

Scientific journal

Volume 16

№ 1

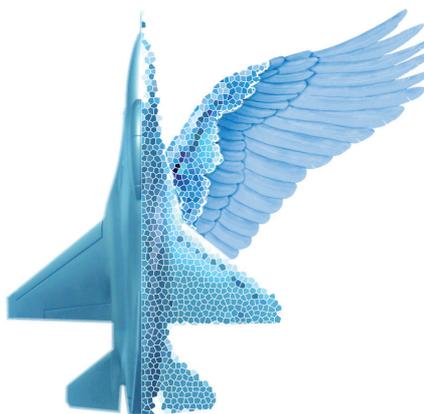
ОНТОЛОГИЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 16

№ 1



2026

Editorial Board - Редакционная коллегия

Nikolay M. **Borgest***, Ph.D., Associate Professor, Samara University, Member of IAQA, 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 «EVRKA», 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, SamSC of RAS, Samara, Russia
Sergey V. **Smirnov***, Doctor of Technical Sciences, PSUTI, member of IAQA, 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 ИАОА, АААИ. 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 Венидикт 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., СамНЦ РАН, Самара, Россия
Смирнов Сергей Викторович*, д.т.н., ПГУТИ, член ИАОА, Самара, Россия
Сулейманов Джавдет Шевкетович*, 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. СамНЦ РАН, Самара, Россия
Зам. главного редактора Смирнов С.В. ПГУТИ, 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 размещён 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, категория **K1**) 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. Пятилетний импакт-фактор РИНЦ **1,298** (2024).

Журнал включён в список журналов, входящих в базу данных **Russian Science Citation Index** (RSCI) на платформе **Web of Science**, а с 2023 года в «**Белый список**» научных журналов, утверждаемый Межведомственной рабочей группой, созданной Минобрнауки РФ.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-89984 от 22.08.2025 (ранее выданные: ПИ № ФС 77-70157 от 16.06.2017 и ПИ № ФС 77-46447 от 07.09.2011)

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ

Эволюция всего от Гераклита до Микони 5-13

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С.В. Микони, Б.В. Соколов 14-24
Жизнеспособность как обобщённая характеристика свойств технической системы

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

М.А. Насонов, С.А. Манцеров 25-39
Онтологическая модель профилактического обслуживания оборудования промышленного предприятия

А.В. Смирнов, Т.В. Левашова, Н.Г. Шилов, А.В. Пономарев 40-59
Онтологическая модель динамического конфигурирования социотехнической системы цифровым сообществом

М.В. Бобырь, Б.А. Бондаренко 60-73
Онтологическая модель сегментации изображений пожаров с помощью адаптивной нейро-нечёткой сети

Е.А. Барахтенко, Д.В. Соколов, Г.С. Майоров 74-86
Автоматизация построения мультиагентной системы для проектирования интегрированных энергетических систем

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

А.А. Бездитный 87-97
Точечное исчисление как онтологическая основа представления геометрических объектов в проектировании

С.А. Роменский, С.И. Ротков 98-110
Преобразование чертёжно-конструкторской документации в трёхмерную каркасную модель

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Х. Арсола-Руис, Л.Э. Гарсия-Марреро, М.А. Полюхович, В. Р. Мухонго, Ю.В. Логвинова 111-124
Формирование решений при выборе энергетических установок для обеспечения энергоэффективности территории

В.В. Антонов, Л.Е. Родионова, Е.В. Пальчевский, В.А. Суворова 125-138
Повышение достоверности ответов диалоговой модели с использованием формальных грамматик и теории категорий

Е.В. Ляпунцова, В.Б. Чечнев 139-151
Онтологическая модель процесса планирования работ на производственных предприятиях в мультиагентной системе поддержки принятия решений

Г.С. Вересников, Е.А. Серебровская, А.В. Скрябин 152-163
Проектирование алгоритмов прогнозирования технического состояния электромеханических приводов

А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина, А.С. Мурашко 164-176
Применение методов искусственного интеллекта при формировании индивидуальной траектории обучения

Журнал ориентирован на учёных и специалистов, работающих по научным направлениям: общие вопросы формализации проектирования (онтологические аспекты и когнитивное моделирование), прикладные онтологии проектирования, инжиниринг онтологий, методы и технологии принятия решений.

Правила подготовки рукописей статей размещены на сайте журнала - <https://www.ontology-of-designing.ru/>.
Контент журнала распространяется по лицензии CC-BY 4.0 (Creative Commons Attribution 4.0 International License).



Контакты соучредителей

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

СамНЦ РАН: 443001, Самарская обл., Самара, Студенческий пер. 3а, тел.: +7 (846) 340 06 20. Соколов В.О. sokolov@ssc.smr.ru.

ООО «Новая техника»: 443013, Самарская обл., Самара, пр. К. Маркса, 24-76, тел.: +7 (846) 332 67 81.

Адрес редакции, издателя: 443010, Самарская обл., Самара, ул. Фрунзе 145, тел.: +7 (846) 332 67 84. borgest@yandex.ru.

Отпечатано в ООО «Новая техника» (типография), 443013, Самарская обл., г. Самара, пр. К. Маркса, 24-76. Дата выхода 24.02.2026. Тираж 100 экз. Свободная цена. (6+).

CONTENTS

EDITORIAL

- The evolution of everything from Heraclitus to Mikoni **5-13**

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

- S.V. Mikoni, B.V. Sokolov** **14-24**
Viability as a generalized characteristic of the properties of a technical system

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

- M.A. Nasonov, S.A. Mantserov** **25-39**
Ontological model of preventive maintenance of industrial enterprise equipment
- A.V. Smirnov, T.V. Levashova, N.G. Shilov, A.V. Ponomarev** **40-59**
Ontology model for dynamic configuring sociotechnical system by digital community
- M.V. Bobyr, B.A. Bondarenko** **60-73**
Ontological model for fire image segmentation using an adaptive neuro-fuzzy network
- E.A. Barakhtenko, D.V. Sokolov, G.S. Mayorov** **74-86**
Automated construction of a multi-agent system for integrated energy system design

ONTOLOGY ENGINEERING

- A.A. Bezditnyi** **87-97**
Point calculus as an ontological basis for representing geometric objects in design
- S.A. Romensky, S.I. Rotkov** **98-110**
Algorithms of reconstruction of 3d wireframe model from drawings

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

- J. Arzola-Ruiz, L.E. Garcia-Marrero, M.A. Polyukhovich, V.R. Muhongo, Yu.V. Logvinova** **111-124**
Formation of solutions for selecting energy installations for ensuring territorial energy efficiency
- V.V. Antonov, L.E. Rodionova, E.V. Palchevsky, V.A. Suvorova** **125-138**
Enhancing the reliability of dialogue model responses using formal grammars and category theory
- E.V. Lyapunsova, V.B. Chechnev** **139-151**
Ontological model of work planning processes at manufacturing enterprises within a multi-agent decision support system
- G.S. Veresnikov, E.A. Serebrovskaya, A.V. Skryabin** **152-163**
Design of algorithms for predicting the technical condition of electromechanical drives
- A.Z. Asanov, I.Yu. Myshkina, A.S. Murashko** **164-176**
Application of artificial intelligence methods in the formation of individualized learning pathways

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:



<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 co-founders

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

Samara Scientific Center of the RAS: 3a, Studenchesky per., Samara, 443001, Russia. Tel.: +7 (846) 340 06 20. V.O. Sokolov, sokolov@ssc.smr.ru.

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



ОТ РЕДАКЦИИ

Эволюция всего от Гераклита до Микони The evolution of everything from Heraclitus to Mikoni

The unexamined life is not worth living
ὁ δὲ ἀνεξέταστος βίος οὐ βιωτὸς ἀνθρώπῳ
«Непознанная жизнь не стоит того, чтобы быть прожитой»
Сократ (Платон «Апология Сократа»¹)

«Воображение важнее знаний. Ведь знания ограничены, тогда как воображение охватывает весь мир, стимулируя прогресс и порождая **ЭВОЛЮЦИЮ**»

Альберт Эйнштейн²

«Законы природы надо изучать, а изучив, использовать... Мы привыкли, что мироздание предельно неантропоморфно. Что нет ничего менее похожего на человека, чем мироздание... То, что происходит с нами, похоже на трагедию. Но это ведь не только трагедия, это – открытие. Это возможность взглянуть на мироздание с совершенно новой точки зрения...»

Аркадий и Борис Стругацкие³

Дорогой наш читатель, уважаемые авторы и члены редакционной коллегии!

Тема данного обращения навеяна статьёй в этом номере журнала нашего постоянного автора, читателя и друга профессора С.В. Микони. Об отсутствии какого-либо постоянства в материальном мире и живой природе, о бесконечности познания уже не раз отмечалось, в том числе и в предыдущих обращениях от редакции журнала. Достаточно вспомнить крылатую фразу Гераклита «Всё течёт, всё изменяется»⁴.

В упомянутой статье, подготовленной С.В. Микони совместно с профессором Б.В. Соколовым, сделана попытка рассмотреть *жизнеспособность* как некую обобщённую характеристику свойств технической системы. Именно это понятие и сам термин подвигли обратить на это внимание редакции с целью продолжить понятийную и терминологическую дискуссию, присущую журналу, в котором онтологии и язык онтологии являются важным предметом публикуемых исследований. Без преувеличения грандиозный «замах» в названии этой краткой редакционной статьи на «эволюцию всего» возможно позволит, особенно молодым исследователям, расширить кругозор, заострить свой взор на происходящих вокруг процессах и найти свой путь, свой предмет для изучения. А приведённые здесь эпитафии и авторитет их авторов призваны подчеркнуть важность мировоззренческих тем для развития науки...

¹ См. также, *От редакции*. Уподобимся Сократу или апология онтологии проектирования. *Онтология проектирования*, 2011, №2. С.5-7. https://www.ontology-of-designing.ru/article/2011_1%282%29/1_Be_like_Socrates.pdf.

² Альберт Эйнштейн. Как изменить мир к лучшему. М.: «Эксмо», «Алгоритм» (серия «Титаны XX века»). 2013. 259 с. Опубликованный сборник работ Нобелевского лауреата доступен русскоязычному читателю. Однако приведённый здесь эпитафия это на наш взгляд более точный перевод с оригинального текста из книги 1931 года «*Cosmic Religion and Other Opinions and Aphorisms*». Читателю всегда надлежит внимательно относиться к текстам, особенно в эпоху многочисленных интерпретаторов, активного использования больших языковых моделей и генеративного искусственного интеллекта.

³ Аркадий Стругацкий, Борис Стругацкий. За миллиард лет до конца света (рукопись, найденная при странных обстоятельствах). 1974 г. <https://www.strugatskie.com/wp-content/uploads/2022/12/1974-За-миллиард-лет-до-конца-света-без-илл..pdf>.

