётом использования последовательности применения ПП. В процессе построения БЗ клинических рекомендаций при помощи метода извлечения знаний необходимо выполнить следующие этапы обработки данных [11]:

- 1) создание онтологий ПрО – описание концептуальной структуры медицинских знаний [12];
- 2) автоматическое выявление текстов клинических рекомендаций по конкретным заболеваниям (например, бронхолёгочным болезням) [13];
- 3) программная генерация деревьев принятия решений на основе онтологии ПрО и клинических рекомендаций [14];
- 4) формирование набора ПП, на основе которых составляется БЗ СППР.

1.2 Онтологическая БЗ

Онтологическая БЗ разрабатываемого информационного хранилища СППР реализована на языке *OWL*. В качестве языка запросов к данным онтологии используется *SPARQL*. Моделирование онтологий осуществляется на базе *Protégé*¹. Фрагмент дерева классов онтологии, разработанного при помощи плагина *OntoGraf*, представлен на рисунке 1.

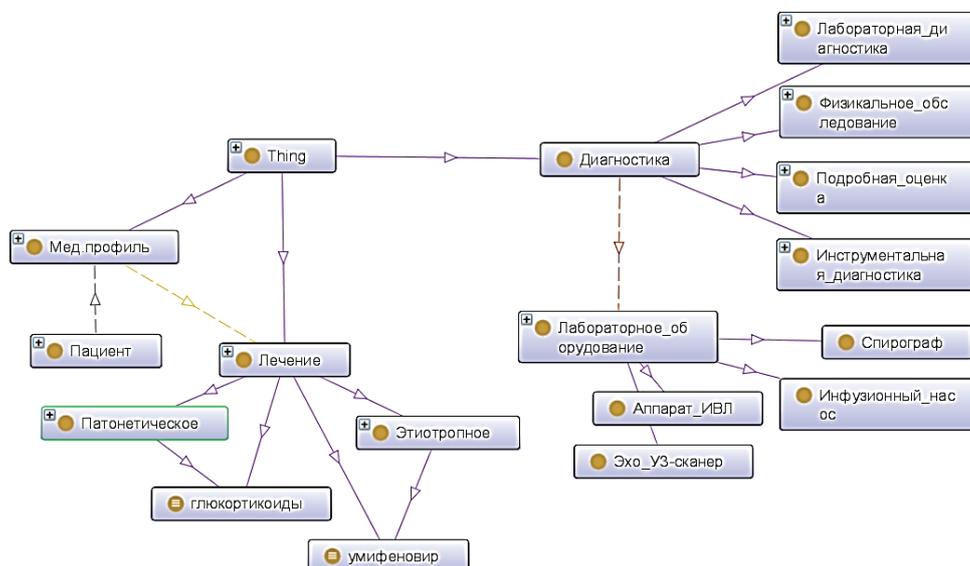


Рисунок 1 – Фрагмент дерева классов онтологии (*Protégé - OntoGraf*)

1.2.1 Иерархия классов

Иерархия классов онтологической БЗ разрабатываемого информационного хранилища СППР представлена в виде дерева (часть иерархии классов разработанной онтологии представлена на рисунке 2). Среди множества его ветвей для примера можно выделить следующие классы.

- «Диагноз по COVID-19» включает степени тяжести болезни (лёгкая, среднетяжёлая, тяжёлая).
- «Диагностика» подразделяется (со всеми дополнительными подклассами и подпунктами) на инструментальную, лабораторную, подробную оценку (анамнез заболевания, жалобы, эпидемиологический анализ) и физикальное обследование.
- «Лабораторное оборудование» включает инструменты, необходимые для диагностики и лечения указанного заболевания (аппарат ИВЛ, бронхоскоп, 12-канальный ЭКГ и др.).

1.2.2 Метрики качества онтологии

Исследования качества онтологии проводилось на основе анализа топологии графа. В качестве основных метрик были использованы метрики когнитивной эргономичности [15]:

- 1) *Глубина онтологии*. Путь графа – последовательность соединённых вершин от корня до листа. Этот параметр необходимо учитывать при оценке относительной, средней или максимальной глубины графа. Максимальная глубина в четыре ветви (последовательности) является доступной для восприятия и легко анализируемой.
- 2) *Ширина онтологии* определяет количество вершин и оценивается с трёх точек зрения – как абсолютная (сумма вершин), средняя или максимальная (количество вершин на самом большом уровне иерархии графа).

¹ Protégé (the Stanford Center for Biomedical Informatics Research at the Stanford University School of Medicine). Официальный сайт. <https://protege.stanford.edu>.

- фа). Средняя ширина онтологии разрабатываемой системы - 4,3 вершины. По этому показателю онтология является хорошо проработанной и разделённой на иерархии с точки зрения когнитивной эргономики.
- 3) *Запутанность онтологии* рассматривается с позиции множественного наследования – как количество вершин графа онтологии, у которых есть несколько непосредственных суперклассов. Поскольку в рассматриваемой онтологии такого наследования нет, данная метрика имеет оптимальный нулевой показатель.
 - 4) Количество анонимных классов также равняется нулю, что позволяет улучшить воспринимаемость и читаемость разработанной онтологии.
- Оценка онтологии проводится на всех этапах разработки ПО.

1.3 Деревья принятия решений

В основе разрабатываемого информационного хранилища СППР лежат деревья решений – иерархические структуры, состоящие из ПП, которые могут быть сгенерированы во время обучения модели [16]. Как правило, деревья применяются для анализа массивов информации и решения задач классификации [17]. Структура дерева принятия решений может быть описана как совокупность «ветвей» (с описанием признаков и условий) и узлов – значений целевой функции («листьев»). Классификация новых признаков происходит при перемещении по ветвям с последующим получением значений из узлов. Ключевой особенностью деревьев принятия решений является простота генерации ПП, описываемых на естественном языке. В качестве примера приведён фрагмент одной из ветвей дерева принятия решений, построенного на базе структурированных текстов клинических рекомендаций (рисунок 3).

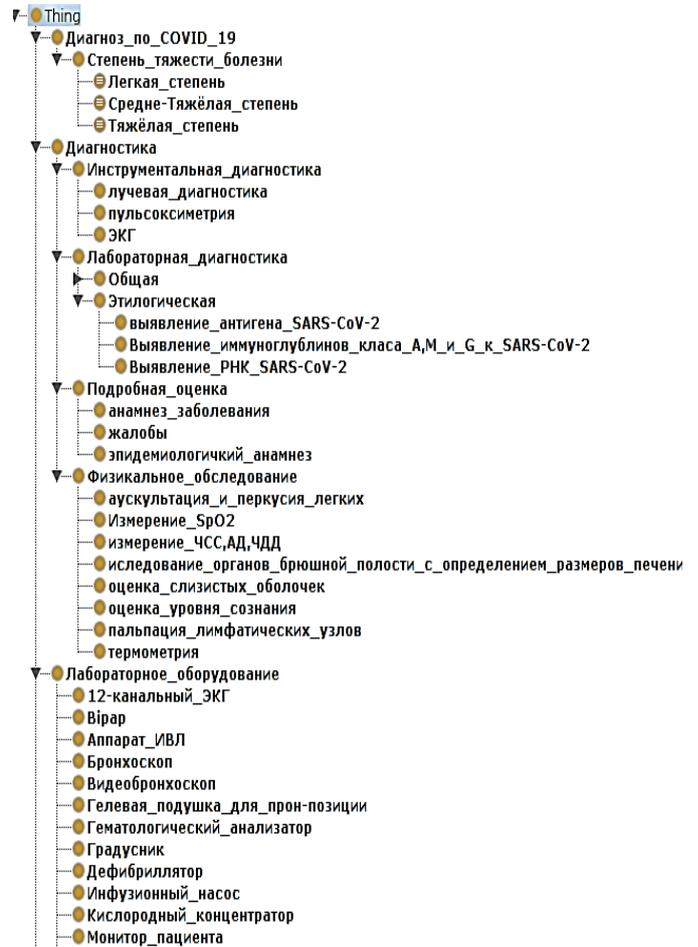


Рисунок 2 – Часть иерархии классов онтологической базы знаний информационного хранилища СППР (Protégé)

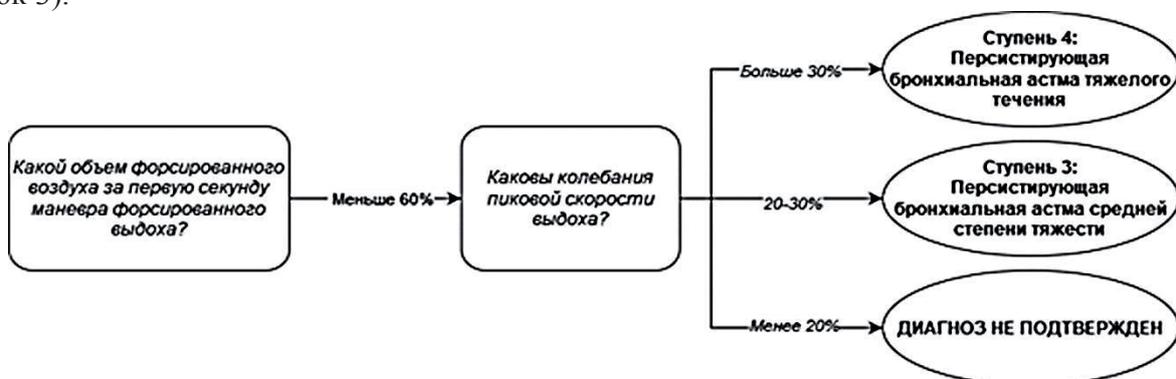


Рисунок 3 – Фрагмент одной из ветвей дерева принятия решений по диагностике бронхиальной астмы

Из представленного фрагмента ветви дерева принятия решений можно сформировать ряд ПП по диагностике бронхиальной астмы у пациента с соответствующими симптомами.

Структура ПП на основе дерева принятия решений в формате, подходящем для использования в БЗ клинических рекомендаций СППР в общем виде выглядит как связка двух блоков – «Условий и симптомов» (начинается с ключевого слова *ЕСЛИ*) и «Лечения» (ключевое слово *ТО*). Примеры разработанных ПП:

- *ЕСЛИ* у пациента объём форсированного воздуха за первую секунду маневра форсированного выдоха меньше 60% *И* колебания пиковой скорости выдоха больше 30%, *ТО* может быть поставлен диагноз «Ступень 4: Персистирующая бронхиальная астма тяжёлого течения»;
- *ЕСЛИ* у пациента объём форсированного воздуха за первую секунду маневра форсированного выдоха меньше 60% *И* колебания пиковой скорости выдоха от 20 до 30%, *ТО* может быть поставлен диагноз «Ступень 3: Персистирующая бронхиальная астма средней степени тяжести»;
- *ЕСЛИ* у пациента объём форсированного воздуха за первую секунду маневра форсированного выдоха меньше 60% *И* колебания пиковой скорости выдоха менее 20%, *ТО* диагноз «астма» не подтверждён.

1.4 Построение деревьев принятия решений

Наиболее затратным с точки зрения ресурсов вычислительных устройств является этап автоматической генерации деревьев принятия решений на основе текстов клинических рекомендаций и онтологии, т. к. массивы обрабатываемых данных могут быть большими.

Порядок построения деревьев принятия решений показан на рисунке 4. Сформированные деревья принятия решения используются для наполнения соответствующих БЗ клинических рекомендаций СППР.

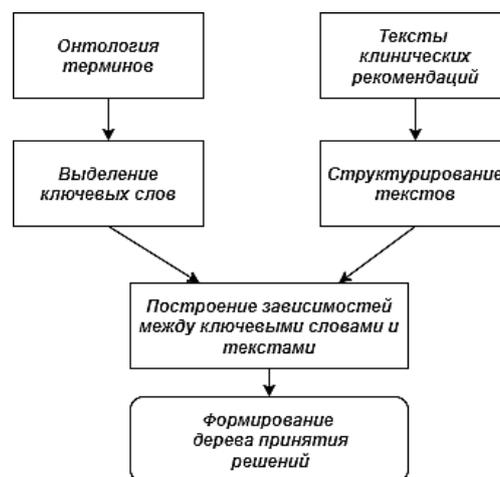


Рисунок 4 – Порядок построения деревьев решений

2 Реализация системы

Реализация медицинской СППР находится на этапе прототипирования, разработки и тестирования отдельных компонентов. Предложено создание единого информационного хранилища путём объединения отдельных элементов:

- БД – общее хранилище информации о пациентах (история болезни, личные данные);
- онтологическая БЗ;
- продукционная БЗ – хранилище ПП и деревьев принятия решений, сформированных на основе текстов клинических рекомендаций;
- метаданные – дополнительная информация о содержимом или объектах БЗ.

Разработана общая структура информационного хранилища, представленная на рисунке 5.

Фрагмент модели БД информационного хранилища представлен на рисунке 6.

На выходе СППР формирует отчёт для специалиста с рекомендациями по лечению пациента, полученный на основе анализа данных.