⁴ *От редакции*. «Standing on the shoulders of giants». *Онтология проектирования*, 2013, №4. С.5-6. [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2013_4\(10\)/1_From_the_Editors.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2013_4(10)/1_From_the_Editors.pdf).

Понятие эволюция (от лат. *evolutio* – развёртывание, от англ. *evolution* – развитие) у большинства современников связано с именем Чарльза Дарвина (1809-1882) и его фундаментальным трудом «Происхождение видов путём естественного отбора или сохранение благоприятных рас в борьбе за жизнь» (1859)⁵. Сейчас эволюция рассматривается более широко и как процесс необратимых исторических изменений в природе и обществе⁶, и как эволюция техники, которая является производной от эволюции общества и накопленных в нём знаний, а эволюция техники напрямую связана с философией техники⁷.

Эразмус Дарвин □ первый онтолог-эволюционист органической жизни



Эразмус Дарвин, 1803 год,
по рисунку Дж. Роулинсона
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=79895404>

Прародителями эволюции считают⁸ Эмпедокла⁹ и Аристотеля¹⁰, которые заложили основу теории развития, изменчивости, приспособления и функциональности. Эти основы в большей степени представляли собой декларации и гипотезы, которые ещё предстояло обосновать и доказать, создав стройную теорию. Среди, возможно, малоизвестных широкой публике многочисленных последователей стоит отметить Эразма Дарвина (Чарльз Дарвин – его внук), который изложил гипотезу об изменении видов ещё в конце XVIII века, опубликовав фундаментальный труд по зоономии¹¹.

Здесь уместна аналогия с нашими современниками академиком АН СССР П.К. Анохиным (1898-1974) – физиологом, создателем теории функциональных систем – и его внуком, академиком РАН К.В. Анохиным, нейробиологом, директором Института перспективных исследований мозга МГУ имени М.В. Ломоносова¹², который подхватил и развил идеи физиологии в области нейробиологии, приступив к созданию гиперсетевой теории мозга. В ожидаемом будущем такая теория может позволить разобраться в физиологии мозга и построить модель естественного интеллекта, что может дать новый импульс в работах над моделями ИИ¹³.

В «Зоономии» Э. Дарвин пришёл к заключению, что вся органическая жизнь на земле пошла от одной живой частицы, которую неизвестная первопричина наделила силой жизни. Эта частица, управляемая раз-

⁵ Книга Charles Darwin «On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life» выдержала более 20 переизданий и переводов только на русский язык, начиная с 1864 по 2003 годы https://ru.wikipedia.org/wiki/Переводы_книги_Чарльза_Дарвина_«Происхождение_видов»_на_русский_язык.

⁶ Иорданский Н.Н. Эволюция жизни. https://evolution.powernet.ru/library/iordansky_book/iordansky.htm, а также статья Эволюция в Большой российской энциклопедии 2004–2017. <https://old.bigenc.ru/biology/text/4939235>. См. также, например, Кабытов П.С., Шлеенкова Е.И. Эволюция городского пространства Самары: от крепости на Волге до столицы губернии : монография // отв. ред. М.М. Леонов. Самара: ООО «Слово», 2024. 248 с.

⁷ См., например, Останин В.А. Техника в эволюции технологических укладов: монография /под ред. С.Е. Ячина. Владивосток: Изд-во Дальневосточного федерального университета, 2023. 185 с. DOI: 10.24866/7444-5523-1, а также, Нестеров А.Ю. Эпистемологические и онтологические проблемы философии техники: «четвёртое царство» Ф. Дессауэра. *Онтология проектирования*. 2016. Т.6, №3(21). С.377-389. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-377-389.

⁸ См., например, Происхождение видов. https://ru.wikipedia.org/wiki/Происхождение_видов#cite_note-titles-6.

⁹ От редакции. О первых началах. *Онтология проектирования*, 2014, №3. С.5-6. https://www.ontology-of-designing.ru/article/2014_3%2813%29/1_From_the_Editors.pdf.

¹⁰ От редакции. «Платон мне друг, но истина дороже». *Онтология проектирования*, 2012, №1. С.5. https://www.ontology-of-designing.ru/article/2012_1%283%29/1_From_the_Editors.pdf.

¹¹ Zoonomia; or, the laws of organic life. Vol. I. By Erasmus Darwin, M.D. F.R.S. author of the botanic garden. The second edition, corrected. London: printed for J. Johnson, In St. Paul's Church-Yard. 1796. Entered at Stationers' Hall. https://www.gutenberg.org/files/15707/15707-h/15707-h.htm#sect_XXXIX.

¹² Институт является координатором научного проекта МГУ «Мозг и информация: от естественного к искусственному интеллекту», участвует в работе Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект» (со-руководитель Школы – академик К.В. Анохин). <https://msu.ru/divisions/institut/brain/>.

¹³ См. также раздел 10 (Субъект проектирования осознаний) в статье Боргеста Н.М. Онтологии проектирования от Витрувия до Виттиха. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №4(30). С.487-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-487-522.

дражителями, чувствами и силой воли, и обладающая способностью приобретать новые части с новыми способностями и передавать их из поколения в поколение. Было отмечено, что наиболее сильная и активная особь лучше размножается, улучшая следующее поколение. Труд Э. Дарвина (в этом году исполнится 230 лет со дня его выхода) хорошо структурирован и может служить примером онтологического исследования в области описания живой материи и тех законов органической жизни, которые учёный смог сформулировать, не имея на тот период инструментов, доступных современным исследователям. Стоит отметить понятную часть этого труда, фрагменты которого приводятся ниже.

Нервная система берёт начало в головном мозге и распространяется по всему телу. Нервы, отвечающие за органы чувств, в основном отходят от той части мозга, которая находится в голове; нервы, отвечающие за мышечные движения, в основном отходят от той части мозга, которая находится в шее и спине...

Нерв – это продолжение мозгового вещества головного или спинного мозга, идущее от головы или позвоночника к другим частям тела и покрытое соответствующей оболочкой.

Слово *sensorium* используется для обозначения не только мозгового вещества, спинного мозга, нервов, органов чувств и мышц, но и того жизненного начала, или духа, который пребывает во всём теле, но не может быть познан нашими органами чувств, кроме как через свои проявления...

Слово *идея* используется для обозначения тех представлений о внешних вещах, с которыми мы изначально знакомимся с помощью наших органов чувств... В качестве синонима слова «идея» используются слова чувственное движение в противоположность мышечному движению.

Слово *восприятие* включает в себя как действие органа чувств в ответ на воздействие внешних объектов, так и наше внимание к этому действию; иными словами, оно выражает как движение органа чувств, или идею, так и боль или удовольствие, которые следуют за этим движением или сопровождают его.

Удовольствие или *боль*, которые неизбежно сопровождают все *восприятия* или *идеи*, на которых мы сосредоточены, либо постепенно ослабевают, либо сменяются другими ощущениями... слово «*ощущение*» используется для обозначения удовольствия или боли только в их активном состоянии, независимо от того, каким образом они поступают в систему, без какой-либо связи с воздействием внешних объектов.

Слово *память* используется широко: те идеи, которые мы вспоминаем по собственной воле, здесь называются идеями воспоминания...

Незадолго до выхода «Зоономии» Э. Дарвин в стихотворной форме подготовил сборник «Ботанический сад» (1791)¹⁴ из двух поэм: «Экономика растительности» и «Любовь растений». Первая поэма воспеваёт технологические инновации и научные открытия, предлагая теории, касающиеся актуальных научных вопросов. «Любовь к растениям» продвигает, пересматривает и иллюстрирует схему классификации растений Карла Линнея¹⁵, где Дарвин «призывает *воображение* под знамёна науки»¹⁶. Будучи приверженцем идеалов Просвещения, Э. Дарвин хотел не только участвовать в научных открытиях, но и распространять новые знания в доступной форме. Он подчёркивает связь между человечеством и растениями¹⁷, утверждая, что все они являются частью одного и того же природного мира и что половое размножение лежит в основе эволюции (идеи, которые его внук, Чарльз Дарвин, позже превратил в полноценную теорию эволюции)¹⁸.

Э. Дарвин известен также своими многочисленными изобретениями¹⁹. В заметках, датированных 1779 годом, Э. Дарвин сделал набросок водородно-кислородного ракетного двига-

¹⁴ The Botanic Garden A Poem, in Two Parts ... The Economy of Vegetation, and The Loves of the Plants. With Philosophical Notes. By *Erasmus Darwin*. 1825. Publisher Jones & Company. Book from the collections of New York Public Library. https://archive.org/details/bub_gb_Tn8gAAAAMAAJ/page/n147/mode/2up.

¹⁵ *Linnaeus, Carl* (1758). *Systema naturae per regna tria naturae :secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis* (in Latin) (10th ed.). Stockholm: Laurentius Salvius.

¹⁶ См. приведённый в начале статьи эпиграф А. Эйнштейна.

¹⁷ Академик Анохин: человек не одинок в мире сознания. 10.06.2024. <https://festivalnauki.ru/media/articles/klub/akademik-anokhin-chelovek-ne-odinok-v-mire-soznaniya/>. Согласно гиперсетевой теории мозга – сознание появляется у живого существа если есть три составляющих: нервная система; функциональные системы, обладающие способностью порождать новое поведение; механизмы долговременной памяти.

¹⁸ См. также, The Botanic Garden. https://en.wikipedia.org/wiki/The_Botanic_Garden.

¹⁹ The genius of Erasmus Darwin. By *C.U.M Smith and Robert Arnott*. Burlington, VT : Ashgate Pub. Co. 2005. 448 p. <https://archive.org/details/geniusoferasmusd0000unse/page/n9/mode/2up>.

теля с газовыми баллонами, соединёнными трубопроводами и насосами с камерой сгорания и соплом²⁰. Подобная концепция двигателя была воплощена лишь спустя столетия.



Борьба за существование. Дж. Б. Годдард (1832 - 1886)
In 1879 George Bouverie Goddard depicted
"The Struggle for Existence"



Бородинская битва 1812 (фрагмент, 1912).
Франц Алексеевич Рубо (1856-1928)

инженер-изобретатель, эволюционист и биолог, открыл новую главу в этом научном направлении, где понятийная, предметная и онтологическая чёткость в развитии живой материи может служить основой для изучения субъекта проектирования и перспектив его развития, включая результаты его творческой деятельности.

Эгоизм Ларошфуко или «нарыв» в человеческой сущности

В эволюции живого, состоящего из множества сущностей, всегда присутствует онтологическая проблема конкуренции, соревнования, борьбы за выживание. Поэтому практически всегда имеет место противоречие между индивидуальной (личной) и коллективной (общественной) выживаемостью и развитием в целом. Эволюция цивилизации и её продуктов в виде технических систем во многом определяется атрибутами субъекта проектной деятель-

Ключевым в эволюции живой материи является концепция борьбы за существование (борьбы за жизнь), которая связана с конкуренцией и борьбой за ресурсы, необходимые для жизни. Она относится к организмам в природе, к человеческому обществу²¹ и его производным (роботам и машинам).

Чарльз Дарвин использовал термин «борьба за существование» для обозначения как прямой конкуренции между (и внутри) видами, так и косвенной конкуренции (как в случае с растением на краю пустыни). Дарвин отмечал, что борьба за существование может также включать активную или пассивную взаимную помощь между организмами одного или разных видов. Подобное имеет место в развитии общества, рыночной экономике, создаваемых технических системах и устройствах, конкурирующих и взаимно дополняющих друг друга.

Эволюционные идеи предшественников и последователей Эразмуса и Чарльза Дарвина активно развиваются. Поиски первопричины жизни, «жизненного начала» продолжаются. Появились доказательства того, что плохо изученные прионы²² могли быть тем самым жизненно важным недостающим компонентом²³.

Если Витрувий, как инженер, архитектор, проектант и онтолог, заслуженно был назван отцом-основателем онтологии проектирования²⁴, то Эразмус Дарвин, как инженер-

²⁰ Rocket Motor P.82. Evolutionary Players. <https://www.revolutionaryplayers.org.uk/rocket-motor-p-82/>.

²¹ От редакции. Война и мир: онтологические основания. *Онтология проектирования*, 2022, Том 12. №1(43). С.5-10. [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2022_1\(43\)/Ontology_Of_Designing_1_2022_opt2-5-10_Editorial_War_and_Peace_Ontological_Foundations.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2022_1(43)/Ontology_Of_Designing_1_2022_opt2-5-10_Editorial_War_and_Peace_Ontological_Foundations.pdf).

²² Прионы – это белки, которые изначально считались возбудителями инфекционных нейродегенеративных заболеваний, но на самом деле встречаются во многих организмах, играя важнейшую роль в самых разных процессах – от иммунной системы до формирования памяти. См. также <https://ru.wikipedia.org/wiki/Прионы>.

²³ Michel Brahic. A sinister, deadly brain protein could reveal the origins of all life. *NewScientist*. 1 December 2025. <https://www.newscientist.com/article/2505167-a-sinister-deadly-brain-protein-could-reveal-the-origins-of-all-life/>.

²⁴ Боргест Н.М. Онтологии проектирования от Витрувия до Виттиха. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №4(30). С.487-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-487-522.

ности: свойствами как коллективного субъекта, где проявляется синергия индивидуальных интеллектов, так и внутренними качествами индивида. Сущность индивида определяется его биологическими и психологическими свойствами, его социальными установками, которые в конечном итоге воплощаются и проявляются в его поведении.

«Максимы»²⁵ Ларошфуко (1665), написанные в эпоху придворной театральности и продуманной внешности, освещают вопросы этики и психологии.

Цель сентенций Ларошфуко показать любовь к себе, где все пороки и ложные добродетели проистекают из эгоизма. Это движущая сила, меняющая облик и поступки, которые выдаются за великодушные, смелость, верность, являются проявлением замаскированного эгоизма.

“Мы больше заботимся о том, чтобы скрыть свои недостатки от самих себя, чем от других”.

“Мы часто прощаем тех, кто надоел нам, но мы не можем простить тех, кому надоели мы сами”.

“Что бы о нас ни говорили хорошего, это никогда не научит нас ничему новому”.

“Желание казаться умными часто мешает нам стать таковыми”.

“Слабые люди не могут быть искренними”.

Сентенции не столько высмеивают человечество, сколько описывают его затруднительное положение, его уязвимость. Любовь²⁶, гордость, дружеские отношения, честолюбие — все великие страсти оказываются масками, которые надевает один и тот же импульс самосохранения. Ясность его видения — это своего рода прощение, освобождение от иллюзий. Если мы по-настоящему поймём свои мотивы, они больше не будут управлять нами. Любовь к себе — это на самом деле любовь к собственному образу, и честность разрушает эту иллюзию²⁷.

Пожалуй, ещё более эксцентрично, повторяя и развивая сентенции Ларошфуко, высказался Ницше: «То, что делается из любви, всегда происходит по ту сторону добра и зла»²⁸. По мнению Ницше, созданная Платоном иллюзия о «дobre как таковом», чистом, неизменном и вневременном понятии нравственной добродетели выходит за рамки запутанных особенностей человеческих отношений. К сожалению, эта опасная для человечества оценка философа проявляет себя на протяжении всей его истории.

Концептуализация по Эйнштейну

Многочратно цитируемый в нашем журнале Томас Грубер в 1992 году определил онтологию как «точную спецификацию концептуализации». При этом справедливости ради стоит отметить более ранние и близкие взгляды Альберта Эйнштейна на науку и понятия, формируемые в ней, эволюция которых дала ростки онтологии в информатике.

«Наука — это вековое стремление путём систематического размышления привести воспринимаемые явления к возможно более всесторонним ассоциациям... это попытка постериорной реконструкции сущего путём процесса концептуализации»². Фрагменты рассуждений о понятиях великого учёного² приводятся ниже.

«Что значит, в сущности, «думать»? Когда при восприятии ощущений, идущих от органов чувств, в воображении всплывают картины-воспоминания, то это ещё не значит «думать». Когда эти картины становятся в ряд, каждый член которого пробуждает следующий, то и это ещё не есть мышление. Но когда определённая картина встречается во многих таких рядах, то она, в силу своего повторения, начинает служить упорядочивающим элементом для таких рядов, благодаря тому, что она связывает ряды, сами по себе лишённые связи. Такой элемент становится орудием, становится **понятием**... Само по себе не представляется необходимым, чтобы понятие соединилось с символом, действующим на органы чувств и воспроизводимым (со словом); но если это имеет место, то **мысль может быть сообщена другому лицу**.

... всякое наше мышление — ... представляет собой свободную **игру с понятиями**.

... мышление протекает в основном минуя символы (слова) и к тому же бессознательно. ... «акт удивления», по-видимому, наступает тогда, когда восприятие вступает в конфликт с достаточно установившимся в нас миром понятий.

²⁵ Франсуа Де Ларошфуко. Максимы. Серия: Эксклюзивная классика. М.: Neoclassic ACT. 2025. 224 с.

²⁶ От редакции. Онтология любви или проектирование позитивных отношений. *Онтология проектирования*. 2021. Том 11. №3(43). С.257-259.

²⁷ Steven Gambardella. An Unsettling Portrait of the Human Heart. How the Maxims of La Rochefoucauld Sing and Sting. *The Sophist*. Dec 04, 2025. <https://substack.com/home/post/p-180640491>.

²⁸ Фридрих Ницше. По ту сторону добра и зла. Прелюдия к философии будущего. 1886.

Я вижу, с одной стороны, совокупность ощущений, идущих от органов чувств; с другой стороны, – совокупность понятий и предложений, записанных в книгах. Связи понятий и предложений между собою – задача логического мышления... Понятия и предложения получают смысл, или «содержание», только благодаря их связи с ощущениями. Связь последних с первыми – чисто интуитивная и сама по себе нелогической природы... Хотя системы понятий сами по себе логически совершенно произвольны, но их связывает то, что они, во-первых, должны допускать возможно надёжное (интуитивное) и полное сопоставление с совокупностью ощущений; во-вторых, они должны стремиться обойтись наименьшим числом логически независимых элементов (основных понятий и аксиом), т.е. таких понятий, для которых не даётся определений, и таких предложений, для которых не даётся доказательств.»

К истории кибернетики

Примером эволюции «всего» может быть развитие научного направления кибернетики, где развитие техники (устройств, механизмов и машин) происходит по воле человека, а не природы, которая смогла создать живую ткань (на нашей планете и вполне возможно и в других далеких мирах).

Статью академиков С.Л. Соболева, А.И. Китова, А.А. Ляпунова²⁹ по праву считают истоком отечественной школы ИИ³⁰, подчеркивая вклад советских учёных в формулировку фундаментальных принципов ИИ (машинное самообучение, моделирование нейронной деятельности, эвристические методы, автономность). Осмысление этого «манифеста» важно для понимания генезиса и особенностей российской традиции в области ИИ и робототехники³¹. В эпоху революции нейросетей и глубокого обучения обращение к этим истокам служит не только данью уважения пионерам, но стимулом и ориентиром для современных российских исследований и разработок в области ИИ.

Ряд важных понятий и суждений, рождённых в эпоху формирования кибернетики^{29,31}, приводится ниже.

Кибернетика – научное направление, представляющее собой совокупность теорий, гипотез и точек зрения, относящихся к общим вопросам управления и связи в автоматических машинах и живых организмах.

Информация – сведения о результатах каких-либо событий, которые *заранее не были известны*.

Одной из главных задач кибернетики является изучение принципов построения и действия различных регуляторов и создание общей теории управления, т.е. общей теории преобразования информации в регуляторах. Математической основой для создания такой теории преобразования информации служит математическая логика – наука, изучающая методами математики связи между посылками и следствиями.

Теория информации изучает два основных вопроса: об измерении количества информации и о качестве информации (достоверности). Наряду с исследованием и физическим моделированием процессов, происходящих в живых существах, кибернетика занимается созданием автоматов, способных выполнять отдельные функции, свойственные человеческому мышлению в его простейших формах.

В кибернетике отмечается аналогия между принципом работы нервной системы и принципом работы счётной машины, заключающаяся в наличии самоорганизующихся процессов счёта и логического мышления, и аналогия в механизме работы машины и нервной системы. Работа нервной системы, процесса мышления, включает огромное число элементарных актов отдельных нервных клеток-нейронов. Каждый элементарный акт реакции нейрона на раздражение, разряд нейрона, подобен элементарному акту работы счётной машины...

Машины не заменяют и, безусловно, никогда не заменят человеческого мозга...

Человеческий мозг – творец всех самых сложных и совершенных машин, которые при всей сложности и совершенстве являются не более чем орудиями человеческого труда, как физического, так и умственного.

В статье³¹ отмечается, что название кибернетика происходит от греческого слова «кибернос» (кормчий, рулевой) и введено Ампером в 1843 году при попытке дать классификацию наук. Современная кибернетика возникла спустя сто лет и была подготовлена работами учёных разных стран. Как новая научная область она была оформлена Норбертом Винером, который является автором двух основных книг о кибернетике: «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине» (1948) и «Человеческое использование человеческих существ» (1951).

²⁹ Соболев С.Л., Китов А.И., Ляпунов А.А. Основные черты кибернетики. *Вопросы философии*. № 4, 1955. С.136-148. <https://computer-museum.ru/books/cybernetics.htm>

³⁰ Саяпин В.О., Кирюшин А.Н. Истоки отечественного искусственного интеллекта: к 70-летию манифеста советских кибернетиков Соболева, Китова, Ляпунова. *Genesis: исторические исследования*. 2025. №6. С.72-92. DOI: 10.25136/2409-868X.2025.6.74842. EDN: KQDMQU. https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74842.