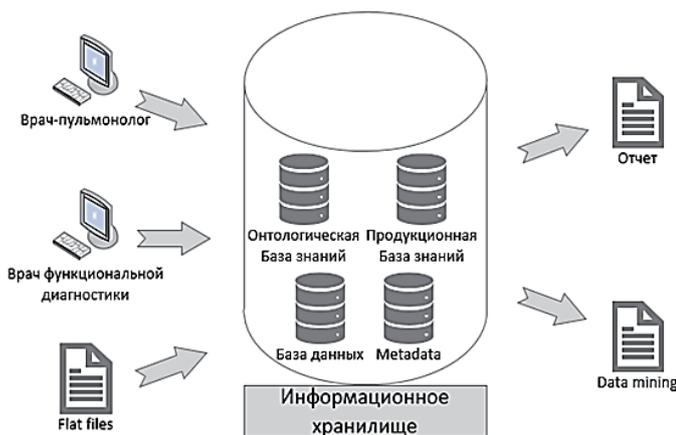


Рисунок 5 – Общая структура информационного хранилища

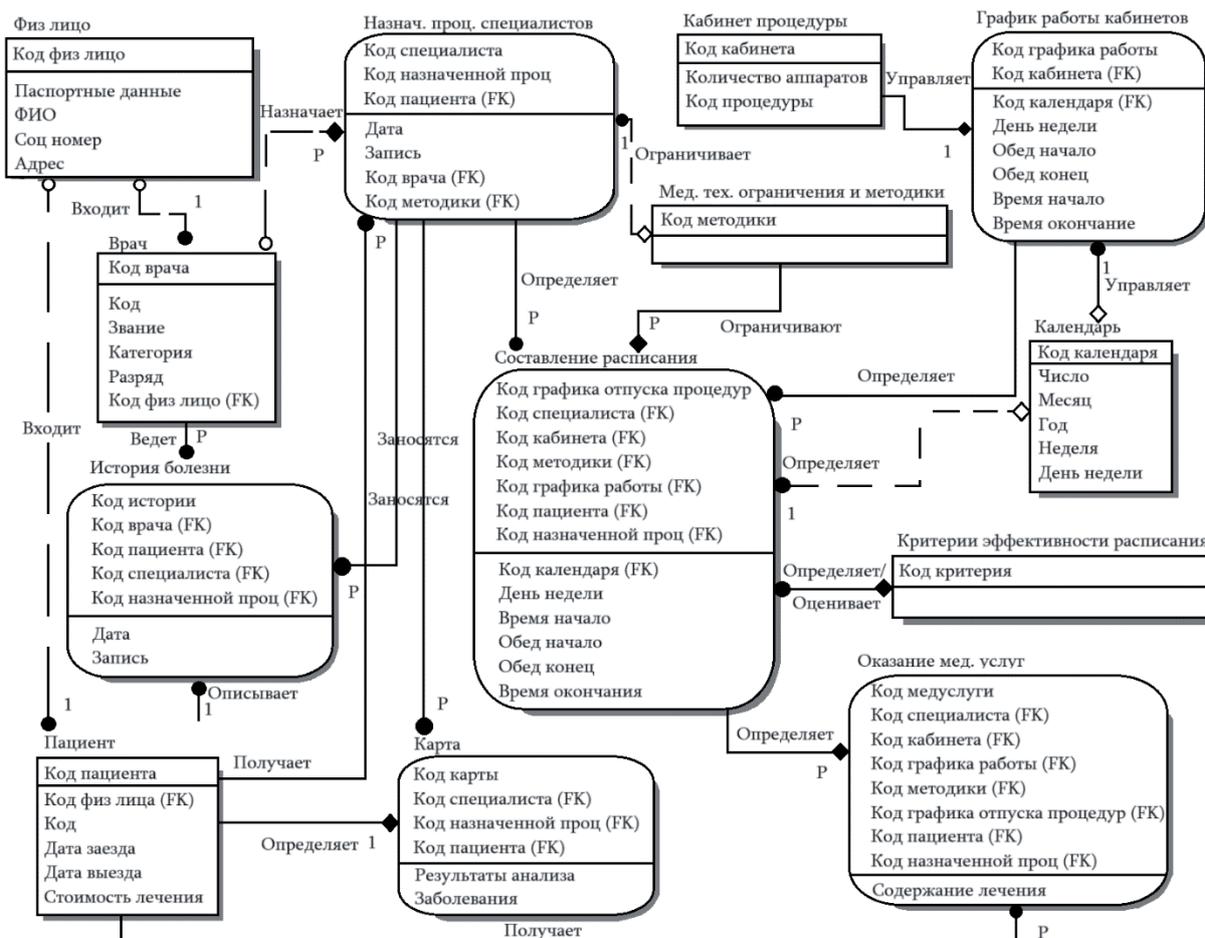


Рисунок 6 – Фрагмент модели базы данных информационного хранилища

Заключение

Разрабатываемое информационное хранилище может стать основой медицинской СППР, применяемой для постановки диагноза и назначения лечения пациентов.

Предложенный метод отличает использование автоматического формирования деревьев принятия решений на основе текстов клинических рекомендаций и онтологии.

Список источников

- [1] Why unstructured data holds the key to intelligent healthcare systems. HIT Consultant; 2015. <https://hitconsultant.net/2015/03/31/tapping-unstructured-data-healthcares-biggest-hurdle-realized/>.
- [2] *Shakhmatova G., Yusupova N., Zulkarneev R., Khudoba Y.* Concept Map for Clinical Recommendations Data and Knowledge // Proc. of the 8th International Conference on Applied Innovations in IT (ICAИТ). 2020. P.71-76. EDN: PXBUZZ.
- [3] *Киселев К.В., Ноева Е.А., Выборов О.Н., Зорин А.В.* Разработка архитектуры базы знаний системы поддержки принятия врачебных решений, основанной на графовой базе данных. *Медицинские технологии. Оценка и выбор.* 2018. № 3(33). С.42-48. DOI: 10.31556/2219-0678.2018.33.3.042-048.
- [4] *Жулева С.Ю., Крошилин А.В., Крошилина С.В.* Формирование базы знаний в экспертных системах медицинского назначения // *Современные проблемы науки и образования.* 2015. № 2-2. С.23. EDN: UZIYCF.
- [5] *Yang, J., Xiao, L. & Li, K.* Modelling clinical experience data as an evidence for patient-oriented decision support // *BMC Medical Informatics and Decision Making.* 2020. № 20. DOI: 10.1186/s12911-020-1121-4.
- [6] *Бурцева А.Л., Берестнева Е. В., Степаненко Н. П.* Создание базы знаний для медицинской экспертной системы. *Современные наукоёмкие технологии.* 2016. № 3 (часть 1). С.14-17. EDN: VSYAGP.

- [7] **Катасёв А.С., Ахатова Ч.Ф.** Гибридная нейронечёткая модель интеллектуального анализа данных для формирования баз знаний мягких экспертных диагностических систем. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2012. № 12. С.34-42. EDN: PMKDOP.
- [8] **Sim I., Gorman P., Greenes R.A., Haynes R.B., Kaplan B., Lehmann H., et al.** Clinical decision support systems for the practice of evidence-based medicine. *J Am Med Inform Assoc*. 2001. № 8(6). P.527–534. DOI: 10.1136/jamia.2001.0080527.
- [9] **Григорьев Л. Ю., Заблоцкий А. А., Кудрявцев Д. В.** Технология наполнения баз знаний онтологического типа. *Информатика, телекоммуникации и управление*. 2012. №3 (150). С.27-36.
- [10] **Кобринский Б.А.** Системы поддержки принятия врачебных решений: история и современные решения. *Методология и технология непрерывного профессионального образования*. 2020. №4 (4). С.21-36. DOI: 10.24075/МТСРЕ.2020.022.
- [11] **Дармахеева Т.А., Хантахаева Н.Б.** Моделирование системы управления активацией продукционных правил с использованием автоматного программирования. *Вестник БГУ. Математика, информатика*. 2018. №3. С.40-59. DOI: 10.18101/2304-5728-2018-3-40-59.
- [12] **Грибова В.В., Петряева М.В., Окунь Д.Б., Шалфеева Е.А.** Онтология медицинской диагностики для интеллектуальных систем поддержки принятия решений. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8. №1(27). С.58-73. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-1-58-73.
- [13] **Вафин Р.Р.** Автоматическое извлечение информации из клинических рекомендаций с применением интеллектуального анализа текста // Мавлютовские чтения: материалы XIII Всероссийской молодежной научной конференции. 2019. Т. 4. Ч. 2. С. 74-77.
- [14] **Зайцева Т.В., Васина Н.В., Пусная О.П., Смородина Н.Н.** Программная реализация метода деревьев решений для решения задач классификации и прогнозирования. *Экономика. Информатика*. 2013. №8-1. С.121-127. EDN: RPYDEL.
- [15] **Гаврилова Т.А., Горовой В.А., Болотникова Е.С., Голенков В.В.** Субъективные метрики оценки онтологий // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-2009), Новосибирск, 22–24 октября 2009 года. С.178-186. EDN: YMWMYT.
- [16] **Жаркова О.С., Шаропин К.А., Сеидова А.С., Берестнева Е.В., Осадчая И.А.** Построение систем поддержки принятия решений в медицине на основе деревьев решений // Современные наукоемкие технологии. 2016. №6 (часть 1). С.33-37. EDN: WCDUOD.
- [17] **Кафтаников И.Л., Парасич А.В.** Особенности применения деревьев решений в задачах классификации // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. №3. С.26-31. DOI: 10.14529/ctcr150304.

Сведения об авторах



Богданова Диана Радиковна, 1983 г. рождения. Окончила Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ) в 2005 г. Доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики (ВМиК) УУНиТ. К.т.н. (2008). В списке научных трудов более 150 работ в области СППР и ИИ. ORCID: 0000-0001-9887-2875; Author ID (РИНЦ): 182812; Author ID (Scopus): 57188707438; Researcher ID (WoS): ABD-4816-2020. dianochka7bog@mail.ru. ✉

Шахмаметова Гюзель Радиковна, 1970 г. рождения. Окончила Уфимский авиационный институт им. С. Орджоникидзе в 1992 г., д.т.н. (2013), профессор, заведующий кафедрой ВМиК УУНиТ. В списке научных трудов более 160 работ в области интеллектуальной поддержки принятия решений и ИИ. ORCID: 0000-0002-7742-793X; Author ID (РИНЦ): 122831; Author ID (Scopus): 6504057483. shakhgouzel@mail.ru.



Ниязгулов Альберт Минниахметович, 1987 г. рождения. Окончил УГАТУ в 2022 г. Инженер кафедры ВМиК УУНиТ. Аспирант по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей». Автор трёх статей в сборниках научных работ, индексируемых в *Scopus*. ORCID: 0009-0008-0725-3971; alertufa@gmail.com.

Поступила в редакцию 26.12.2023, после рецензирования 10.04.2024. Принята к публикации 08.05.2024.



The structure of the CDSS information repository based on the ontological approach

© 2024, D.R. Bogdanova ✉, G.R. Shakhmametova, A.M. Niazgulov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract

The construction of an information repository for a clinical decision support system (CDSS) in the weakly formalized subject area of treating bronchopulmonary diseases is considered. An overview of approaches to creating knowledge bases in this subject area is provided. A method for extracting knowledge is described, which is based on rules from clinical recommendations and the search for dependencies between words in sentences, taking into account the sequence of rule application. The information repository of the CDSS is populated with ontological and production knowledge bases using the proposed knowledge extraction method. An ontology for the selected subject area was developed, and studies of its quality were conducted through an analysis of the graph topology using cognitive ergonomics metrics. The effectiveness of the described knowledge extraction method is demonstrated. An original architecture for a clinical decision support system has been developed.

Keywords: ontology, clinical guidelines, decision support system, production rules, knowledge base, information repository.

For citation: D.R. Bogdanova, G.R. Shakhmametova, A.M. Niazgulov. The structure of the CDSS information repository based on the ontological approach [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 270-278. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-270-278.

Financial Support: This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-00471.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

- Figure 1 - Fragment of the ontology class tree (Protégé - OntoGraf)
- Figure 2 - Part of the class hierarchy of the ontological knowledge base of the DSS information repository (Protégé)
- Figure 3 - A fragment of a branch of the decision tree for diagnosing bronchial asthma
- Figure 4 - Decision tree construction order
- Figure 5 - General structure of the information repository
- Figure 6 - Fragment of the information repository database model

References

- [1] Why unstructured data holds the key to intelligent healthcare systems. HIT Consultant; 2015. <https://hitconsultant.net/2015/03/31/tapping-unstructured-data-healthcares-biggest-hurdle-realized/>.
- [2] **Shakhmametova G, Yusupova N, Zulkarneev R, Khudoba Y.** Concept Map for Clinical Recommendations Data and Knowledge. In: Proc. of the 8th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIIT). (Koethen, Germany, March 10th 2020). Anhalt University of Applied Sciences, 2020: 71-76. EDN: PXBUZZ.
- [3] **Kiselev K, Noeva E, Vyborov O, Zorin A, et al.** Development of the knowledge base architecture of the system of medical decision support based on the graph database [In Russian]. *Medical technologies. Evaluation and Choice*. 2018; 3(33): 42-48. DOI: 10.31556/2219-0678.2018.33.3.042-048.
- [4] **Kroshilin A, Kroshilina S, Zhuleva S.** Formation of knowledge base in expert systems of medical purpose [In Russian]. *Modern problems of science and education*. 2015; 2-2: 23. EDN: UZIYCF.
- [5] **Yang J, Xiao L, Li K.** Modelling clinical experience data as an evidence for patient-oriented decision support. *United Kingdom: BMC Medical Informatics and Decision Making*; 2020; 20. DOI: 10.1186/s12911-020-1121-4.
- [6] **Burtseva A, Berestneva E, Stepanenko N.** Creating a knowledge base for medical expert system [In Russian]. *Modern Science-Intensive Technologies*. 2016; 3(1): 14-17. EDN: VSYAGP.

- [7] **Katasev A, Akhatova Ch.** Hybrid neuro-fuzzy model of intellectual data analysis for the formation of knowledge bases of soft expert diagnostic systems [In Russian]. *Science and Education: scientific edition of Bauman Moscow State Technical University*. 2012; 12: 34-42. EDN: PMKDOP.
 - [8] **Sim I, Gorman P, Greenes RA, Haynes RB, Kaplan B, Lehmann H, et al.** Clinical decision support systems for the practice of evidence-based medicine. Washington, D.C.: *J Am Med Inform Assoc*. 2001; 8(6): 527-534. DOI: 10.1136/jamia.2001.0080527.
 - [9] **Grigoriev L, Zablotsky A, Kudryavtsev D.** Technology of ontology-type knowledge bases filling [In Russian]. *Informatics, Telecommunications and Management*; 2012; 3(150): 27-36.
 - [10] **Kobrinsky B.** Support systems for medical decision making: history and modern solutions [In Russian]. *Methodology and Technology of Continuing Professional Education*; 2020; 4(4): 21-36. DOI: 10.24075/MTCPE.2020.022.
 - [11] **Darmakheeva T, Khaptakhaeva N.** Modeling of the control system of the product-rules activation using automata-based programming [In Russian]. *BSU Vestnik. Mathematics, Informatics*; 2018; 3: 40-59. DOI: 10.18101/2304-5728-2018-3-40-59.
 - [12] **Gribova V, Petryaeva M, Okun D, Shalfeeva E.** Medical diagnosis ontology for intelligent decision support systems. [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2018; 8(1): 58-73. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-1-58-73.
 - [13] **Vafin R.** Automatic information extraction from clinical guidelines using intelligent text analysis [In Russian]. In: Mavlyutov's readings: proc. of the XIII All-Russian youth scientific conference (Ufa, Russia, October 22-24th 2019). Ufa State Aviation Technical University. 2019; 4(2): 74-77.
 - [14] **Zaitseva T, Vasina N, Pusnaya O, Smorodina N.** Program realization of the decision tree method for solving the classification and forecasting problems [In Russian]. *Economics. Informatics*. 2013; 8-1(151): 121-127. EDN: RPYDEL.
 - [15] **Gavrilova T, Gorovoy V, Bolotnikova E, Golenkov V.** Subjective metrics for evaluating ontologies [In Russian]. In: Proc. of the All-Russian Conference with international participation "Knowledge-Ontology-Theories" (ZONT-2009) (Novosibirsk, October 22-24th 2009). Sobolev Institute of Mathematics, 2009: 178-186. EDN: YMWMYT.
 - [16] **Zharkova O, Sharopin K, Seidova A, Berestneva E, Osadchaya I.** Building decision support systems in medicine based on decision trees [In Russian]. *Modern Science-Intensive Technologies*. 2016; 6(1):33-37. EDN: WCDUOD.
 - [17] **Kaftannikov I, Parasich A.** Features of decision trees application in classification tasks [In Russian]. *Vestnik SUSU. Series: Computer technologies, management, radio electronics*. 2015; 3: 26-31. DOI: 10.14529/ctcr150304.
-

About the authors

Diana Radikovna Bogdanova, (b. 1983) graduated from the Ufa State Aviation Technical University (UGATU) in 2005, certified mathematical economist. PhD in Management in Social and economic systems. She is an Associate Professor at the Ufa University of Science and Technology (Department of Computational Mathematics and Cybernetics). The list of scientific papers includes more than 150 works in the field of DSS and AI. ORCID: 0000-0001-9887-2875; Author ID (RSCI): 182812; Author ID (Scopus): 57188707438; Researcher ID (WoS): ABD-4816-2020. dianochka7bog@mail.ru. ✉

Gyuzel Radikovna Shakhmametova, (b. 1970) graduated from the Ufa Aviation Institute named after S. Ordzhonikidze in 1992 (engineer in information systems), PhD (2013). She is professor and the Head of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics at the Ufa University of Science and Technology. Her list of scientific works includes more than 160 papers in the field of intelligent decision support and AI. ORCID: 0000-0002-7742-793X; Author ID (RSCI): 122831; Author ID (Scopus): 6504057483. shakhgouzel@mail.ru.

Albert Minniakhmetovich Niiazgulov, (b. 1987) graduated from the UGATU in 2022. He is an engineer at the Ufa University of Science and Technology (Department of Computational Mathematics and Cybernetics). Postgraduate student of the 2nd year of study at the "Mathematical and software of computer systems, complexes and computer networks" specialty. ORCID: 0009-0008-0725-3971; alertufa@gmail.com.

Received December 26, 2023. Revised April 10, 2024. Accepted May 08, 2024.



Ансамбль онтологических моделей для обеспечения интеллектуальной поддержки лазерных аддитивных технологических процессов

© 2024, В.В. Грибова^{1,2}✉, Ю.Н. Кульчин¹, А.И. Никитин^{1,2}, В.А. Тимченко^{1,2}

¹ Институт автоматизации и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), Владивосток, Россия

Аннотация

Обсуждаются барьеры, затрудняющие применение в производстве аддитивных технологических процессов изготовления металлических деталей. Обосновывается необходимость внедрения интеллектуальной системы поддержки принятия решений в профессиональную деятельность инженеров-технологов лазерного аддитивного производства. Указываются преимущества, которые даёт применение разработанного онтологического двухуровневого подхода к формированию семантической информации. Особенность подхода состоит в том, что онтологические модели отделены от формируемых на их основе баз данных и знаний – целевой информации, а онтология определяет правила структурированного формирования целевой информации и её интерпретации. Представлен ансамбль онтологических моделей, положенный в основу разрабатываемой интеллектуальной системы. Описан состав ансамбля моделей, назначение отдельных его компонентов и возможные типы связей между ними. В состав ансамбля входят онтологии: справочных баз по оборудованию и материалам лазерного аддитивного производства, архива протоколов технологических операций лазерной обработки, базы знаний о настройках режимов лазерной обработки и базы математических моделей. Ансамбль онтологических моделей реализован на облачной платформе IASaaS с использованием её инструментальных средств. Онтологии, базы данных и знаний, а также система поддержки принятия решений входят в состав портала знаний о лазерном аддитивном производстве. Аккумулирование в портале и дальнейшее использование знаний и опыта, накапливаемых разными технологами, позволит уменьшить число предварительных экспериментов, направленных на выявление практически пригодных технологических режимов, а также снизить требования к квалификации пользователей технологического оборудования.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, онтологии, онтологическое проектирование, лазерное аддитивное производство, графовая модель, облачная платформа.

Цитирование: Грибова В.В., Кульчин Ю.Н., Никитин А.И., Тимченко В.А. Ансамбль онтологических моделей для обеспечения интеллектуальной поддержки лазерных аддитивных технологических процессов // *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №2(52). С. 279-300. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-279-300.

Финансирование: Разработка онтологической базы знаний о настройках режимов выполнения лазерной обработки выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FWF-2021-0004). Разработка комплекса связанных онтологических ресурсов выполнена в рамках программы государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы (НТИ) на базе образовательных учреждений высшего образования и научных организаций (Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» на базе МГТУ им. Баумана).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Технологии аддитивного производства (АП) металлических деталей обладают следующими возможностями: изготовление продукции сложных форм, значительное снижение массы изделий и сокращение сроков производства прототипов, повышение эффективности ис-

пользования материалов. В штучном и мелкосерийном производстве аддитивные технологические процессы являются альтернативой традиционным методам обработки материалов (механическая обработка, литьё, штамповка и др.). Их применение в производственных процессах открывает возможность создания, восстановления и модификации сложных конструкций с улучшенными свойствами, которые ранее не могли быть получены из-за технологических ограничений [1-3]. Основные направления государственной политики Российской Федерации в сфере развития аддитивных технологий определены Стратегией развития аддитивных технологий на период до 2030 года [4].

Технологический процесс *DED-LB* (*Laser-Based Directed Energy Deposition* – прямой подвод энергии лазера и материала) [5, 6] является наиболее сложным, но перспективным процессом АП [7]. С его помощью можно не только изготавливать крупногабаритные металлические объекты [8], но и выполнять восстановление повреждённых или изношенных деталей, а также их конструктивно-функциональную модификацию.

Наряду с преимуществами внедрения аддитивных технологий существуют и барьеры, которые затрудняют применение АП металлических деталей [9–11]. Основная проблема состоит в необходимости учёта влияния большого количества факторов и технологических параметров лазерной обработки на элементный состав и микроструктуру материала детали (образование различного вида дефектов: трещин, пор, отслоений, расслоений и т.д.) до постобработки (детали-прототипа), а также физико-механические характеристики готового изделия. В настоящее время режимы лазерного сплавления металлических материалов зачастую подбираются методом проб и ошибок. Такой подход к проектированию аддитивных технологических процессов является затратным по ресурсам и по времени [9, 12]. Учёт взаимозависимости определяющих параметров процесса требует междисциплинарных знаний и профессиональной кооперации специалистов. Следствием этого можно назвать кадровую проблему, связанную с «высоким порогом входа» в лазерное АП (ЛАП).

На этом фоне отмечается недостаточный уровень интеллектуальной поддержки инженеров-технологов при проектировании процессов АП [10, 11, 13], связанный с трудностью масштабирования технологических решений при изготовлении металлических изделий методом прямого подвода энергии и материала. Ощущается нехватка интеллектуальных советующих систем для помощи конструкторам, технологам и иным специалистам в расчёте параметров технологических режимов. Трудоёмкость, сроки и стоимость сопровождения таких систем зачастую делают процессы АП нерентабельными [14, 15].

Перечисленные проблемы обуславливают актуальность создания жизнеспособной [16] интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) для инженеров-технологов ЛАП [17, 18]. На этапе проектирования технологической операции СППР вырабатывает рекомендации по пригодным режимам работы лазерного робототехнического оборудования для разработки управляющих программ. Под пригодным режимом понимается множество таких значений параметров аддитивного технологического процесса, которые позволяют обеспечивать соответствие получаемых металлических заготовок и деталей требуемым критериям качества по элементному составу, геометрическим размерам, наличию/отсутствию различных дефектов, микроструктуре (заданных в требованиях к результату технологической операции).

Одним из распространённых подходов к созданию программных систем является проектирование и разработка программного обеспечения на основе онтологий [19]. Настоящая работа посвящена описанию ансамбля онтологических моделей (ОМ), положенного в основу интеллектуальной СППР для инженеров-технологов в сфере ЛАП металлических деталей по технологии *DED-LB*.

1 Материалы и методы

В основу разработки комплекса семантических информационных ресурсов положен онтологический *двухуровневый* подход к представлению и формированию данных и знаний [20]. В данном подходе ОМ *явно отделены* от баз данных (БД) и знаний (БЗ), а онтология – это правила структурированного формирования информации и её интерпретации, но не сама информация [16]. При этом БД и БЗ (предметные знания) явно отделены от программных единиц, реализующих методы их обработки (знания о методах решения задач). Связывание, согласованность и повторная используемость этих компонентов обеспечиваются на уровне онтологий (рисунок 1).

Такой подход позволяет вести разработку и развитие предметных знаний и программных единиц *независимо* разными группами специалистов. Независимость программных единиц от БД/БЗ позволяет модифицировать последние, не внося изменений в программный код.

Онтологии, создаваемые на их основе БД/БЗ, а также программные компоненты для их обработки имеют единое декларативное семантическое представление в виде графов понятий [21]. Для формального представления онтологий используется *язык описания онтологий* для орграфовой связной двухуровневой модели информационных единиц [22, 23]. Язык предоставляет средства спецификации моделей онтологий в форме размеченных корневых иерархических бинарных орграфов. Формируемая на основе моделей онтологий семантическая информация представляется такого же вида орграфами, за исключением того, что в них отсутствует разметка, определяющая правила формирования орграфов целевой информации.

Состав ансамбля связанных ОМ определяется следующими факторами. Прежде всего, необходимо обеспечить возможность структуризации и формализации всей необходимой информации о проводимых технологических операциях (ТО) ЛАП, а также о характеристиках используемых материалов и оборудования. Должна быть обеспечена возможность формирования комплекса связанных БД и справочников, содержащих информацию о характеристиках *обрабатываемых и расходных материалов* АП, *установок* ЛАП и о *протоколах* проведённых ТО. В состав установок ЛАП входят: промышленные лазеры, укомплектованные лазерными оптическими головками; устройства, обеспечивающие перемещение головок относительно обрабатываемой поверхности и позиционирование деталей; порошковые питатели; узлы подачи материала в область сплавления/обработки и т.д. К обрабатываемым и расходным материалам относятся: металлические порошки и проволоки на основе различных сплавов; технологические газы, используемые в качестве транспортирующего, защитного и обжимающего средства. В состав ансамбля ОМ входят онтологии соответствующих баз и справочников, а также онтология архива протоколов ТО лазерной обработки.