³¹ См. также. Кольман Э. Что такое кибернетика? *Вопросы философии*. №4, 1955. С.148-159. https://djvu.online/file/YDTuUVAqVbfyf_

Общий закон раздражения гласит: «всё или ничего» – нерв либо отвечает на раздражение, либо не отвечает вовсе. Именно в этом и состоит аналогия процессов в нервной системе и в электронных машинах. Это свойство нервной системы является результатом естественной **эволюции**, в процессе которой она приспособилась наиболее целесообразно, с возможно большим соответствием отражать действительные процессы.

Аналогия между работой человеческого мозга и электронной вычислительной машиной вполне обоснована... При этом мы должны помнить, что наша аналогия, как, впрочем, всякая аналогия, неполна и верна лишь в известных границах.

«Наш мозг, наша нервная система столь же материальны, как и наши руки и созданные ими машины, и сами наши мысли, абстрактные идеи также являются порождением материи, и их противопоставление ей имеет лишь относительное, гносеологическое, а не онтологическое значение... Маркс, говоря о машинах, подчеркивал, что они не просто продолжения наших рук, а органы человеческого мозга, т.е. человеческий мозг может быть в определённых границах так же продолжен, как могут быть продолжены наши руки».

Прогнозы развития искусственного интеллекта

В год 50-летнего юбилея появления термина³² ИИ (*Artificial Intelligence*)³³ нет и не будет недостатков в прогнозах его развития³⁴, т.к. ИИ активно вторгается в нашу жизнь, изменяя наше сознание, влияет на эволюцию всего живого и среды его обитания.

По оценкам³⁵ к 2028 году ИИ с вероятностью не менее 50 % сможет достичь ряда важных целей. К 2027 году вероятность того, что машины без посторонней помощи будут справляться с любыми задачами лучше людей, составит 10 %, а к 2047 году – 50 %. ИИ может способствовать распространению дезинформации, усилению авторитарного контроля, усугублению неравенства и другим негативным сценариям.

Обобщая прогнозы разработчиков ИИ на ближайшие 15 лет можно констатировать серьёзные угрозы: когнитивная атрофия; утрата базовых навыков (чтение, письмо, анализ, мышление); размытие границ реальности (не отличимость правды от лжи).

Эволюция нормативной базы искусственного интеллекта

Развитие техники, технологий, информационных систем и ИИ вынуждает устанавливать соответствующие нормы³⁶, обеспечивающие юридическое регулирование использования новых устройств и систем для обеспечения их безопасности, надёжности и жизнеспособности.

Для обеспечения устойчивого применения технологий ИИ необходимо адаптироваться к законам по ИИ, т.к. этическое и юридическое регулирование технологий ИИ имеет решающее значение для технологических инноваций и разработок³⁷.

Четвёртое издание справочника³⁸ для представителей юридической профессии способствует принятию более качественных и справедливых юридических решений. Разделы этого справочника по инженерным дисциплинам

³² A Proposal For The Dartmouth Summer Research Project On Artificial Intelligence. *J. McCarthy, M.L. Minsky, N. Rochester, C.E. Shannon*. August 31, 1955. <https://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>.

³³ History of artificial intelligence. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_artificial_intelligence.

³⁴ AI изменит жизнь к 2040: прогнозы, инвестиции и споры. Ноябрь 2025. https://asector.ru/news/2025_11-ai_izmenit_zhizn_k_2040_prognozy_investitsii_i_sporu.

Искусственный интеллект: угроза или шанс для человечества? Результаты самого большого опроса исследователей ИИ. 6 января 2024. <https://www.ixbt.com/live/offtopic/budushee-iskusstvenny-intellekt-ugroza-ili-shans-dlya-chelovechestva-rezultaty-samogo-bolshogo-oprosa-issledovateley-ii.html>.

Ольга Пугачева: бизнес с ИИ. Будущее. 02.06.2025. Когнитивная атрофия: новые исследования 2025 года о том, как ИИ влияет на наш мозг (обзор исследований). <https://vc.ru/future/2022050-kognitivnaya-atrofiya-vliyanie-ii-na-myshlenie>.

Алёна Горшенина. ИИ делает нас глупее? Что говорят ученые, и как защитить себя. 2 июня 2025. <https://42clouds.com/ru-r/blog/ai/ii-delaet-nas-glupee-cto-govoryat-uchenyie-i-kak-zashhitit-sebja/>.

³⁵ *Katja Grace, Julia F Sandkühler, Harlan Stewart, Benjamin Weinstein-Raun, Stephen Thomas, Zach Stein-Perlman, John Salvatier, Jan Brauner, Richard C. Korzekwa*. Thousands of AI Authors on the Future of AI. *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 84. 2025-10-06. DOI: 10.1613/jair.1.19087.

³⁶ *Barr P.A.; Imroz S.M.* A Cross-Regional Review of AI Safety Regulations in the Commercial Aviation Industry. *Adm. Sci.* 2026, 16, 53. DOI: 10.3390/admsci16010053.

³⁷ *Lee Y.-G.; Lee C.-H.; Jeon Y.-H.; Bae J.-H.* Transformative Impact of the EU AI Act on Maritime Autonomous Surface Ships. *Laws*. 2024, 13, 61. DOI: 10.3390/laws13050061.

³⁸ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine and Federal Judicial Center. 2025. Reference Manual on Scientific Evidence: Fourth Edition. Washington, DC: The National Academies Press. 1682 p. DOI: 10.17226/26919.

плинам и информатике дополнены справочным руководством по ИИ. Эти технические знания являются предпосылкой для понимания судьями способов использования ИИ. ИИ может изменить юридическую практику раскрытия информации и доказательств. Каждый раздел справочника сопровождается глоссарием, что является признаком онтологического подхода к описанию предметной области.

Завершающий этап эволюции

Текущая глобальная картина рисков ³⁹	%
Геоэкономическая конфронтация	18
Государственные вооружённые конфликты	14
Экстремальные погодные явления	8
Поляризация общества	7
Дезинформация и ложные сведения	7
Экономический спад	5
Эрозия прав человека и/или гражданских свобод	4
Негативные последствия технологий ИИ	4
Кибербезопасность	3
Неравенство	3
Другое (всё остальное)	21

ты на государственном уровне как важнейшие цивилизационные риски.

Рост производительности и общее энергопотребление приводит к кризисам «сингулярности», когда население и спрос на энергию стремятся к бесконечности за конечное время. Если цивилизация разовьёт способность понимать собственную траекторию развития, то у неё появится возможность повлиять на фундаментальные изменения и сделать приоритетными гомеостаз и благополучие. Это станет сознательным изменением траектории развития или «гомеостатическим пробуждением». Цивилизации либо погибают от истощения, либо переключаются на поддержание гомеостаза⁴⁰.

Ранг	Глобальные риски, ранжированные по степени тяжести ³⁹	
	краткосрочные (2 года)	долгосрочные (10 лет)
1	Геоэкономическое противостояние	Экстремальные погодные явления
2	Дезинформация и ложные сведения	Потеря биоразнообразия и коллапс экосистем
3	Поляризация общества	Критические изменения в земных системах
4	Экстремальные погодные явления	Дезинформация и ложные сведения
5	Вооружённые конфликты на государственном уровне	Негативные последствия технологий ИИ
6	Кибербезопасность	Нехватка природных ресурсов
7	Неравенство	Неравенство
8	Эрозия прав человека и/или гражданских свобод	Кибербезопасность
9	Загрязнение окружающей среды	Поляризация общества
10	Недобровольная миграция или перемещение	Загрязнение

В опубликованном после романа «Фиаско» интервью («Поезд вот-вот отправится», Polityka №37 от 14 сентября 1991 г.) Станислав Лем оценивал в качестве наиболее вероятного сценария «гомеостатическое пробуждение». «Я убежден, что человечество будет существовать... Несмотря на то, что люди ведут себя как идиоты, их суицидальные наклонности не так сильны, как принято считать... Я не сторонник каких-либо сверхоптимистичных восторгов. Но сам факт этого моего интервью показывает, что я не считаю пустым и бесполезным делом делиться с общественностью этими своими мыслями». В этом интервью Лем предложил написать книгу под названием «Глупость, как



Фрагмент мозаики «Интеллект пробуждает человечество»
Барри Фолкнера (1881–1966).

<https://www.rockefellercenter.com/art/intelligence-awakening-mankind/>

³⁹ Global Risks Report 2026. World Economic Forum. 14 January 2026. 102 p. <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2026/>.

⁴⁰ Michael L Wong, Stuart Bartlett. Asymptotic burnout and homeostatic awakening: a possible solution to the Fermi paradox? *J R Soc Interface*. . 2022 May;19(190): 20220029. DOI: 10.1098/rsif.2022.0029.

движущая сила истории человечества». Возможно, что в нынешней ситуации самое время вспомнить это интервью Лема: глупость, как движущая сила истории человечества, «зашкаливает»⁴¹.

Жизнеспособность современных технических систем и новых проектов таких систем – показатель, который должен быть встроен в жизнеспособность самой цивилизации, быть включённым в неё, быть производным от неё.

Прошедший в конце декабря 2025 года научный семинар «Онтология проектирования»⁴², организованный Самарским университетом и ИПУСС РАН – Самарского научного центра РАН, был посвящён 99-летию профессора, д.т.н. В.Г. Маслова (23.12.1926–17.07.2006) – разработчика теории выбора оптимальных параметров при проектировании авиационных ГТД. Подводя итоги семинара, его руководитель Н.М. Боргест вновь напомнил мысль, ставшую девизом не только этой встречи, но и всех увлечённых наукой:

«Этот краткий отрезок бытия, который каждому из нас предстоит пройти, удивительно прекрасен! И хочется, очень сильно хочется познать многое из этой бездны мироздания – познать онтологию жизни, онтологию её проектирования».

В номере

В разделе «Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование» рассмотрены: онтологическая модель жизнеспособности технической системы (**Санкт-Петербург**).

В разделе «Прикладные онтологии проектирования» рассмотрены: онтологическая модель представления экспертных знаний в системе профилактического обслуживания оборудования промышленного предприятия (**Дзержинск, Нижний Новгород**); онтологическая модель динамического конфигурирования социотехнической системы цифровым сообществом (**Санкт-Петербург**); онтологическая модель сегментации изображений пожаров с помощью адаптивной нейро-нечёткой сети (**Курск**); автоматизация построения мультиагентной системы для проектирования интегрированных энергетических систем (**Иркутск**).

В разделе «Инжиниринг онтологий» рассмотрены: точечное исчисление как онтологическая основа представления геометрических объектов в проектировании (**Мелитополь, Нижний Новгород**); преобразование чертёжно-конструкторской документации в трёхмерную каркасную модель (**Нижний Новгород**).