Подходы и методы, которые предлагается использовать для выдачи инженерам-технологам рекомендаций по настройке режимов выполнения ТО, включают: дедуктивный логический вывод на основе известных формализованных знаний и фактов; рассуждения по аналогии с использованием накапливаемой базы прецедентов (протоколов выполненных ТО); численное моделирование физических и химических термодинамических процессов, происходящих в области взаимодействия сфокусированного лазерного пучка с обрабатываемым материалом. В становлении и развитии методов прогнозирования качественных харак-

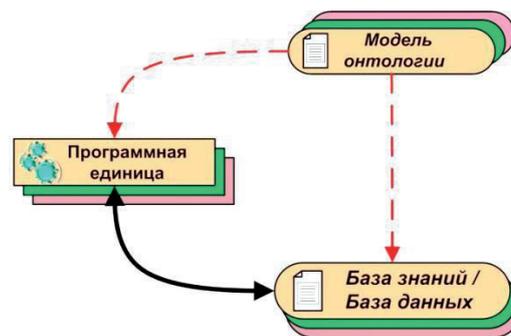


Рисунок 1 – Онтологический двухуровневый подход к формированию данных и знаний: отделение предметных знаний от знаний о методах решения задач

теристик деталей, синтезируемых в процессе *DED-LB*, численное моделирование является надёжным и относительно дешёвым [24]. В состав ансамбля ОМ входят: *онтология БЗ о настройках режимов лазерной обработки*; *онтология базы прецедентов* и *онтология базы математических моделей* термодинамических процессов, сопровождающих технологию *DED-LB*. База математических моделей предназначена для хранения программных реализаций расчётов значений параметров моделируемых процессов. При формировании знаний и прецедентов используются термины и содержание комплекса связанных БД и справочников.

Важным фактором является обеспечение бóльшей модульности и повторной используемости БД и справочников, а также возможности их независимого формирования разными предметными специалистами (по лазерной физике, материаловедению, оптике и др.).

Набор таких онтологий описан в [25]. Их апробация специалистами позволила обозначить пути усовершенствования разработанных онтологий: уточнение и расширение их содержательной составляющей, расширение спектра моделей онтологий в целом, дальнейшая модификация и развитие отдельных ОМ путём их модуляризации.

2 Результаты

Проведён системный анализ, структуризация и формализация области профессиональной деятельности инженеров-технологов ЛАП, относящейся к проектированию режимов выполнения ТО. Уточнены характеристики компонентов лазерного робототехнического комплекса (установки АП), а также обрабатываемых и расходных материалов, которые могут оказывать влияние на ход выполнения и результат технологического процесса ЛАП. Реструктурирован и расширен ансамбль ОМ для обеспечения интеллектуальной поддержки принятия решений инженерами-технологами при проектировании режимов ТО ЛАП.

Перечень входящих в состав ансамбля моделей онтологий показан на рисунке 2.

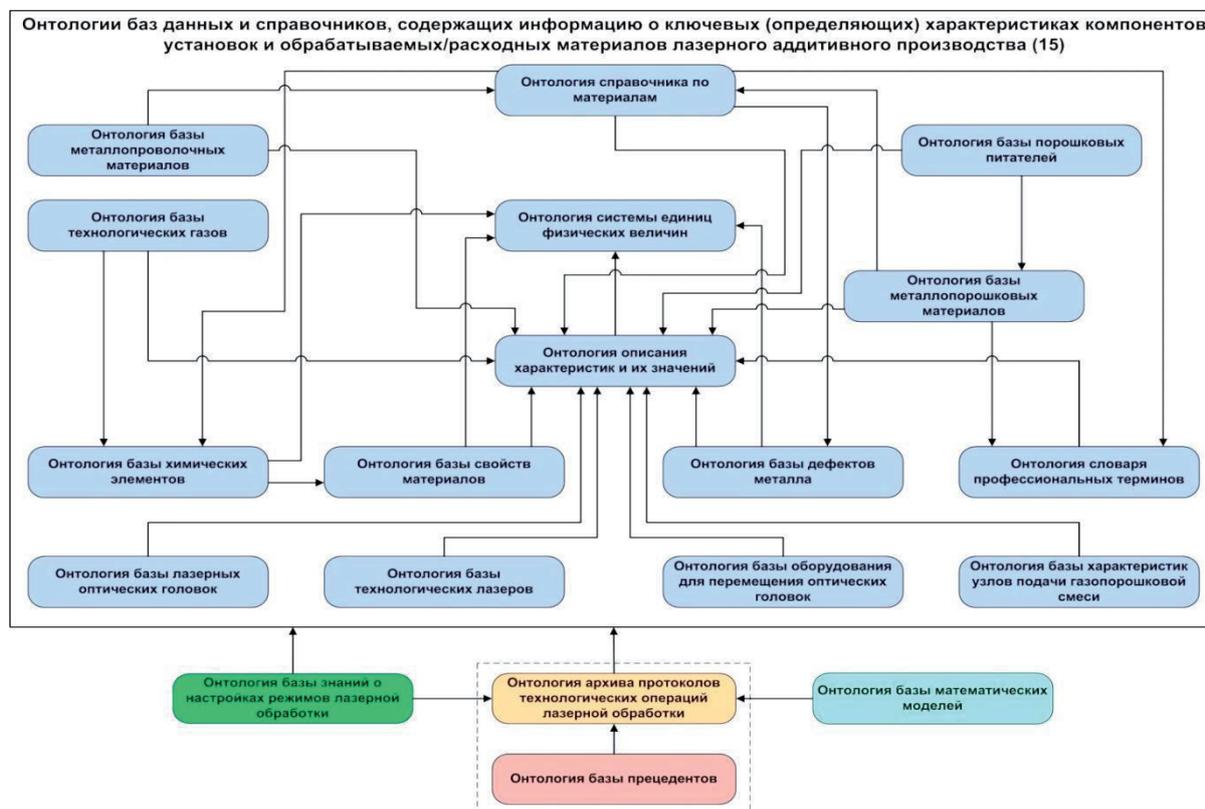


Рисунок 2 – Состав ансамбля онтологических моделей

Стрелки на рисунке 2 отражают направленные связи между онтологиями. Эти связи (см. рисунок 3¹) могут быть двух типов.

Структурная связность. Такие связи между понятиями онтологий определяют повторную использование в некотором орграфе онтологии подграфов орграфов других онтологий. Такие подграфы могут представлять собой как единственную терминальную вершину, так и орграф в целом. На рисунке 3а связи данного типа представлены пунктирными дугами $a_2 \rightarrow b_2$ и $a_6 \rightarrow b_4$. Вершины b_2, b_4, b_5, b_6 принадлежат орграфу онтологии O_2 , но становятся достижимы и тем самым логически включены и в состав орграфа онтологии O_1 .

Терминологическая связность.

Такие связи задаются для меток понятий онтологий и определяют факт заимствования меток некоторыми вершинами орграфа (которые в таком случае собственных меток не имеют) от других вершин, метки которых являются собственными. На рисунке 3б связи данного типа представлены штрихпунктирными стрелками, выходящими из вершин, не имеющих собственных меток, и входящими в вершины с собственными метками – d_2 и d_4 соответственно.

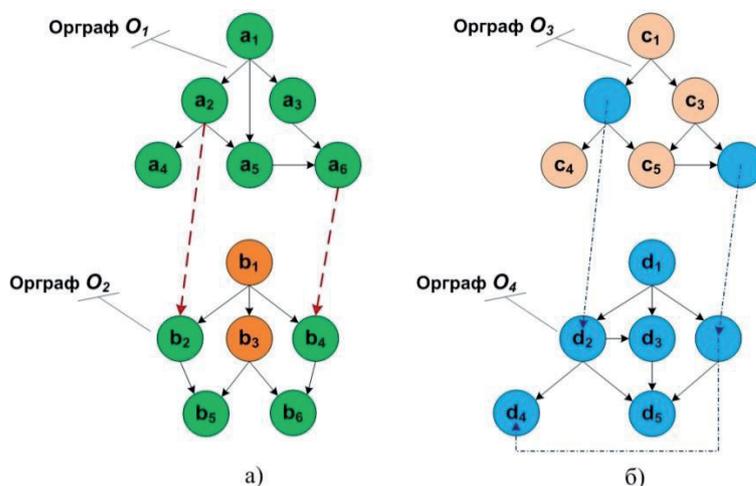
Терминологическая связность (рисунок 3б) имеет следующие особенности.

- Это связи типа «один-ко-многим»: метка одной вершины может заимствоваться множеством отличных от неё вершин.
- Вершина с собственной меткой и вершины с заимствованными от неё метками могут принадлежать как разным орграфам, так и одному орграфу. При этом между вершиной с собственной меткой и вершиной, которая эту метку заимствует, путь в орграфе может существовать или отсутствовать.
- Заимствование метки может быть как непосредственным, так и опосредованным. В первом случае для пары вершин одна из них обязательно имеет собственную метку, а другая её заимствует. Этот случай представлен вершиной с собственной меткой d_2 и вершиной, являющейся прямым потомком вершины c_1 . Во втором случае вершина, метка которой заимствуется, также может не иметь собственной метки, а заимствовать метку другой вершины. Такая ситуация является итеративной, а условием завершения является наступление первого случая. Второй случай представлен двухшаговой итерацией, которая завершается в ситуации, когда одной из вершин в паре становится вершина с меткой d_4 . Естественное ограничение здесь состоит в том, что последовательность таких связей не должна образовывать цикл.

Связи второго типа позволяют обеспечить терминологическую согласованность онтологий. Две и более ОМ могут иметь между собой связи обоих типов. Формируемый на основе онтологий ансамбль орграфов целевой информации имеет такого же типа связи, а их создание регламентируется разметкой дуг орграфов онтологий [22, 23].

2.1 Онтологии справочных баз по оборудованию и материалам

Фрагмент онтологии базы технологических лазеров и фрагмент формируемой на её основе базы показаны на рисунке 4.



а) структурная связность; б) терминологическая связность

Рисунок 3 – Схематическое представление двух типов связей между орграфами онтологий

¹ Разметка дуг орграфов на рисунке не приведена, чтобы не усложнять его несущественными деталями.



Рисунок 4² – Фрагмент онтологии базы технологических лазеров (а) и фрагмент формируемой на её основе базы технологических лазеров (б)

На этом и аналогичных рисунках далее символ → отражает структурную связность между орграфами моделей онтологий, а символ ↑ – терминологическую связность между вершинами орграфов моделей онтологий, а также между вершинами орграфов целевой информации. Символ *, стоящий рядом с меткой вершины, означает, что эта метка заимствуется некоторым множеством вершин. Символ <=> обозначает тот факт, что в вершину, рядом с меткой которой он отображается, входит более одной дуги. Вершина-начало такой дуги может принадлежать как этому же, так и другому орграфу. Присутствующая в орграфах моделей онтологий разметка типа {СПИСОК}, {АЛЬТЕРНАТИВА}, (= 'copy'), ([=] 'copymm'), (! 'one'), ([!] 'onemm'), (+ 'set'), ([=] 'setmm'), (~'proxy'), (new), (ref), (clone), (all) и т.д. задаёт правила формирования орграфов целевых информационных баз и справочников. Семантика данной разметки, а также основанные на ней правила формирования описаны в [22, 23].

Ключевыми для компонентов установки и материалов ЛАП считаются те характеристики, которые являются *существенными* при их использовании в технологических процессах.

² На данном рисунке, а также на рисунках 5-10 изображён интерфейс инструментального средства облачной платформы IASaaS (<https://iasraas.dvo.ru/>). Редактор орграфов используется для формирования онтологий и БД/БЗ в информационном хранилище платформы.

К таким характеристикам относятся: *длина волны излучения, режим генерации излучения* (непрерывный, непрерывный с возможностью модуляции, импульсный), *максимальная выходная мощность излучения; совместимое рабочее волокно*, ключевой характеристикой которого является *диаметр*. Ключевыми характеристиками импульсного и модулированного (квазинепрерывного) излучения являются *частота следования импульсов (частота модуляции, соответственно) и длительность импульса*.

Фрагмент онтологии справочника по материалам и фрагмент формируемого на её основе справочника показаны на рисунке 5.

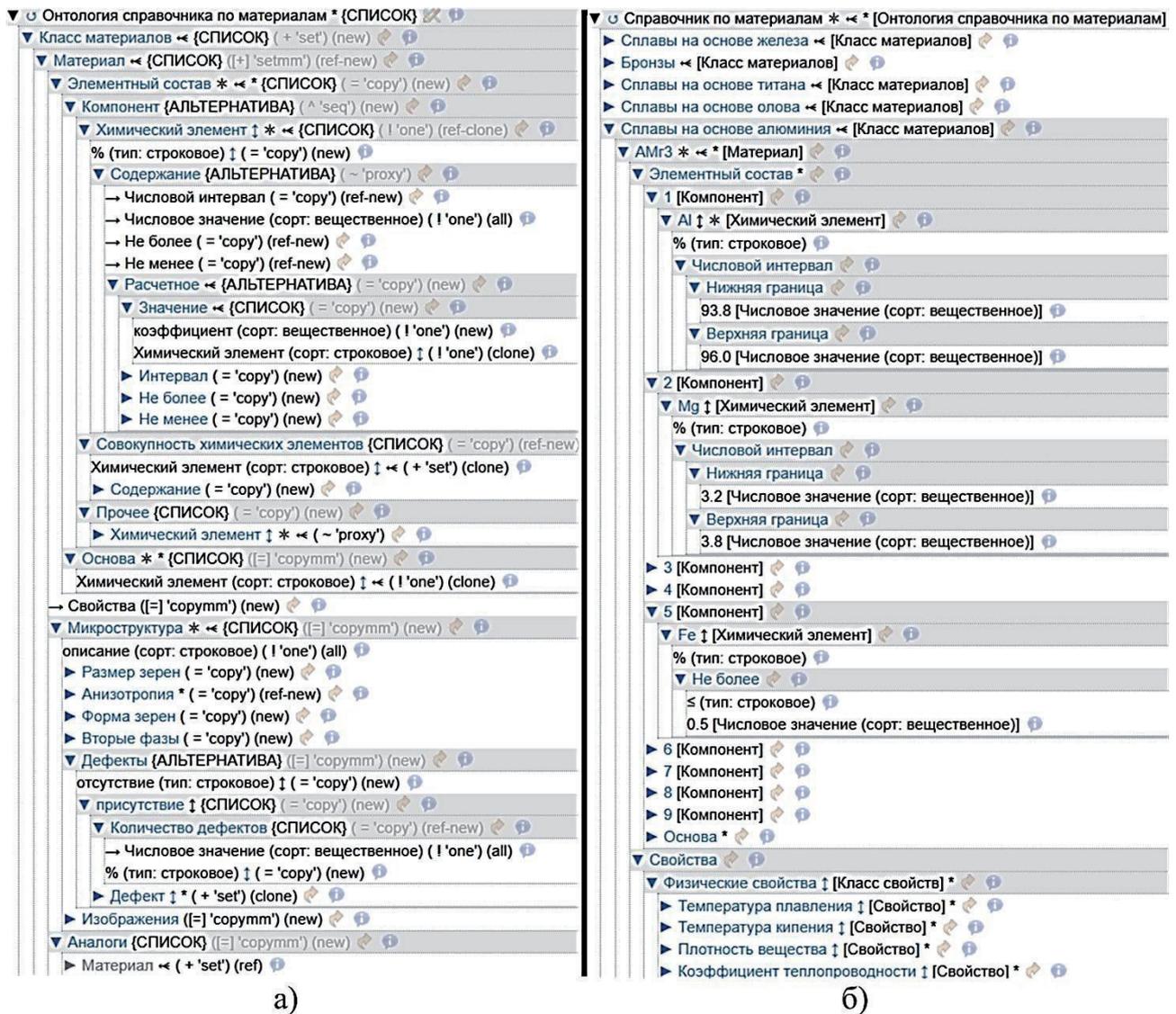


Рисунок 5 – Фрагмент онтологии справочника по материалам (а) и фрагмент формируемого на её основе справочника по материалам (б)

Материал характеризуется своим *элементным (химическим) составом* и их процентным содержанием. Процентное содержание может быть указано не для одного, а для совокупности химических элементов. Большое значение имеют *свойства* материала (физические, механические, эксплуатационные и т.п.), а также его *микроструктура*. Свойство характеризуется названием, областью возможных значений, может иметь синонимичные названия и перечень единиц измерения. Значение свойства может быть числовым или качественным, мно-

жеством значений, числовым интервалом. Свойство может быть простым или иметь множество характеристик. По структуре характеристика подобна свойству и является рекурсивной, т.е. содержит, возможно пустое, множество подобных вложенных характеристик (рисунок 6).

Микроструктура характеризуется размером зёрен, их формой (полигональная, дендритная, полиэдрическая, сфероидальная и т.п.) и преимущественной ориентацией, присутствием или отсутствием вторых фаз, а также наличием или отсутствием характерных для микроструктуры материала дефектов. При наличии вторых фаз задаётся их процентное содержание, форма и размер зёрен. При наличии дефектов указывается их общее количество в процентном содержании, а структура описания каждого дефекта полностью совпадает со структурой описания свойства материала. Для микроструктуры имеется возможность хранить её изображения. Важной информацией о материале является перечень его *аналогов*, если таковые имеются.

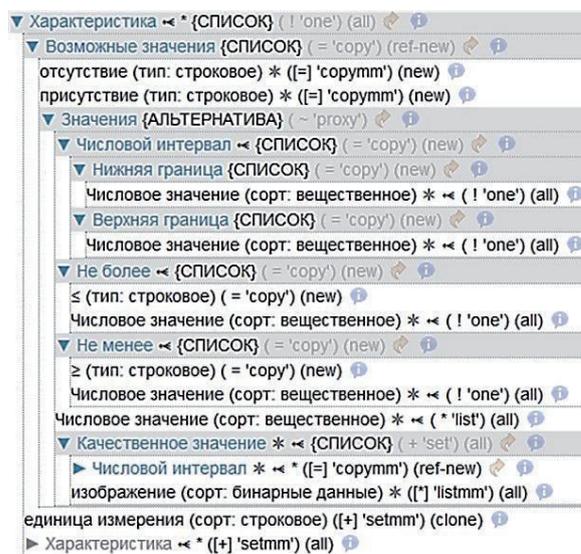


Рисунок 6 – Фрагмент онтологии описания характеристик и их значений:
структура раздела *Характеристика*

2.2 Онтология базы прецедентов

По результатам первичной апробации существенно переработана и расширена *онтология архива формализованных протоколов ТО лазерной обработки* [25]. В данной онтологии используются фрагменты онтологий справочных баз по оборудованию и материалам (рисунок 7). Протокол ТО включает следующие разделы: общие сведения о ТО; условия окружающей среды при выполнении ТО; техническое задание (ТЗ) на выполнение ТО; оборудование для выполнения ТО; информация о: предварительной подготовке подложки или детали; создаваемой рабочей газовой среде; ключевых параметрах выполнения ТО; возможном контролируемом охлаждении детали/заготовки; результате выполнения ТО.

Общие сведения о ТО включают название ТО, номер протокола, срок, цель и место выполнения ТО. К *условиям окружающей среды* относятся температура, относительная влажность и атмосферное давление среды, в которой выполнялась ТО. Данная информация является значимой, поскольку для технологического оборудования должны быть обеспечены условия, при которых его рабочая температура будет выше температуры «точки росы».

ТЗ на выполнение ТО включает следующие разделы: *требования к результату ТО*; *объект обработки* – подложка или деталь; *материал для выполнения ТО* – металлический порошок (их может быть более одного) или металлическая проволока; используемые для выполнения ТО *технологические газы*.

Раздел с требованиями к результату ТО состоит из следующих подразделов: *геометрические характеристики*, *дефекты*, *элементный состав*, *микроструктура* и *свойства* нанесённого материала.

Данные разделы заполняются или могут остаться незаполненными в зависимости от выполняемой задачи. В соответствии с ГОСТ Р 70242-2022³ выделяют четыре их типа: изготовление новой детали/заготовки, восстановительный ремонт изношенной или поврежденной

³ ГОСТ Р 70242-2022. Аддитивные технологии. Изготовление металлических изделий методом прямого подвода энергии и материала. Общие рекомендации по проектированию и изготовлению. Дата введения 2022-12-01.

детали, нанесение функционального покрытия на деталь/заготовку (модификация поверхности), нанесение (наращивание) функциональных или конструктивных элементов на деталь/заготовку. К отдельному типу выполняемых задач можно отнести проведение работ научно-исследовательского, поискового характера, направленных на выявление и отработку пригодных для конкретного практического применения режимов выполнения ТО.

▼ **Онтология архива протоколов технологических операций лазерной обработки** * << * {СПИСОК} ⓘ ⓘ

▼ **Класс процессов лазерной обработки** ↑ * << {СПИСОК} (+ 'set') (clone) ⓘ ⓘ

▼ **Технологическая операция** * << * {СПИСОК} ([+] 'setmm') (ref-new) ⓘ ⓘ

- номер протокола технологической операции (сорт: строковое) * (! 'one') (new) ⓘ
- ▶ Срок выполнения технологической операции (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Цель выполнения технологической операции (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Место выполнения технологической операции (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Условия окружающей среды при выполнении технологической операции * * (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ

▼ **Техническое задание на выполнение технологической операции** * {СПИСОК} (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ

- ▼ **Требования к результату операции** * * {СПИСОК} (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
 - ▶ Геометрические характеристики * << * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
 - ▶ Дефекты наплавленного материала * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
 - Элементный состав * ([=] 'copymm') (ref-new) ⓘ ⓘ
 - Микроструктура ([=] 'copymm') (ref-new) ⓘ ⓘ
 - ▶ Свойства ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
- ▼ **Объект обработки {АЛЬТЕРНАТИВА}** ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
 - ▶ Деталь * * (! 'one') (ref-new) ⓘ ⓘ
 - ▶ Подложка * << (= 'copy') (ref-new) ⓘ ⓘ
- ▼ **Материал для выполнения технологической операции {АЛЬТЕРНАТИВА}** ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
 - Металлический порошок * (+ 'set') (ref) ⓘ ⓘ
 - Металлическая проволока * (! 'one') (ref) ⓘ ⓘ
 - ▶ Технологические газы ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ

▼ **Предложенные СППР средства и параметры выполнения технологической операции** * << {СПИСОК} ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ

- ▶ Оборудование для выполнения технологической операции * * (= 'copy') (ref-new) ⓘ ⓘ
- ▶ Предварительная подготовка подложки * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Предварительная подготовка детали * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Газовая среда в рабочей камере * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ

▼ **Ключевые параметры выполнения технологической операции** * * {СПИСОК} (= 'copy') (ref-new) ⓘ ⓘ

- ▼ **Параметры лазерного излучения** * {СПИСОК} (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
 - ▶ Режим генерации излучения ↑ (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
 - ▶ Мощность * (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
 - ▶ Диаметр пятна лазерного пучка на обрабатываемой поверхности * * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
 - ▶ Плотность мощности * * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Параметры подачи технологических газов * (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Параметры подачи материала * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Параметры перемещения и позиционирования рабочего инструмента относительно обрабатываемой поверхности * * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Контролируемое охлаждение * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ

▶ Выбранные оператором средства и параметры выполнения технологической операции * (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ

▼ **Результат выполнения технологической операции** * {СПИСОК} (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ

- ▶ Описание * (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Оценка * (= 'copy') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Файлы с изображениями результата операции ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ
- ▶ Файлы управляющих программ для лазерного робототехнического оборудования * ([=] 'copymm') (new) ⓘ ⓘ

Рисунок 7 – Фрагмент онтологии архива протоколов технологических операций лазерной обработки

В разделе *геометрические характеристики* помещается файл, описывающий электронную (цифровую) геометрическую модель детали, или указывается множество размеров значимых геометрических характеристик результата ТО, по которым его нужно будет оценивать. В разделе *дефекты* перечисляются, какие дефекты (и их характеристики), в каких пределах допустимы, а какие должны отсутствовать. В разделе *элементный состав* может быть задан элементный (химический) состав, который необходимо/желательно в результате получить. В разделе *микроструктура* может быть специфицирована предпочтительная микро-

структура нанесённого материала. В разделе *свойства* могут быть перечислены требования к характеристикам (свойствам), которые необходимо получить в результате выполнения ТО.

Заданная в онтологии разметка регламентирует то, что названия химических элементов, дефектов, свойств (и их характеристик) и т.п., а также единицы их измерения при формировании протокола должны *выбираться* из соответствующих справочных баз. Дополнительные онтологические соглашения состоят в том, что заданные значения дефектов, свойств и т.п. должны принадлежать областям возможных значений, которые определены для них в соответствующих справочных базах.

Существенными характеристиками подложки являются *материал*, из которого она изготовлена, её *геометрические характеристики* и *масса*. Для детали существенны те же характеристики, что и для подложки, но дополнительно учитывается, что материал рабочей поверхности детали может отличаться от материала её основы. Технологический газ может представлять собой как моногаз, так и многокомпонентную газовую смесь.

В разделе *оборудование для выполнения ТО* указывается оборудование, использованное для проведения ТО.

Раздел *предварительная подготовка подложки* заполняется, если объектом обработки является подложка, а не деталь. Если в ТЗ уже была задана информация о подложке, то здесь она не дублируется, а при необходимости (если перед началом процесса подложку следует нагреть до некоторой температуры с определённой скоростью) заполняется информация о *контролируемом нагреве* подложки. Если в ТЗ подложка не была специфицирована, то задаются те же характеристики подложки, которые были перечислены в разделе *ТЗ* на выполнение ТО. Контролируемый нагрев характеризуется *температурой*, до которой необходимо нагреть подложку, а также *скоростью нагревания*. Значением температуры, как правило, является числовой диапазон, который требуется поддерживать. Если в качестве объекта обработки в ТЗ была указана деталь, то в разделе *предварительная подготовка детали* может быть задана информация о *контролируемом нагреве* детали. Контролируемый нагрев требуется, прежде всего, для массивных деталей с высокой теплопроводностью, для приведения кристаллической структуры материала в определённое энергетическое состояние непосредственно перед его обработкой сфокусированным излучением.

Раздел *газовая среда в рабочей камере* заполняется, если при выполнении ТО создавалась «глобальная» (защитная) газовая среда в некоторой рабочей камере – в дополнение к защитному газу/газовой смеси, который доставляется через узел подачи газопорошковой смеси и формирует «локальную» защиту в зоне ванны расплава и кристаллизирующегося металла. Сведения о газовой среде в рабочей камере включают информацию о том, какой *наполняющий* технологический газ – моногаз или газовая смесь – использовался для создания среды, а также о таких параметрах как *объёмный расход*, *давление* и *температура* газа. В случае использования газовой смеси указывается процентное содержание – объёмная доля каждого моногаза в ней.