В разделе «Методы и технологии принятия решений» рассмотрены: формирование решений при выборе энергетических установок для обеспечения энергоэффективности территории (**Гавана, Фишано, Санкт-Петербург, Бенгела**); повышение достоверности ответов диалоговой модели с использованием формальных грамматик и теории категорий (**Уфа, Москва**); онтологическая модель процесса планирования работ на производственных предприятиях в мультиагентной системе поддержки принятия решений (**Москва**); проектирование алгоритмов прогнозирования технического состояния электромеханических приводов летательных аппаратов (**Москва**); применение методов искусственного интеллекта при формировании индивидуальной траектории обучения (**Москва, Набережные Челны**).

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！

⁴¹ Асимптотическое выгорание или гомеостатическое пробуждение. *Малоизвестное интересное*. 10 октября 2022. <https://dzen.ru/a/Y0QJtF49FFt94veG>. В этой статье канала в социальной сети Дзен приведено много ссылок на интересные познавательные и прогностические работы. *Прим. ред.*

⁴² «Помним, ценим и чтим своих учителей». 24.12.2025. <https://ssau.ru/news/25157-pomnim-tsenim-i-ctim-svoikh-uchiteley>.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.023:9

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-14-24



Жизнеспособность как обобщённая характеристика свойств технической системы

© 2026, С.В. Микони ✉, Б.В. Соколов

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В связи с увеличением состава интеллектуальных функций и свойств современных технических систем, присущих живому организму, существует необходимость обобщения этих свойств. В качестве понятия, отражающего свойства живых систем, рассматриваются разные трактовки жизнеспособности системы в различных предметных областях. В работе за основу понятия жизнеспособности принят термин «жизнь», отличительные признаки которого сформулированы в рамках биологии и смежных с ней дисциплин. С применением логико-лингвистического анализа этих признаков показана бóльшая общность понятия жизнеспособности индивидуума по отношению к жизнеспособности популяции с присущими ей свойствами репродукции и эволюции. Рассмотрены условия применимости этого понятия к одиночной технической системе. В статье решается задача построения онтологической модели жизнеспособности технической системы на основе предложенного определения этого понятия. Качество жизни технической системы предложено рассматривать с точки зрения реализуемости свойств жизнеспособности в условиях изменения внутренней и внешней среды. Определён перечень этих свойств. Предложена онтологическая модель жизнеспособности технической системы в виде ориентированного графа, корневой вершиной которого является жизнеспособность системы, а висячими вершинами – свойства, обеспечивающие жизнь системы. Если принять жизнеспособность технической системы за собирательное свойство, мера его полноты определяется составом присущих ей терминальных свойств. Предложены способы оценивания меры жизнеспособности.

Ключевые слова: понятие, жизнеспособность, определение, свойство, показатель, жизнь, система, состояние, стабильность, развитие.

Цитирование: Микони С.В., Соколов Б.В. Жизнеспособность как обобщённая характеристика свойств технической системы. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.14-24. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-14-24.

Финансирование: исследования проводились в рамках бюджетной темы FFZF-2025-0020.

Вклад авторов: Микони С.В. – разделы 2-6, заключение, 5 – совместно; Соколов Б.В. – введение, раздел 1, 5 – совместно.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Техника, как искусственная среда обитания, исторически развивалась и продолжает развиваться путём заимствования свойств живых организмов. Вначале это касалось физических и энергетических свойств живого. Затем наступила эра информатики, реализующей умственные способности живых организмов вплоть до попыток моделирования интеллекта человека. В практическом плане она ознаменовалась включением процессоров в исполнительные

устройства [1]. Итогом симбиоза физических, энергетических и информационных свойств в рамках одной системы стали *киберфизические системы* (КФС) [2].

Приобретение современной технической системой (ТС) всё новых свойств, присущих живым организмам, например самообучение, придаёт ей новые возможности приспособления к изменениям внешней среды. Такие свойства, как адаптация и самоорганизация, не только продлевают жизненный цикл (ЖЦ) ТС, но и создают предпосылки к её автономному функционированию, что можно трактовать как искусственную жизнь. Поддержание искусственной жизни уместно рассматривать как жизнеспособность (ЖС) ТС. Подобно термину КФС термин ЖС носит обобщающий характер применительно к следующим свойствам: устойчивость (Уст), сопротивляемость воздействиям среды (Сопр), безопасность (Безоп), исправность (Испр), работоспособность (Раб), надёжность (Над), восстанавливаемость (Восст), живучесть (Жив), адаптируемость (Ад). В этом смысле представляет интерес установление связи между понятием ЖС и перечисленными свойствами ТС, что и является предметом исследования данной работы.

1 Обзор трактовок понятия «жизнеспособность»

Понятие ЖС не ново в научной литературе и применяется во многих областях научного знания. В каждой области знания от естественных до общественных наук даётся своё определение этому понятию [3]. В [4] проведён анализ понимания ЖС в философии, кибернетике, истории, экономике и социальных науках и сделана попытка доказать, что английский термин *resilience* наиболее полно отражает понятие ЖС. Это слово переводится как гибкость, упругость, эластичность, устойчивость (к внешним воздействиям) и как способность быстро восстанавливать здоровое физическое и душевное состояние. Оно происходит от латинского *resili*, что означает «вернуться», «прийти в исходное состояние». Эта трактовка понятия ЖС развита в [5] применительно к ЖС человека и семьи, а также нашла применение в промышленности и экономике, например, в словосочетании «устойчивое развитие» [6]. Согласно [7] всякая ЖС относительна; она существует только по отношению к той или иной данной среде, и рассматривается как форма проявления активности и адаптивности системы.

В [8] предложена модель ЖС системы, основанная на принципах функционирования мозга, а в [9] – подход, базирующийся на концепции [8], где ЖС рассматривается с позиции устойчивости проекта и системы. В [10] предложены концептуальная модель ЖС критической инфраструктуры на базе функционально-целевого подхода и теории управления, формализация понятий «критическая инфраструктура» и «ЖС», конкретизирующая содержание предметной области (ПрО) исследования с помощью новых формальных конструкций.

Работа [11] посвящена выбору программных средств обработки многомерных данных для использования в задачах исследования ЖС региональных социально-экономических систем. Предложена схема программного решения моделирования ЖС. В [12] в качестве объекта ЖС рассматривается управление социально-экономической системой с позиции её экономического, социального эффекта и долговечности, где ЖС система должна удовлетворять условиям сложности и разнообразия.

В [13] ЖС определена как способность к восстановлению – способность системы восстанавливать рабочее состояние после его нарушения, что отражает частный характер этого определения ЖС.

Учитывая общность отличительных признаков, присущих понятию ЖС, в [14] отмечено, что «наука нуждается в междисциплинарной обобщающей теории ЖС любых систем». Для создания онтологической модели (ОМ) понятия ЖС, включающей отличительные признаки (далее существенные признаки – СП), востребован логико-лингвистический анализ [15].

2 Логико-лингвистический анализ понятия «жизнеспособность»

Логико-лингвистический анализ понятий выполняется с применением логических операций над их содержанием и объёмом. Совокупность признаков, выделяющих понятие среди других (содержание понятия), и характеризующих им сущностей (объём понятия) представляют собой множества. Изоморфизм булевой алгебры и теории множеств устанавливает связь между логическими (\vee, \wedge, \neg) и теоретико-множественными операциями (\cup, \cap, \setminus) [16].

В силу конечного числа известных СП содержание понятия a задаётся в перечислительной форме:

$$C(a) = \{C_1(a), \dots, C_j(a), \dots, C_l(a)\}, \quad (1)$$

а его объём, представляющий собой открытое множество (класс), – в описательной форме:

$$V(a) = \{a_i \mid \forall C_j(a) \in C(a)\}. \quad (2)$$

Согласно этим формулам содержание понятия ЖС ТС представляется перечислением присущих ему свойств из списка, сформированного при постановке задачи:

$$C(\text{ЖС ТС}) = \{\text{Уст, Сопр, Безоп, Испр, Раб, Над, Восст, Жив, Ад}\}.$$

Количественно содержание понятия ЖС ТС оценивается числом характеризующих его СП: $l_{C(\text{ЖС ТС})} = |C(\text{ЖС ТС})| = 9$.

Объём понятия ЖС ТС представляется множеством сущностей $x \in X$, СП которых соответствуют содержанию понятия ЖС: $V(\text{ЖС ТС}(x)) = \{x \mid C(\text{ЖС ТС}(x)) = C(\text{ЖС ТС})\}$.

Список свойств ЖС ТС не содержит такого свойства, присущее живым системам (ЖивС), как воспроизводство (Впр). ЖС ЖивС является видовым по отношению к родовому для него понятию ЖС ТС. Через содержания этих понятий отношение наследования выражается отношением включения множеств: $C(\text{ЖС ТС}) \subset C(\text{ЖС ЖивС})$. Это означает, что понятие ЖС ТС обладает большей *обобщающей* способностью, чем понятие ЖС ЖивС, поскольку характеризуется меньшим количеством СП.

Согласно закону двойственности содержания и объёма между объёмами понятий ЖС ТС и ЖС ЖивС имеет место обратное отношение включения:

$$V(\text{ЖС ТС}) \supset V(\text{ЖС ЖивС}). \quad (3)$$

Чем обширнее набор признаков, составляющих содержание понятия, тем уже класс объектов, удовлетворяющих им, и, наоборот, чем уже содержание понятия, тем шире его объём: $N_{\text{ЖС ТС}(x)} > N_{\text{ЖС ЖивС}(x)}$.

В соответствии с этим понятие ЖС ТС является более *общим* по отношению к понятию ЖС ЖивС. На этом основании оно и считается родовым по отношению к понятию ЖС ЖивС, получаемым из содержания понятия ЖС ТС по формуле наследования.

Аналогично определяется отношение между понятием ЖС ТС и частичной ЖС ТС (ЧЖС ТС), если под понятием ЖС ТС понимать *полную* ЖС ТС. Тогда для любого набора СП ЖС ТС, меньшего числа 9, имеет место $C(\text{ЖС ЧТС}) \subset C(\text{ЖС ТС})$ и $V(\text{ЖС ЧТС}) \supset V(\text{ЖС ТС})$.

3 Определение понятия «жизнеспособность»

Понятие ЖС по способу словообразования относится к классу межвидовых понятий. Его родителями являются понятия «жизнь» и «способность». Способность сущности к чему-либо отражает наличие у неё некоторого присущего ей свойства. Анализ лингвистической структуры 123-х определений жизни позволил обнаружить в них базовое ядро [17], которое включено в минимальное определение жизни, как «самовоспроизводство с изменчивостью».

В [18] «жизнь – это активная форма существования материи от рождения до смерти, которая в обязательном порядке содержит в себе свойства живого». К свойствам живого относятся клеточный состав и строение (структура) материи [19]. Важнейшим свойством живого

является воспроизведение себе подобных, обеспечивающее непрерывность и преемственность жизни. Применительно к живой природе процесс развития, сопровождающийся изменением генетического состава популяций, формированием адаптаций, видообразованием и вымиранием видов, преобразованием экосистем и биосферы в целом, назван *эволюцией* [20].