Раздел *ключевые параметры выполнения ТО* состоит из четырёх подразделов: *параметры лазерного излучения*; *параметры подачи технологических газов*; *параметры подачи материала* и *параметры перемещения и позиционирования рабочего инструмента относительно обрабатываемой поверхности*. К ключевым параметрам лазерного излучения относятся: *режим генерации излучения* (непрерывный, модулированный, импульсный), его *мощность*, *диаметр пятна лазерного пучка на обрабатываемой поверхности*. Для модулированного и импульсного режимов важными характеристиками также являются *длительность импульса* и, соответственно, *частота модуляции выходной мощности/следования импульсов*.

Раздел *параметры подачи технологических газов* состоит из трёх подразделов: *параметры защитной газовой среды* (обеспечивающей «локальную» защиту зоны ванны расплава и

кристаллизирующегося металла), *параметры транспортирующего газа* и *параметры обжимающего газа*. Структура информации для описания защитной газовой среды совпадает со структурой информации для описания газовой среды, создаваемой в рабочей камере. Транспортирующий и обжимающий газы представляют собой моногазы, их ключевыми параметрами также являются объёмный расход, давление и температура.

Раздел *параметры подачи материала* включает два альтернативных подраздела: *металлопорошковый материал* и *металлопроволочный материал*. Сведения о металлопорошковом материале включают информацию о том, какой металлический порошок или композиция металлических порошков использовались в качестве материала для выполнения ТО, а также о таких параметрах, как *массовый расход* и, опционально, *количество оборотов дозирующего диска порошкового питателя*. В случае использования композиции металлических порошков эти параметры задаются для каждого её компонента. В этом случае металлические порошки не смешиваются в одном бункере порошкового питателя, а подаются отдельно. Сведения о металлопроволочном материале включают в себя информацию о том, какая проволока использовалась в качестве материала для выполнения ТО, а также о *скорости подачи* и *способе подачи* – центральная или боковая (в этом случае указывается также угол подачи).

К параметрам перемещения и позиционирования рабочего инструмента относительно обрабатываемой поверхности относятся: *линейная скорость перемещения сфокусированного лазерного пучка по обрабатываемой поверхности*; *угловая скорость вращения устройства позиционирования*; *расстояние от места фокусировки лазерного излучения до обрабатываемой поверхности*; *шаг смещения центра сфокусированного лазерного пучка относительно центра предварительно созданного валика*; *стратегия перемещения/сканирования* и т.п.

Раздел *контролируемое охлаждение* заполняется, если после завершения ТО следует контролировать остывание детали (заготовки), т.е. охлаждать до некоторой температуры с определённой скоростью. Контролируемое замедленное охлаждение может использоваться для того, чтобы предотвратить или снизить вероятность образования различного вида дефектов наплавки (сварки). Структура данного раздела совпадает со структурой раздела *контролируемый нагрев*.

Раздел *результат выполнения ТО* включает *описание* полученного результата и его *оценку*. Описание результата содержит те же подразделы, что и раздел с требованиями к результату ТО – *геометрические характеристики*, *дефекты*, *элементный состав* и *микроструктура* нанесённого материала. В оценке результата каждого из перечисленных разделов (подразделов) указывается, соответствует ли он специфицированным в ТЗ требованиям и, если не соответствует, то указывается, считать этот результат положительным или отрицательным. Оценка соответствия *свойств* осуществляется после выполнения мероприятий по постобработке, которые оказывают положительное влияние на микроструктуру, а также исключают или позволяют значительно снизить вероятность образования дефектов нанесённого материала. К таким мероприятиям относятся различные виды термической, механической или химической обработки. Данный раздел содержит подразделы, в которые могут быть помещены *файлы с изображениями результата* и *файлы управляющих программ для лазерного робототехнического оборудования*.

На рисунке 8 представлен фрагмент *архива протоколов ТО лазерной обработки*, в частности, фрагмент протокола ТО «Выращивание из магниевого порошка марки МПФ-4 имплантата на подложке из сплава марки МА20». В качестве наполняющего технологического газа в рабочей камере использовался моногаз *аргон*. В качестве защитной газовой среды, обеспечивающей защиту зоны ванны расплава, и в качестве транспортирующего газа использовался моногаз *гелий*. Обжимающий газ не требовался, поскольку использовался узел с *четырёхсторонней* подачей металлического порошкового материала в зону обработки.



Рисунок 8 – Фрагмент архива протоколов технологических операций лазерной обработки (фрагмент протокола ТО «Выращивание из магниевого порошка марки МПФ-4 имплантата на подложке из сплава марки МА20»)

В соответствии с переработанной *онтологией архива протоколов ТО лазерной обработки* была модифицирована и *онтология базы прецедентов* [25]. Она определяет структуризацию базы прецедентов – протоколов проведённых ТО, иерархически сгруппированных по видам обрабатываемых материалов, типам выполняемой задачи, а также распределённых по классам прецедентов в зависимости от трёх факторов: предложенных СППР параметров выполнения ТО, фактически выбранных технологом (оператором) параметров выполнения ТО и результата выполнения ТО (рисунок 9).

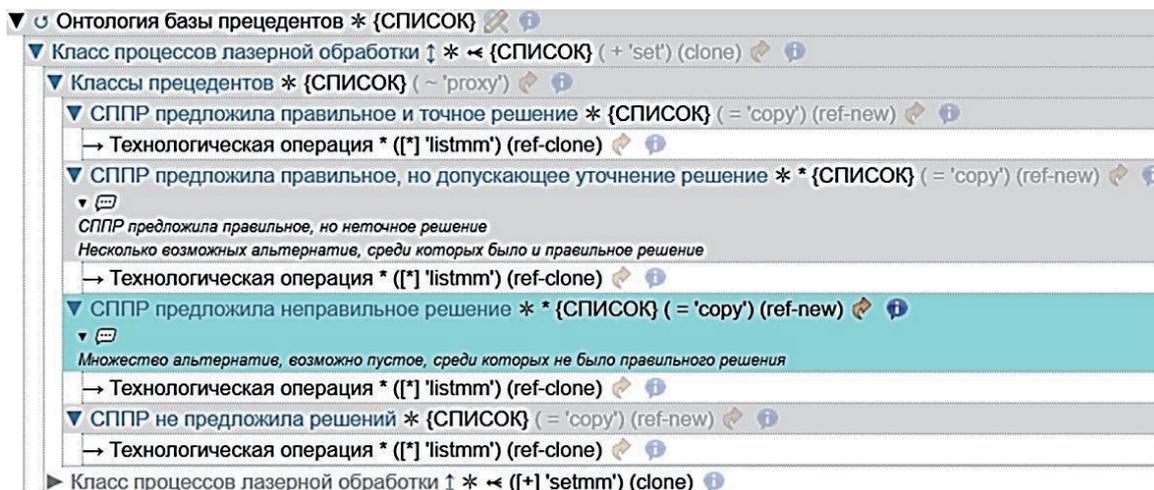


Рисунок 9 – Онтология базы структурированных прецедентов

2.3 Онтология базы знаний

Для формирования знаний, на основе которых принимаются решения о практически пригодных режимах лазерной обработки, в состав ансамбля ОМ входит *онтология базы знаний о настройках режимов лазерной обработки*. На рисунке 10 показан фрагмент данной онтологии, а также фрагмент формируемой на её основе БЗ. В онтологии БЗ повторно используются фрагменты онтологий справочных баз по оборудованию и материалам, а также *онтологии архива протоколов ТО лазерной обработки*.

По аналогии с принципом структурной организации архива протоколов ТО знания (руководства) по настройке режимов проведения ТО иерархически структурируются по видам обрабатываемых материалов и типам выполняемых задач. Далее задаётся многоуровневый комплекс параметров, определяющих режим проведения ТО. Этот комплекс формируется в соответствии с комплексом параметров, описанных в *онтологии архива протоколов ТО лазерной обработки*. Названия параметров в онтологии БЗ соответствуют названиям параметров, описанных в онтологии архива протоколов ТО, за счёт установления между ними терминологической связности.

Для каждого ключевого параметра процесса лазерной обработки задаётся множество правил установки его возможных значений. В antecedенте продукционных правил специфицируются условия, влияющие на установку значений параметра. Каждое условие представляет собой перечень проверяемых на совпадение критериев с определённым правилом выбора – «все критерии» или «не менее указанного количества». Под критерием понимается любой элемент из протокола ТО лазерной обработки или из справочных баз по оборудованию и материалам, влияющий на установку значения параметра. Значениями критерия могут быть количественные или качественные значения, в том числе представляющие собой элементы справочных баз по оборудованию и материалам. Значение критерия может быть составным: представлять собой некоторую характеристику или блок вложенных характеристик (см. подраздел 2.1). Блоки критериев могут объединяться в группы блоков – множества блоков критериев, связанных между собой логическими связками «И», «ИЛИ», «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ».

В консеквенте продукционных правил указываются возможные значения соответствующих параметров. Значение параметра принадлежит области возможных значений этого параметра, определённой в онтологии архива протоколов ТО лазерной обработки.



Рисунок 10 – Фрагмент онтологии базы знаний о настройках режимов лазерной обработки (а) и фрагмент формируемой на её основе базы знаний (б)

С целью уточнения и верификации решений – значений параметров процесса, получаемых на основе методов искусственного интеллекта (ИИ - рассуждений на основе БЗ и прецедентов), предложена и отработана (на примере программной системы *Wolfram Mathematica*⁴) методика взаимодействия реализующих эти методы программных компонентов со сторонними программными системами, позволяющими выполнить численное моделирование термодинамических процессов, сопровождающих технологию *DED-LB*. Онтология базы математических моделей, в которой предложено хранить программные реализации (а также некоторую метаинформацию о них) численных расчётов значений параметров моделируемых процессов, представлена в работе [26].

⁴ Wolfram Mathematica. The world's definitive system for modern technical computing. <https://www.wolfram.com/mathematica/index.php.en?source=footer>.

2.4 Построение ансамбля ОМ

Для построения ансамбля ОМ используется облачная платформа *IACaaS* (<https://iacraas.dvo.ru>), предназначенная для создания, управления и удалённого использования интеллектуальных облачных сервисов и тематических порталов знаний [27]. Технологии и инструментальные средства платформы обеспечивают поддержку полного цикла разработки графовых БЗ, баз и репозиториях данных, а также основанных на них СППР как облачных сервисов, к которым может быть организован совместный удалённый доступ. Инструментарий учитывает специфику систем с БЗ (в частности, ориентирован на специалистов разных типов – предметных экспертов, инженеров знаний, разработчиков программного обеспечения), позволяет упростить и автоматизировать процесс их разработки, снизить трудозатраты по сопровождению.

На платформе создан и развивается портал знаний о ЛАП, предназначенный для выявления и отработки пригодных для практического применения технологических режимов [28]. Разработанный ансамбль ОМ и формируемые на его основе БД и БЗ входят в состав информационного наполнения данного портала.

Для формирования ансамбля ОМ на портале знаний используется инструментальное средство платформы «Редактор орграфов», являющееся интерпретатором языка описания онтологий (метаинформации), спецификация которого хранится в фонде (структурированном хранилище) платформы *IACaaS*. Данный редактор позволяет упростить разработку моделей онтологий, обеспечивая их интерактивное формирование и избавляя разработчиков от необходимости изучать синтаксис языка описания онтологий.

Экспертное формирование и сопровождение всех БД и БЗ на портале выполняется с использованием соответствующих специализированных онтолого-ориентированных редакторов, получаемых на основе инструментального средства «Редактор орграфов», путём подключения к нему соответствующей управляющей модели онтологии (рисунок 11).

Все управляемые онтологиями редакторы для формирования и сопровождения БД и БЗ портала обладают следующими особенностями:

- процесс редактирования управляется онтологией, пользовательский интерфейс генерируется на основе онтологии;
- при изменении онтологии пользовательский интерфейс и процесс редактирования адаптируются автоматически (при необходимости соответствующая база также приводится в согласованный с изменённой онтологией вид автоматически).

Наряду с интерактивным формированием БД, БЗ и онтологии средствами платформы могут экспортироваться/импортироваться в формате *JSON*⁵.

Для обеспечения интернационализации онтологий, БД и БЗ к ним подключены предварительно сформированные на портале специального вида информационные ресурсы, содержащие перевод терминов онтологий, а также предметных БД и БЗ. В настоящее время переводы выполнены на английский язык. При просмотре и редактировании соответствующего информационного компонента портала его содержимое и пользовательский интерфейс соот-

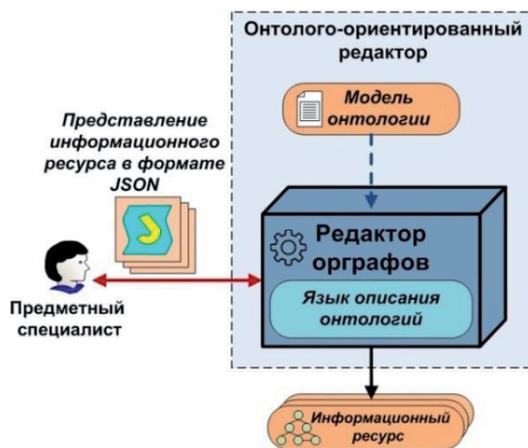


Рисунок 11 – Схема формирования информационного ресурса по его онтологии

⁵ *JSON* (англ. *JavaScript Object Notation*) — это текстовый формат обмена данными, основанный на *JavaScript*.

ветствующего редактора отображаются на выбранном пользователем на *web*-сайте платформы *IASPaas* на русском или английском языке.

3 Обсуждение

Проектирование и разработка СППР для инженеров-технологов ЛАП на основе онтологий, имеющих единое декларативное семантическое представление, позволяет достичь следующие цели. Во-первых, это обеспечение концептуального базиса, создающего возможность структуризации, унификации и стандартизации спецификаций при разработке интегрируемых друг с другом моделей ЛАП. Во-вторых, обеспечение возможности междисциплинарной кооперации – непосредственного скоординированного участия в этом процессе разных предметных специалистов, а не только разработчиков программного обеспечения [28–30]. В-третьих, применение онтологического двухуровневого подхода к формированию семантической информации направлено на обеспечение:

- возможности формирования БД и БЗ в понятных предметным специалистам концептуальном представлении и терминологии;
- масштабируемости и оперативной расширяемости СППР без участия программистов: появление новых видов расходных материалов, лазерного и другого технологического оборудования, расширение номенклатуры обрабатываемых деталей, расширение/модификация БЗ, не должны (в большинстве случаев) приводить к внесению изменений в разрабатываемые онтолого-ориентированные алгоритмы интерпретации целевых баз, выполняющие рассуждения на основе зафиксированных в онтологиях понятий и отношений.

Так обеспечивается одно из ключевых требований к программным системам – их жизнеспособность.

Одной из нерешённых в рамках предлагаемого подхода задач остаётся высокая трудоёмкость формирования архива протоколов, БД и БЗ. В настоящее время они формируются только с использованием соответствующих специализированных редакторов. Поэтому одним из направлений развития является использование методов обработки естественного языка для автоматического извлечения релевантной информации из слабоструктурированных и неструктурированных текстов и формирования соответствующих информационных ресурсов. Другим направлением является создание интегрированной в ансамбль ОМ и методов генерации на её основе объяснений рекомендаций по настройке режимов работы лазерного робототехнического технологического оборудования, выдаваемых СППР. Такие объяснения должны соответствовать сформулированным Национальным институтом стандартов и технологий четырём принципам объяснимого ИИ [31] и в совокупности с рекомендациями могут быть использованы в качестве обоснованного руководства, помогающего инженерам-технологам принимать решения.

В качестве отдельного направления можно выделить работы, направленные на обеспечение возможности повторной используемости онтологий и их дальнейшее развитие и обобщение на другие виды плавления металлических материалов, в которых используются концентрированные потоки энергии (электрическая дуга, плазма, электронный луч и т.д.).

Заключение

В работе представлен ансамбль ОМ, положенный в основу разрабатываемой интеллектуальной СППР для специалистов, занимающихся настройкой режимов выполнения лазерных аддитивных технологических процессов категории *DED-LB* по изготовлению и обработке

металлических деталей. Описан состав комплекса ОМ, назначение отдельных его компонентов и возможные типы связей между ними.

В основу разработки комплекса моделей положен онтологический двухуровневый подход к представлению различного вида структурированной семантической информации. В данном подходе ОМ отделены от формируемых на их основе БД и БЗ (целевой информации), а онтология определяет правила структурированного формирования целевой информации и её интерпретации.

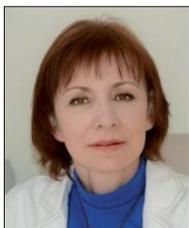
Для реализации ансамбля ОМ использованы инструментальные средства облачной платформы *IACPaas*. Онтологии и формируемые на их основе БД и БЗ входят в состав информационного наполнения портала знаний о ЛАП, который создан и развивается на этой платформе. Создаваемая СППР является частью программного наполнения портала, позволяющего аккумулировать и использовать знания и опыт, уменьшить число предварительных экспериментов, направленных на выявление практически пригодных технологических режимов, а также снизить требования к квалификации промышленных пользователей технологического оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Razvi S.S., Feng S., Narayanan A., Lee Y.T., Witherell P.** A Review Of Machine Learning Applications In Additive Manufacturing // In: Proc. of the ASME 2019 Int. Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Anaheim, CA, USA, August 18-21, 2019). ASME, 2019. P.1-10. DOI: 10.1115/DETC2019-98415.
- [2] **Piscopo G., Iuliano L.** Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119. P.6893-6917. DOI: 10.1007/s00170-021-08596-w.
- [3] **Svetlizky D., Zheng B., Vyatskikh A., Das M., Bose S., Bandyopadhyay A., Schoenung J.M., Lavernia E.J., Eliaz N.** Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials // Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 840. 142967. P.1-137. DOI: 10.1016/j.msea.2022.142967.
- [4] Распоряжение Правительства РФ от 14 июля 2021 г. № 1913-р «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г. // Правительство Российской Федерации: офиц. сайт. <http://static.government.ru/media/acts/files/1202107160042.pdf> (дата обращения: 06.05.2024).
- [5] **Thompson S.M., Bianc L., Shamsaeia N., Yadollahi A.** An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics // *Additive Manufacturing*. 2015. Vol. 8. P.36-62. DOI: 10.1016/j.addma.2015.07.001.
- [6] **Yadav S., Paul C.P., Jinoop A.N., Rai A.K., Bindra K.S.** Laser Directed Energy Deposition based Additive Manufacturing of Copper: Process Development and Material Characterizations // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 58. P.984-997. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.008.
- [7] **Caiazza F., Alfieri V.** Simulation of laser-assisted directed energy deposition of aluminum powder: prediction of geometry and temperature evolution // *Materials*. 2019. Vol. 12(13). 2100. P.1-22. DOI: 10.3390/ma12132100.
- [8] **Saboori A., Aversa A., Marchese G., Biamino S., Lombardi M., Fino P.** Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9(16). 3316. P.1-26. DOI: 10.3390/app9163316.
- [9] **Thomas D.S.** Economics of Additive Manufacturing // In: L. Bian, N. Shamsaei, J. Usher (eds.) *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties*. Boca Raton: CRC Press, 2017. 342 p. DOI: 10.1201/9781315151441-9.
- [10] **Qi X., Chen G., Li Y., Cheng X., Li Ch.** Applying Neural-Network-Based Machine Learning to Additive Manufacturing: Current Applications, Challenges, and Future Perspectives // *Engineering*. 2019. Vol. 5(4). P.721-729. DOI: 10.1016/j.eng.2019.04.012.
- [11] **Wang Y.B., Zheng P., Peng T., Yang H.Y., Zou J.** Smart additive manufacturing: Current artificial intelligence-enabled methods and future perspectives // *Science China Technological Sciences*. 2020. Vol. 63(9). P.1600-1611. DOI: 10.1007 / s11431-020-1581-2.
- [12] **Nagulin K., Iskhakov F., Shpilev A., Gilmutdinov A.** Optical diagnostics and optimization of the gas-powder flow in the nozzles for laser powder cladding // *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 108. P.310-320. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.07.001.

- [13] **Yang L., Hsu K., Baughman B., Godfrey D., Medina F., Menon M., Wiener S.** Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Springer, 2017. 168 p.
- [14] **Dehaghani S.M.H., Hajrahimi N.** Which factors affect software projects maintenance cost more? // *Acta Informatica Medica*. 2013. Vol. 21(1). P.63-66. DOI: 10.5455/AIM.2012.21.63-66.
- [15] **Islam M., Katiyar V.** Development of a software maintenance cost estimation model: 4th GL perspective // *International Journal of Technical Research and Applications*. 2014. Vol. 2(6). P. 65-68.
- [16] **Грибова В.В., Шалфеева Е.А.** Обеспечение жизнеспособности систем, основанных на знаниях // *Информационные технологии*. 2019. Т. 25, №12. С.738-746. DOI: 10.17587/it.25.738-746.
- [17] **Sanfilippo E.M., Belkadi F., Bernard A.** Ontology-based knowledge representation for additive manufacturing // *Computers in Industry*. 2019. Vol. 109. P.182-194. DOI: 10.1016/j.compind.2019.03.006.
- [18] **Ko H., Witherell P., Lu Y., Kim S., Rosen D.W.** Machine learning and knowledge graph based design rule construction for additive manufacturing // *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 37. 101620. P.1-32. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101620.
- [19] **Хорошевский В.Ф.** Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации // *Онтология проектирования*. 2019. Т. 9, №4. С.429-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [20] **Gandomi A., Haider M.** Beyond the hype: big data concepts, methods, and analytics // *International Journal of Information Management*. 2015. Vol. 35 (2). P.137-144. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007.
- [21] **Albagli-Kim S., Beimel D.** Knowledge Graph-Based Framework for Decision Making Process with Limited Interaction // *Mathematics*. 2022. Vol. 10(21). 3981. P.1-17. DOI: 10.3390/math10213981.
- [22] **Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M., Timchenko V.A.** A Two-level Model of Information Units with Complex Structure that Correspond to the Questioning Metaphor // *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2015. Vol. 49(5). P.172-181. DOI: 10.3103/S0005105515050052.
- [23] **Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M., Timchenko V.A.** A Model for Generation of Directed Graphs of Information by the Directed Graph of Metainformation for a Two-Level Model of Information Units with a Complex Structure // *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2015. Vol. 49(6). P.221-231. DOI: 10.3103/S0005105515060059.
- [24] **Bayat M., Dong W., Thorborg J., To A.C., Hattel J.H.** A review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modeling strategies // *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 47. 102278. P.1-25. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102278.
- [25] **Грибова В.В., Тимченко В.А.** Концепция поддержки лазерного аддитивного производства на основе онтологического подхода // *Онтология проектирования*. 2020. Т. 10, №2. С.176-189. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-2-176-189.
- [26] **Gribova V., Kulchin Y., Nikitin A., Velichko A., Basakin A., Timchenko V.** The Concept of Intelligent Support for Laser Additive Manufacturing Process Engineer // In: O. Dolinina, et al. (eds.): *Artificial Intelligence in Models, Methods and Applications*. AIES 2022. Studies in Systems, Decision and Control, vol. 457. Springer, Cham, 2023. P.355-368. DOI: 10.1007/978-3-031-22938-1_25.
- [27] **Gribova V.V., Moskalenko P.M., Timchenko V.A., Shalfeeva E.A.** The IACPaaS Platform for Developing Systems Based on Ontologies: A Decade of Use // *Scientific and Technical Information Processing*. 2023. Vol. 50(5). P.406-413. DOI: 10.3103/S0147688223050064.
- [28] **Qi Q., Pagani L., Scott P., Xiang J.** A categorical framework for formalising knowledge in additive manufacturing // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 75. P.87-91. DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.076.
- [29] **Roh B.M., Kumara S.R.T., Witherell P., Simpson T.W.** Ontology-based Process Map for Metal Additive Manufacturing // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30(12), P.8784-8797. DOI: 10.1007/s11665-021-06274-2.
- [30] **Li Z., Huang M., Zhong Y., Qin Y.** A Description Logic Based Ontology for Knowledge Representation in Process Planning for Laser Powder Bed Fusion // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(9). 4612. P.1-23. DOI: 10.3390/app12094612.
- [31] **Phillips P.J., Hahn C.A., Fontana P.C., Yates A.N., Greene K., Broniatowski D.A., Przybocki M.A.** Four Principles of Explainable Artificial Intelligence // NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) - 8312, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2021. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8312> (дата обращения: 06.05.2024).

Сведения об авторах



Грибова Валерия Викторовна, 1965 г. рождения. Окончила Ленинградский политехнический институт по специальности «Прикладная математика» в 1989 г. Заместитель директора по научной работе, научный руководитель лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН, д.т.н. (2008), чл.-корр. РАН (2022). Научные интересы: онтологии и базы знаний, прикладные и проблемно-ориентированные системы, основанные на знаниях, управление базами знаний. В списке научных трудов более 300 работ. AuthorID (РИНЦ): 7400; AuthorID (Scopus): 7801667631; ResearcherID (WoS): Q-4250-2016; ORCID: 0000-0001-9393-351X. gribova@iacp.dvo.ru. ✉.

Кульчин Юрий Николаевич, 1953 г. рождения. Окончил Московский инженерно-физический институт в 1976 г., д.ф.-м.н. (1991), профессор (1993), академик РАН (2011). Научный руководитель ИАПУ ДВО РАН. Специалист в области лазерной физики, лазерных технологий, фотоники нано- и микроструктур и нанотехнологий. В списке научных трудов более 700 работ. AuthorID (РИНЦ): 15230; Author ID (Scopus): 7003382956; Researcher ID (WoS): J-9058-2014; ORCID: 0000-0002-8750-4775. kulchin@iacp.dvo.ru.



Никитин Александр Иванович, 1955 г. рождения. Окончил Рязанское высшее военное командное училище связи в 1976 г., Сумский государственный университет в 1994 г. Технический директор Центра лазерных технологий ИАПУ ДВО РАН, ст. преподаватель базовой кафедры фотоники и цифровых лазерных технологий ДВФУ. В списке научных трудов более 40 работ в области лазерных технологий и управления техническими системами. Author ID (РИНЦ): 1137264; Author ID (Scopus): 57194274354; Researcher ID (WoS): AAD-8450-2022; ORCID: 0000-0003-2901-7482. nikitin.ai@dvfu.ru.

Тимченко Вадим Андреевич, 1983 г. рождения. Окончил Институт математики и компьютерных наук Дальневосточного государственного университета в 2005 г, к.т.н. (2011). Старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 90 работ в области искусственного интеллекта, систем, основанных на знаниях, специализированных программных моделей и систем. AuthorID (РИНЦ): 180470; Author ID (Scopus): 57201774103; Researcher ID (WoS): Q-4380-2016; ORCID: 0000-0002-1314-7656. vadim@iacp.dvo.ru.