Содержание понятия ЖС можно обобщить следующим определением: ЖС – это *способность системы оставаться живой с различным уровнем качества жизни (КЖ) при не критичных для неё воздействиях внутренней и/или внешней среды*.

В медицине под КЖ понимается интегральная характеристика *физического, психологического, эмоционального и социального* функционирования человека, основанная на его субъективном восприятии [21]. С точки зрения ЖС человека под КЖ понимается «уровень удовлетворения материальных, духовных и социальных потребностей, уровень интеллектуального, культурного и физического развития, а также степень обеспечения безопасности жизни» [22]. Под различным уровнем КЖ понимается сохранение, ухудшение, улучшение характеристик функционирования и ЖС системы. Под критичными для жизни понимаются воздействия внутренней и/или внешней среды, влекущие утраты системой свойств живого.

Предложенное определение понятия ЖС сформулировано для популяции организмов на основе свойств всего живого. Если рассматривать ЖС отдельного представителя популяции (индивидуума), то такие СП, как репродукция и эволюция, становятся не востребуемыми. Согласно (3) исключение их из определения ЖС влечёт увеличение общности этого понятия, т.е. ЖС индивидуума играет роль родового понятия по отношению к ЖС популяции.

Поскольку в определении ЖС не указывается назначение системы, оно применимо к системам любой, в т.ч. и искусственной природы, в которых воспроизводятся свойства живого без дополнительных свойств популяции. В определении ЖС конкретной ПрО уточняется, что понимается под КЖ конкретной системы.

Исследование взаимосвязи СП в рамках ОМ ЖС ТС предполагает изоляцию ТС от среды её обслуживания. Речь идёт об исключении участия человека в функционировании ТС. Рассматривается одиночная ТС, чтобы исключить свойства популяции и коллективной работы.

4 Метод построения онтологической модели понятия «жизнеспособность технической системы»

ОМ понятия ЖС ТС должна связывать обобщающее понятие ЖС с девятью СП. ОМ обобщающего понятия может быть представлена ориентированным графом с корневой вершиной ЖС ТС и висячими (терминальными) вершинами СП [23]. Задача заключается в нахождении признаков ветвления дерева (оснований деления свойств или СП), применение которых позволяет связать корневую вершину ЖС с каждой терминальной вершиной дерева.

Связывание терминальной вершины графа с предыдущей означает потерю одной из степеней свободы соответствующего понятия. Эта потеря требует обоснования. Её источником является классификационный СП, выбор которого неоднозначен. Он зависит от способа разбиения исходного множества свойств ТС, вошедших в С(ЖС ТС) понятия ЖС ТС. Наиболее простым способом разбиения исходного множества свойств ТС является последовательное выделение одного из них на каждом шаге разбиения. Этот способ характеризуется максимальным числом шагов разбиения: $l_{\max} = N - 1$, где N – множество СП. Минимальное число шагов дихотомического разбиения исходного множества (число уровней дерева) оценивается формулой: $l_{\min} = \log_2 N$. В задаче с $N = 9$ берётся наибольшее значение $\log_2 9$, т.е. $l_{\min} = 4$. Способ дихотомического деления свойств ТС удобен не только минимальным числом шагов, но и противоположными значениями классификационных признаков типа Да / Нет. Граф ЖС

ТС, построенный дихотомическим разбиением исходного множества свойств ТС, изображён на рисунке 1. Нижний уровень вершин графа связан с учётом человеческого фактора.

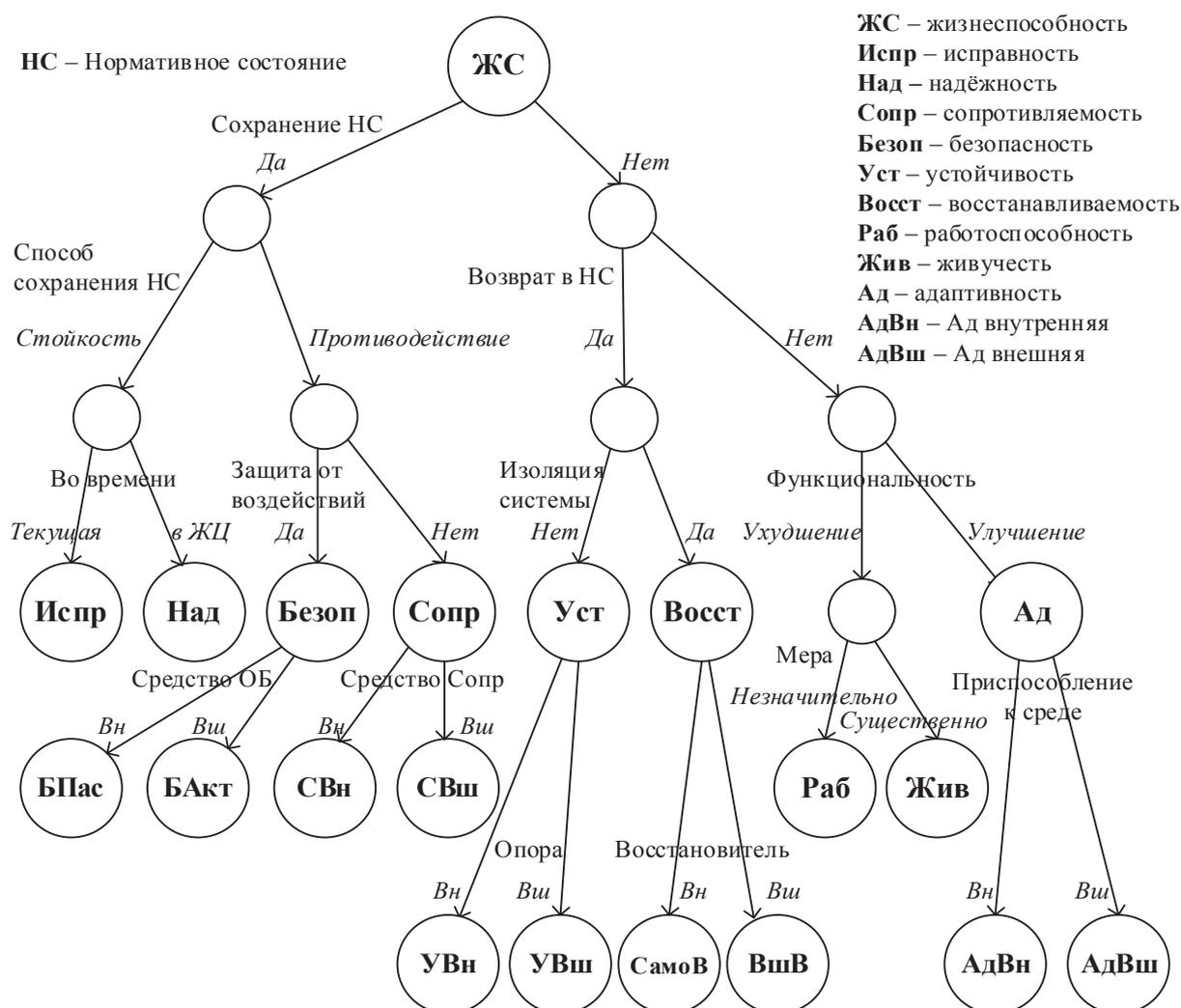


Рисунок 1 - Граф понятия «жизнеспособность технической системы»

КЖ ТС может быть представлено двумя обобщёнными свойствами – стабильностью и развитием [24]. Они различаются нормативным состоянием (НС) ТС. Стабильность характеризуется сохранением НС ТС. Оно выражается соответствием фактических значений показателей, характеризующих терминальные свойства ТС, нормативным значениям. Фактические значения показателей ТС могут отклоняться от нормы как в нежелательную, так и в желательную стороны. Причиной первого случая является воздействие внешней или внутренней среды ТС. Причиной второго случая является улучшение КЖ ТС, например, за счёт самообучения. На верхнем уровне графа свойства ТС делятся на две группы: свойства, способствующие сохранению НС ТС, и свойства, подверженные изменениям. В качестве основания деления на эти группы используется признак «Сохранение НС» со значениями Да и Нет. Первая группа свойств отражает стабильность системы, а вторая – ухудшение или улучшение КЖ ТС. На втором уровне левой ветви графа рассматриваются способы сохранения НС системы. К ним относятся стойкость системы по отношению к воздействиям и противодействие им. Стойкость можно охарактеризовать свойствами ТС *исправность* и *надёжность*.

Эти свойства можно разделить относительно времени сохранения НС ТС. Система находится в исправном состоянии (Испр), если значения всех показателей (параметров) соответствуют значениям, заданным в нормативной документации. Временные параметры пребывания системы в исправном (работоспособном) состоянии оцениваются показателями надёжности (Над) [25].

Вторым способом сохранения НС ТС является противодействие оказываемым на неё воздействиям, которое характеризуется свойствами сопротивляемости ТС и обеспечения её безопасности. Противодействие ТС воздействиям за счёт задействования внутренних (Вн) или привлечения внешних (Вш) ресурсов отражает меру её сопротивляемости (Сопр). Под внешним ресурсом понимается участие человека или другой внешней системы для поддержания соответствующего свойства.

Меры, предпринимаемые для защиты ТС от воздействий, относятся к обеспечению её безопасности (Безоп). Безопасность обеспечивается как пассивными (БПас) средствами, так и активными (БАкт). Для разделения этих свойств используется классификационный признак «Средство обеспечения безопасности (ОБ)». Примерами пассивных средств ОБ могут быть маскировка и пр., активным средством ОБ является воздействие на источник опасности с целью её устранения.

В правой ветви графа рассматриваются свойства системы, связанные с изменением её состояния, которые делятся на две группы и отражают возврат и невозврат в НС. Возврат системы к НС осуществляется за счёт таких её свойств как *устойчивость* (Уст) и *восстанавливаемость* (Восст). Различие между ними состоит в том, что на время восстановления система выходит на определённый промежуток времени из рабочего режима, что соответствует неработоспособности ТС вследствие нарушения НС (см., например, [26, п.4.2.5.4]).

Устойчивость и *восстанавливаемость* ТС достигаются за счёт её внутренних (УВн и СамоВ) и внешних (УВш и ВшВ) ресурсов. Устойчивость с опорой на внутренние ресурсы называется отказоустойчивостью [26, п.4.2.5.3]. Процесс восстановления работоспособности ТС с применением внешних ресурсов называется *ремонт*.

Новое состояние ТС может характеризоваться как ухудшением, так и улучшением её КЖ. Незначительное отклонение от НС ТС при сохранении её функциональности рассматривается как состояние *работоспособности* (Раб).