Поступила в редакцию 15.05.2024, после рецензирования 4.06.2024. Принята к публикации 10.06.2024.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-279-300

An ensemble of ontological models for intelligent support of laser additive manufacturing processes

© 2024, V.V. Gribova^{1,2}✉, Yu.N. Kulchin¹, A.I. Nikitin^{1,2}, V.A. Timchenko^{1,2}

¹ Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russia

² Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok, Russia

Abstract

Barriers hindering the use of additive manufacturing processes for metal parts production are discussed. The necessity of integrating an intelligent decision support system (DSS) into the professional activities of laser additive manufacturing engineers is substantiated. The advantages of the developed ontological two-level approach for forming semantic information are highlighted. This approach's peculiarity lies in separating ontological models from the databases and knowledge formed on their basis—target information. The ontology dictates the rules for the structured formation and interpretation of target information. An ensemble of ontological models, forming the foundation of the developed intelligent system, is presented. The composition of the ensemble, the purpose of its individual components, and possible

types of connections between them are described. The ensemble includes ontologies for reference databases on equipment and materials for laser additive manufacturing, an archive of protocols for technological operations of laser processing, a knowledge base about settings for laser processing modes, and a database of mathematical models. The ensemble of ontological models is implemented on the IACPaaS cloud platform using its tools. Ontologies, databases, knowledge bases, and a decision support system are part of the Laser Additive Manufacturing Knowledge Portal. Accumulating and using the knowledge and experience from different technologists in the portal will reduce the number of preliminary experiments needed to identify suitable technological modes and lower the qualification requirements for users of technological equipment.

Keywords: *decision support, ontologies, ontological design, laser additive manufacturing, graph model, cloud platform.*

For citation: *Gribova VV, Kulchin YuN, Nikitin AI, Timchenko VA. An ensemble of ontological models for intelligent support of laser additive manufacturing processes [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(2): 279-300. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-2-279-300.*

Financial Support: The development of an ontological knowledge base for laser processing mode setting was carried out as part of the state assignment of Institute of Automation and Control of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (topic No FFW-2021-0004). The development of a set of related ontological resources was carried out under the state support program for the centers of the National Technology Initiative (NTI) on the basis of educational institutions of higher education and scientific organizations (NTI Center “Digital Materials Science: New Materials and Substances” at Bauman Moscow State Technical University).

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

- Figure 1 - An ontological two-level approach to the formation of data and knowledge: separation of domain knowledge from knowledge of problem solving methods
- Figure 2 - A composition of the ensemble of ontological models
- Figure 3 - Schematic representation of two types of connections between ontology digraphs: (a) - structural connectivity and (b) - terminological connectivity
- Figure 4 - A fragment of the technological laser database ontology (a) and a fragment of the database of technological lasers formed on its basis (b)
- Figure 5 - A fragment of the material data book ontology (a) and a fragment of the material data book formed on its basis (b)
- Figure 6 - A fragment of the ontology for describing characteristics and their values: *Characteristic* section structure
- Figure 7 - A fragment of the ontology for the archive of laser processing technological operation protocols
- Figure 8 - A fragment of the archive of laser processing technological operation protocols (a fragment of the “Growing an implant from MPF-4 magnesium powder on a substrate made of MA20 alloy” TO protocol)
- Figure 9 - Ontology of the database of structured precedents
- Figure 10 - A fragment of the ontology of knowledge bases on the settings of laser processing modes (a) and a fragment of the knowledge base formed on its basis (b)
- Figure 11 - A scheme for forming an information resource according to its ontology

References

- [1] *Razvi SS, Feng S, Narayanan A, Lee YT, Witherell P.* A Review Of Machine Learning Applications In Additive Manufacturing. In: Proc. of the ASME 2019 Int. Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Anaheim, CA, USA, 2019, August 18-21). ASME, 2019: 1-10. DOI: 10.1115/DETC2019-98415.
- [2] *Piscopo G, Iuliano L.* Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition. *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*. 2022; 119: 6893-6917. DOI: 10.1007/s00170-021-08596-w.
- [3] *Svetlizky D, Zheng B, Vyatskikh A, Das M, Bose S, Bandyopadhyay A, Schoenung JM, Lavernia EJ, Eliaz N.* Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials. *Materials Science and Engineering*. 2022; 840, 142967: 1-137. DOI: 10.1016/j.msea.2022.142967.
- [4] Order of the Government of the Russian Federation of July 14, 2021 No. 1913-r “On approval of the Strategy for the development of additive technologies in the Russian Federation for the period until 2030 [In Russian]. Government of the Russian Federation: official website. Available at <http://static.government.ru/media/acts/files/1202107160042.pdf> (accessed May 06, 2024).

- [5] **Thompson SM, Bianc L, Shamsaiea N, Yadollahi A.** An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. *Additive Manufacturing*. 2015; 8: 36-62. DOI: 10.1016/j.addma.2015.07.001.
- [6] **Yadav S, Paul CP, Jinoop AN, Rai AK, Bindra KS.** Laser Directed Energy Deposition based Additive Manufacturing of Copper: Process Development and Material Characterizations. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020; 58: 984-997. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.008.
- [7] **Caiazza F, Alfieri V.** Simulation of laser-assisted directed energy deposition of aluminum powder: prediction of geometry and temperature evolution. *Materials*. 2019; 12(13), 2100: 1-22. DOI: 10.3390/ma12132100.
- [8] **Saboori A, Aversa A, Marchese G, Biamino S, Lombardi M, Fino P.** Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. *Applied Sciences*. 2019; 9(16), 3316: 1-26. DOI: 10.3390/app9163316.
- [9] **Thomas DS.** Economics of Additive Manufacturing. In: L Bian, N Shamsaei, J Usher (eds.): *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties*. Boca Raton: CRC Press, 2017. 342 p. DOI: 10.1201/9781315151441-9.
- [10] **Qi X, Chen G, Li Y, Cheng X, Li Ch.** Applying Neural-Network-Based Machine Learning to Additive Manufacturing: Current Applications, Challenges, and Future Perspectives. *Engineering*. 2019; 5(4): 721-729. DOI: 10.1016/j.eng.2019.04.012.
- [11] **Wang YB, Zheng P, Peng T, Yang HY, Zou J.** Smart additive manufacturing: Current artificial intelligence-enabled methods and future perspectives. *Science China Technological Sciences*. 2020; 63(9): 1600-1611. DOI: 10.1007/s11431-020-1581-2.
- [12] **Nagulin K, Iskhakov F, Shpilev A, Gilmudinov A.** Optical diagnostics and optimization of the gas-powder flow in the nozzles for laser powder cladding. *Optics & Laser Technology*. 2018; 108: 310-320. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.07.001.
- [13] **Yang L, Hsu K, Baughman B, Godfrey D, Medina F, Menon M, Wiener S.** *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Springer, 2017. 168 p.
- [14] **Dehaghani SMH, Hajrahimi N.** Which factors affect software projects maintenance cost more? *Acta Informatica Medica*. 2013; 21(1): 63-66. DOI: 10.5455/AIM.2012.21.63-66.
- [15] **Islam M, Katiyar V.** Development of a software maintenance cost estimation model: 4th GL perspective. *International Journal of Technical Research and Applications*. 2014; 2(6): 65-68.
- [16] **Gribova VV, Shalfeeva EA.** Ensuring the viability of knowledge-based systems [In Russian]. *Information Technologies*. 2019; 25(12): 738-746. DOI: 10.17587/it.25.738-746.
- [17] **Sanfilippo EM, Belkadi F, Bernard A.** Ontology-based knowledge representation for additive manufacturing. *Computers in Industry*. 2019; 109: 182-194. DOI: 10.1016/j.compind.2019.03.006.
- [18] **Ko H, Witherell P, Lu Y, Kim S, Rosen DW.** Machine learning and knowledge graph based design rule construction for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2021; 37, 101620: 1-32. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101620.
- [19] **Khoroshevsky VF.** Ontology Driven Software Engineering: Models, Methods, Implementations [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 429-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [20] **Gandomi A, Haider M.** Beyond the hype: big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*. 2015; 35(2): 137-144. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007.
- [21] **Albagli-Kim S, Beimel D.** Knowledge Graph-Based Framework for Decision Making Process with Limited Interaction. *Mathematics*. 2022; 10(21), 3981: 1-17. DOI: 10.3390/math10213981.
- [22] **Gribova VV, Kleshchev AS, Moskalenko FM, Timchenko VA.** A Two-level Model of Information Units with Complex Structure that Correspond to the Questioning Metaphor. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2015; 49(5): 172-181. DOI: 10.3103/S0005105515050052.
- [23] **Gribova VV, Kleshchev AS, Moskalenko FM, Timchenko VA.** A Model for Generation of Directed Graphs of Information by the Directed Graph of Metainformation for a Two-Level Model of Information Units with a Complex Structure. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2015; 49(6): 221-231. DOI: 10.3103/S0005105515060059.
- [24] **Bayat M, Dong W, Thorborg J, To AC, Hattel JH.** A review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modeling strategies. *Additive Manufacturing*. 2021; 47, 102278: 1-25. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102278.
- [25] **Gribova VV, Timchenko VA.** The concept of support for laser-based additive manufacturing on the basis of ontological approach [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(2): 176-189. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-2-176-189.
- [26] **Gribova V, Kulchin Y, Nikitin A, Velichko A, Basakin A, Timchenko V.** The Concept of Intelligent Support for Laser Additive Manufacturing Process Engineer. In: O Dolinina, et al. (eds.): *Artificial Intelligence in Models, Methods and Applications. AIES 2022. Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 457. Springer, Cham, 2023: 355-368. DOI: 10.1007/978-3-031-22938-1_25.

- [27] **Gribova VV, Moskalenko PM, Timchenko VA, Shalfeeva EA.** The IACPaaS Platform for Developing Systems Based on Ontologies: A Decade of Use. *Scientific and Technical Information Processing*. 2023; 50(5): 406-413. DOI: 10.3103/S0147688223050064.
- [28] **Qi Q, Pagani L, Scott P, Xiang J.** A categorical framework for formalising knowledge in additive manufacturing. *Procedia CIRP*. 2018; 75: 87-91. DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.076.
- [29] **Roh BM, Kumara SRT, Witherell P, Simpson TW.** Ontology-based Process Map for Metal Additive Manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021; 30(12): 8784-8797. DOI: 10.1007/s11665-021-06274-2.
- [30] **Li Z, Huang M, Zhong Y, Qin Y.** A Description Logic Based Ontology for Knowledge Representation in Process Planning for Laser Powder Bed Fusion. *Applied Sciences*. 2022; 12(9), 4612: 1-23. DOI: 10.3390/app12094612.
- [31] **Phillips PJ, Hahn CA, Fontana PC, Yates AN, Greene K, Broniatowski DA, Przybocki MA.** Four Principles of Explainable Artificial Intelligence. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) - 8312, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2021. Available at <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8312> (accessed May 06, 2024).
-

About the authors

Valeriya Viktorovna Gribova (b. 1965) graduated from the Leningrad Polytechnic Institute in 1989 with a degree in Applied Mathematics, Doctor of Technical Sciences (2008), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (2022). Deputy Director for Scientific Work, Scientific supervisor of the Laboratory of Intelligent Systems in the Institute for Automation and Control Processes of the FEB RAS. The scientific interests are ontologies and knowledge bases, applied and problem-oriented systems based on knowledge, and knowledge base management. There are more than 300 works in the list of scientific papers. Author ID (RSCI): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; Researcher ID (WoS): Q-4250-2016 ORCID: 0000-0001-9393-351X. gribova@iacp.dvo.ru. ✉.

Yuri Nikolaevich Kulchin (b. 1953) graduated from the Moscow Institute of Engineering and Physics in 1976, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (1991), Professor (1993), Academician of the Russian Academy of Sciences (2011). Scientific Director of the Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. He is a specialist in the field of laser physics, laser technologies, photonics of nano- and microstructures and nanotechnology. The list of scientific papers includes more than 700 publications. AuthorID (RSCI): 15230; Author ID (Scopus): 7003382956; Researcher ID (WoS): J-9058-2014; ORCID: 0000-0002-8750-4775. kulchin@iacp.dvo.ru.

Alexander Ivanovich Nikitin (b. 1955) graduated from the Ryazan Higher Military Command School of Communications (1976) and Sumy State University (1994). He is a Technical Director of the Center for Laser Technologies of the IACP FEB RAS, a senior lecturer at the Basic Department of Photonics and Digital Laser Technologies of the FEFU. He is a co-author of more than 40 publications in the field of laser technologies and management of technical systems. Author ID (RSCI): 1137264; Author ID (Scopus): 57194274354; Researcher ID (WoS): AAD-8450-2022; ORCID: 0000-0003-2901-7482. nikitin.ai@dvfu.ru.

Vadim Andreevich Timchenko (b. 1983) graduated from the Far Eastern State University (Vladivostok-city) in 2005, Ph.D. (2011). He is a Senior Researcher at the Laboratory of Intelligent Systems in the Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS. He is a member of Russian Association of Artificial Intelligence and a co-author of more than 90 publications in the field of AI, informatics, program models, technologies and systems. AuthorID (RSCI): 180470; Author ID (Scopus): 57201774103; Researcher ID (WoS): Q-4380-2016; ORCID: 0000-0002-1314-7656. vadim@iacp.dvo.ru.

Received May 15, 2024. Revised June 4, 2024. Accepted June 10, 2024.