Ухудшение состояния ТС, связанное с частичной потерей работоспособности, характеризуется таким её свойством, как *живучесть* (Жив). Улучшение состояния ТС связывается с её развитием путём приспособления к существенным изменениям среды. Переход ТС в новое состояние осуществляется за счёт её обучения при взаимодействии со средой. Гармонизация отношения с внутренней средой отражает *внутреннюю адаптивность* (АдВн) ТС, а с внешней средой – *внешнюю адаптивность* ТС (АдВш).

Все терминальные свойства (вершины графа) могут быть конкретизированы применительно к любой ПрО. Общий верхний уровень для всех ПрО позволяет сопоставлять оценки их ЖС между собой с учётом меры полноты ЖС ТС. Под мерой полноты ЖС ТС понимается подмножество свойств ЖС, присущее конкретной ТС [27-29].

5 Оценивание меры жизнеспособности системы

Оценивание меры ЖС ТС осуществляется способом обобщённых оценок альтернатив в иерархической модели многомерного оценивания в задаче многоцелевой оптимизации [30]. Каждое из терминальных свойств ТС оценивается по крайней мере одним измеряемым или расчётным показателем. Первичной задачей является выбор измеряемых показателей, харак-

теризующих конкретную ТС. Свойство ТС может рассматриваться в вещественном, энергетическом и информационном аспектах.

На выбор показателя влияет назначение ТС. Показатели различных свойств ТС измеряются в разных шкалах. Способом получения обобщённой оценки по всем показателям является их нормализация. Выбор единой шкалы зависит от способа измерения показателей. Простейший способ – это указание на наличие / отсутствие свойства, т.е. применение двоичной системы. Наличие хотя бы одного нуля в двоичной оценке свойств ТС означает её не полную ЖС. Другим способом являются экспертное оценивание по качеству: высокое, среднее, низкое. Результирующая оценка качества ЖС ТС определяется по большинству голосов, отданных за каждую из оценок качества [28].

Наиболее информативной является численная оценка свойства ТС. Для этого можно использовать балльную шкалу, например $\{1, 10\}$. Если все показатели имеют численное значение, то они приводятся к единой шкале $\{0, 1\}$. В качестве обобщающей функции численных показателей может быть выбрана аддитивная или мультипликативная средневзвешенная свёртка показателей [29], которая предполагает задание весовых коэффициентов.

Многомерная оценка позволяет выполнять количественное сравнение ЖС систем различного применения, оценённых на одинаковом наборе первичных свойств ЖС.

6 Пример

Близким примером одиночной ТС является беспилотный летательный аппарат (БПЛА), обладающий достаточной автономностью полёта. Такие БПЛА оснащаются средствами управления и искусственного интеллекта [31]. Для автономного полёта БПЛА должен обладать свойствами адаптивности и обучаемости. Обучаемость необходима для приспособления БПЛА к изменениям внутренней и внешней среды, позволяя прогнозировать будущие ситуации. БПЛА должен содержать следующие системы: навигации; реагирования и адаптации к событиям; контроля технического состояния; связи с оператором.

Каждую из перечисленных систем можно охарактеризовать терминальными свойствами и оценить численно соответствующими показателями. Система навигации характеризуется точностью определения места нахождения БПЛА. Система реагирования на события оценивается типом и числом событий, на которые она способна реагировать по отношению к заданному списку возможных событий. Качество системы адаптации оценивается числом новых (нештатных) событий. Система контроля технического состояния оценивается отношением числа обнаруживаемых отказов и сбоев к количеству возможных отказов и сбоев. Система связи с оператором характеризуется коэффициентом готовности связи.

Имея численные оценки соответствующих показателей, можно рассчитать многомерную оценку ЖС БПЛА. Для получения численных оценок ЖС БПЛА, как комплексной оценки его качества, требуется более детальное изучение его свойств по всем составляющим – вещественной, энергетической и информационной.

Заключение

Понятие «жизнеспособность» востребовано в различных отраслях знания. В настоящей статье предпринята попытка обобщить понятие ЖС ТС. Любое свойство ТС может быть измерено качественным или количественным показателем, что позволяет получать обобщённые оценки ЖС ТС и сопоставлять ТС по единому показателю независимо от их назначения и сложности. Полнота оценки зависит от состава используемых свойств ЖС, присущих оцениваемой ТС.

Предложенная ОМ представляет в основном теоретический интерес и может быть принята за основу в дальнейших исследованиях ЖС ТС.

Список источников

- [1] *Heath S.* Embedded Systems Design. EDN Series for Design Engineers (2nd ed.). 2003.
- [2] *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition, MIT Press, 2017.
- [3] *Ахиезер А.С.* Жизнеспособность российского общества. *Общественные науки и современность*. 1996. № 6. С.58–66.
- [4] *Махнач А.В.* Жизнеспособность как междисциплинарное понятие. *Психологический журнал*. 2012. Т.33 №6. С.84–98.
- [5] *Махнач А.В.* Жизнеспособность человека и семьи: социально-психологическая парадигма. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2016. 459 с.
- [6] *Дегтярев П.А.* Тенденции устойчивого развития отечественных компаний металлургической отрасли. *Вопросы регулирования экономики*. 2022. Т.13. №1. С.88–99. DOI 10.17835/2078-5429.2022.13.1.088-099.
- [7] *Богданов А.А.* Борьба за жизнеспособность. М.: Новая Москва, 1927. 160 с.
- [8] *Бир. С.* Мозг фирмы. М.: УРСС. 1972. 412 с.
- [9] *Зимин Н.Н.* К вопросу о долговечности проектов и формировании жизнеспособных систем. *Труды института системного анализа Российской Академии наук*. 2013. Т.63. №1. С.16–29.
- [10] *Маслобоев А.В., Быстров В.В.* Концептуальная модель жизнеспособности критических инфраструктур в контексте современной теории безопасности сложных систем. *Экономика. Информатика*. 2020. Т.47. №3 С.555–572. DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-3-555-572.
- [11] *Неупокоева Е.О., Быстров В.В.* Анализ OLAP-решений для исследования жизнеспособности региональных социально-экономических систем. *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*. 2023. Т.14, №7. С.52–67. DOI:10.37614/2949-1215.2023.14.7.006.
- [12] *Докторович А.Б.* Разнообразие и сложность жизнеспособной системы. *Пространство и Время*. 2015. №3(21). С.86–91. EDN: UNZCWH.
- [13] ГОСТ Р 71476-2024. Искусственный интеллект. Концепции и терминология искусственного интеллекта. М.: Российский институт стандартизации. 2024. 62 с. Дата введения 01.01.2025.
- [14] *Разумовский О.С., Хазов М.Ю.* Проблема жизнеспособности систем. *Гуманитарные науки в Сибири. Серия: Философия и социология*. 1998. №1. С.3–7.
- [15] *Поспелов Д.А.* Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат. 1981. 232 с.
- [16] *Кузнецов О.П.* Дискретная математика для инженера. СПб.: Лань, 2004. 400 с.
- [17] *Trifonov E.N.* Vocabulary of definitions of life suggests a definition. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. 2011. V.29, no.2. P.259–266.
- [18] *Культурология. XX век: энциклопедия / Гл. ред., сост. С.Я. Левит.* СПб.: Университетская книга. 1998. 446 с.
- [19] *Кацнельсон З.С.* Клеточная теория в её историческом развитии. Ленинград: МЕДГИЗ, 1963. 344 с.
- [20] *Kutschera U., Niklas K.J.* The modern theory of biological evolution: an expanded synthesis. *Naturwissenschaften*. 2004. V.91, no.6. P.255–276.
- [21] *Новик А.А., Ионова Т.И., Шевченко Ю.Л.* Руководство по исследованию качества жизни в медицине. 2-е изд. М.: ОЛМА Медиа Групп; 2007. 320 с.
- [22] *Ковыньга О.А., Герасимов Б.И.* Управление качеством жизни. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2006. 89 с.
- [23] *Kosovskaya T.M.* Isomorphism of predicate formulas as the base of logic ontology construction. *International Journal "Information Theory and Applications"*. 2020. 27(3). P.248–254.
- [24] *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.
- [25] ГОСТ Р 27.102-2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации. 2021. 40 с. Дата введения 01.01.2022.
- [26] ГОСТ Р ИСО / МЭК 25010-2015. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов. М.: Стандартинформ. 2015. 36 с. Дата введения 06.01.2016.
- [27] *Кимяев И.Т., Соколов Б.В.* Модельно-алгоритмическое обеспечение для решения задач синтеза контуров и технологий проактивного управления жизнеспособностью сложных объектов. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2025. 26(7). С.335–346. DOI: 10.17587/mau.25.335-346.

- [28] **Кимяев И.Т., Соколов Б.В.** Проблемы и методические подходы к повышению жизнеспособности производственных объектов на основе концепции эволюционного управления. *Информационные технологии*, 2023, Т.29. №1. С.23-32. DOI: 10.17587/it.29.23-32.
- [29] **Соколов Б.В., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л.** Проактивная модернизация информационных систем на основе мониторинга функционального устаревания. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2023. №2. С.5-21. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/5-21.
- [30] **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН. 2018. 314 с. DOI: 10.31857/S9785907036321000001.
- [31] **Абросимов В.К.** Функциональная автономность интеллектуальной системы управления беспилотного летательного аппарата. *Авиакосмическое приборостроение*, 2025. №4. С.41-49. DOI: 10.25791/aviakosmos.4.2025.1476.

Сведения об авторах



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 СПИИРАН. В списке публикаций 350 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; ORCID: 0000-0001-7153-6804. smikoni@mail.ru. ✉

Соколов Борис Владимирович, 1951 г. рождения. Окончил Военно-космическую академию им. А.Ф. Можайского в 1974 г., д.т.н. (1993), профессор (1994), главный научный сотрудник СПб ФИЦ РАН. В списке публикаций более 750 работ, из них 31 монография и учебные пособия в области управления сложными организационно-техническими объектами, системного анализа, теории принятия решений, искусственного интеллекта. AuthorID (РИНЦ): 118026; Author ID (Scopus): 7101767324; Researcher ID (WoS): S-1946-2016; ORCID: 0000-0002-2295-7570. sokolov_boris@inbox.ru.



Поступила в редакцию 25.09.2025, после рецензирования 19.12..2025. Принята к публикации 29.12.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-14-24

Viability as a generalized characteristic of the properties of a technical system

© 2026, S.V. Mikoni ✉, B.V. Sokolov

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

With the growing complexity of modern technical systems and the increasing number of intelligent functions and properties inherent to living organisms, there is a need to generalize these properties within a unified conceptual framework. Various interpretations of system viability are considered across different domains as concepts reflecting the properties of living systems. In this study, the notion of viability is grounded in the concept of *life*, whose distinguishing features have been formulated within biology and related disciplines. Through a logical–linguistic analysis of these features, the study demonstrates the broader generality of individual viability compared to population viability, which is characterized by properties of reproduction and evolution. The conditions under which this concept can be applied to an individual technical system are considered. This article addresses the problem of constructing an ontological model of the viability of a technical system based on the proposed definition. The quality of life of a technical system is interpreted in

terms of the realizability of viability properties under changing internal and external environments. A set of such properties is defined. An ontological model of the viability of a technical system is proposed in the form of a directed graph, where the root node represents the viability of the system, and the leaf nodes correspond to the properties that ensure the viability of the system. If the viability of a technical system is treated as an aggregate property, the degree of its completeness is determined by the set of terminal properties inherent to the system. Methods for assessing the measure of viability are proposed.

Keywords: *concept, viability, definition, property, indicator, life, system, state, stability, development.*

Citation: *Mikoni SV, Sokolov BV. Viability as a generalized characteristic of the properties of a technical system [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 14-24. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-14-24.*

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

Authors' contributions: *Mikoni SV.* – Sections 2-6, Conclusion; *Sokolov BV.* – Introduction, Section 1; Section 5 – joint contribution.

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

List of figures

Figure 1 – Graph of the concept "Viability of a Technical System"

References

- [1] *Heath S.* Embedded Systems Design. EDN Series for Design Engineers (2nd ed.). 2003.
- [2] *Lee EA, Seshia SA.* Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition, MIT Press, 2017.
- [3] *Akhiezer AS.* Viability of Russian society [In Russian]. *Social sciences and modernity*. 1996; 6: 58–66.
- [4] *Makhnach AV.* Vitality as an interdisciplinary concept [In Russian]. *Psychological Journal*. 2012; 33(6): 84-98.
- [5] *Makhnach AV.* Viability of an individual and family: a socio-psychological paradigm. [In Russian] Moscow: Publishing house "Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences", 2016. 459 p.
- [6] *Degtyarev PA.* Trends in sustainable development of domestic companies in the metallurgical industry / P. A. Degtyarev [In Russian]. *Journal of Economic Regulation*. 2022; 13(1): 88-99. DOI 10.17835/2078-5429.2022.13.1.088-099.
- [7] *Bogdanov AA.* The Struggle for Viability [In Russian]. Moscow: New Moscow, 1927.
- [8] *Bir S.* The brain of the firm [In Russian] Moscow: URSS. 2005. 412 p.
- [9] *Zimin NN.* On the issue of durability of projects and the formation of viable systems [In Russian] // Proceedings of the Institute of Systems Analysis of the Russian Academy of Sciences. 2013. Vol. 63. No. 1. Pp. 16-29.
- [10] *Masloboev AV, Bystrov VV.* Conceptual model of the viability of critical infrastructures in the context of modern security theory of complex systems [In Russian]. *Economics. Information technologies* 2020; 47(3): 555-572. DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-3-555-572.
- [11] *Neupokoeva EO, Bystrov VV.* Analysis of OLAP solutions for studying the viability of regional socio-economic systems [In Russian]. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences*. 2023; 14(7): 52–67.
- [12] *Doctorovich AB.* Diversity and complexity of a viable system [In Russian]. *Space and Time*. 2015; 3(21): 86-91.
- [13] GOST R 71476-2024. Artificial intelligence. Artificial intelligence concepts and terminology [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization. 2024. 62 p. Effective date: 01.01.2025.
- [14] *Razumovsky OS, Khazov MYu.* The Problem of Viability of Systems [In Russian]. *Humanities in Siberia. Series: Philosophy and Sociology*. 1998; 1: 3–7.
- [15] *Pospelov DA.* Logical and linguistic models in control systems. [In Russian] Moscow: Energoizdat. 1981. 232 p.
- [16] *Kuznetsov OP.* Discrete Mathematics for an Engineer [In Russian]. St. Petersburg: Lan, 2004. 400 p.
- [17] *Trifonov EN.* Vocabulary of definitions of life suggests a definition. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. 2011; 29(2): 259-266.
- [18] Cultural Studies. 20th Century: Encyclopedia [In Russian]. Ed.-in-chief, compiled by S.Ya. Levit. St. Petersburg: University Book. 1998. 446 p.
- [19] *Katsnelson Z.S.* Cell Theory in Its Historical Development. [In Russian] Leningrad: MEDGIZ, 1963. 344 p.
- [20] *Kutschera U, Niklas K.J.* The modern theory of biological evolution: an expanded synthesis (eng.) // *Naturwissenschaften*. 2004. Vol. 91, no. 6. P. 255—276.

- [21] **Novik AA, Ionova TI, Shevchenko YuL.** Guide to Researching Quality of Life in Medicine. 2nd ed. [In Russian] Moscow: OLMA Media Group; 2007. 320 p.
- [22] **Kovynева OA, Gerasimov BI.** Life quality management [In Russian]. Tambov: Tambov State Technical University, 2006. 89 p.
- [23] **Kosovskaya TM.** Isomorphism of predicate formulas as the base of logic ontology construction. *International Journal "Information Theory and Applications"*. 2020; 27(3): 248-254.
- [24] **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.
- [25] GOST R 27.102-2021. Reliability in Engineering. Object Reliability. Terms and Definitions [In Russian]. Moscow: Russian Institute of Standardization. 2021. 40 p. Effective date: 01.01.2022.
- [26] GOST R ISO/IEC 25010-2015. Information technology. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). System and software quality models [In Russian]. Moscow: Standartinform. 2015. 36 p. Effective date 06.01.2016.
- [27] **Kimyaev IT, Sokolov BV.** Model-algorithmic support for solving problems of circuit synthesis and technologies for proactive control of the viability of complex objects [In Russian]. *Mechatronics, automation, control*. 2025; 26(7): 335-346. DOI: 10.17587/mau.25.335-346.
- [28] **Kimyaev IT, Sokolov BV.** Problems and methodological approaches to increasing the viability of production facilities based on the concept of evolutionary management [In Russian]. *Information Technologies*, 2023; 29(1): 23-32. DOI: 10.17587/it.29.23-32.
- [29] **Sokolov BV, Mironov AN, Shestopalova OL.** Proactive modernization of information systems based on monitoring functional obsolescence [In Russian]. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technology*, 2023; 2: 5-21. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/5-21.
- [30] **Mikoni SV, Sokolov BV, Yusupov RM.** Qualimetry of models and multimodel complexes [In Russian]. Moscow: RAS. 2018. 314 p. DOI: 10.31857/S9785907036321000001.
- [31] **Abrosimov VK.** Functional autonomy of an intelligent control system of an unmanned aerial vehicle [In Russian]. *Aerospace instrument making*, 2025; 4: 41-49. DOI: 10.25791/aviakosmos.4.2025.1476.
-

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 Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. He is the author and a co-author of 350 publications, including 2 monographs and 7 textbooks in the fields of technical diagnostic, discrete mathematics, system analyses, artificial intelligence, and decision-making theory. AuthorID (РИИЛ): 100261; Author ID (Scopus): 57192370467; Researcher ID (WoS): W-3236-2019; ORCID: 0000-0001-7153-6804. smikoni@mail.ru. ✉

Boris Vladimirovich Sokolov (b.1951) graduated from the Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky in 1974, D. Sc. Eng. (1993), Professor (1994), Chief Researcher at the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. He is the author and a co-author of more than 750 publications, including 31 monographs textbooks in the fields of management of complex organizational and technical objects, system analysis, decision-making theory, and artificial intelligence. AuthorID (РИИЛ): 118026; Author ID (Scopus): 7101767324; Researcher ID (WoS): S-1946-2016; ORCID: 0000-0002-2295-7570. sokolov_boris@inbox.ru.

Received August 22, 2025. Revised December 19, 2025. Accepted December 29, 2025.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.04

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39

**Онтологическая модель профилактического обслуживания оборудования промышленного предприятия**© 2026, М.А. Насонов¹✉, С.А. Манцеров²¹ Группа компаний «Синтез-ОКА», Дзержинск, Россия² Нижегородский государственный технический университет (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия**Аннотация**

Рассматривается задача формализации экспертных знаний в области профилактического технического обслуживания промышленного оборудования, возникающая при интерпретации результатов визуальных осмотров с учётом условий эксплуатации. Предметом исследования является построение онтологической модели, обеспечивающей логически обоснованный переход от неструктурированных описаний признаков технического состояния к конкретным действиям по обслуживанию оборудования. Предложена многоуровневая онтологическая модель, включающая уровни: осмотр, признаки, контекст эксплуатации, техническое состояние, действие. Областью применения результатов являются системы поддержки принятия решений в техническом обслуживании оборудования. Новизна заключается в объединении параметров контекста (возраст объекта, уровень критичности, агрессивность рабочей среды и др.) с механизмом логического вывода, а также в применении метода структурирования рекомендаций как композиции базового действия и уточнений по условиям эксплуатации. Модель построена в среде *Python* и проверена на конкретной выборке данных: автоматически определены состояния оборудования, выработаны адаптивные рекомендации, сформированы отчёты. Модель показала устойчивость к неполноте информации. Применённый онтологический подход в технической диагностике способствовал получению практически значимых результатов для цифровизации процессов профилактического технического обслуживания оборудования в промышленности.

Ключевые слова: онтология, профилактическое обслуживание, осмотр оборудования, техническое состояние, контекст эксплуатации, логический вывод, экспертные знания.

Цитирование: Насонов М.А., Манцеров С.А. Онтологическая модель профилактического обслуживания оборудования промышленного предприятия. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.25-39. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39.

Вклад авторов: Насонов М.А. – постановка задачи, разработка концепции, формализация модели, разработка программного кода; Манцеров С.А. – экспертиза материалов, проверка результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В условиях повышенных требований к надёжности, безопасности и эффективности технологических процессов промышленных предприятий возрастает значимость профилактического технического обслуживания (ПТО) оборудования [1]. Переход от планово-предупредительных ремонтов к модели ПТО на предприятии рассматривается как комплексный, многоаспектный, эволюционный процесс. Для этого требуются изменения в организационной структуре и методах представления знаний о техническом состоянии (ТС) оборудования, особенно в условиях цифровизации производственной среды.

Эффективность принимаемых решений во многом определяется не только технической оснащённостью предприятия, но и доступностью, полнотой и структурированностью знаний о фактическом ТС оборудования [2–5]. Значительная часть информации формируется в процессе проведения осмотров оборудования и опросов персонала, а также фиксируется в документах (актах, журналах, отчётах и др.). Эти данные включают конкретные наблюдаемые явления (например, потёки масла, следы коррозии, повышенные люфты и др.) и характеристики условий эксплуатации оборудования (интенсивность нагрузок, температурные колебания, агрессивность рабочей среды и др.). Большинство подобных сведений представлены в виде неструктурированных текстов и описаний с использованием профессионального жаргона и субъективных оценок, что делает их малоприспособленными для автоматической обработки и включения в цифровые платформы. Формализованные источники знаний (регламенты эксплуатации, паспорта оборудования, отраслевые и межотраслевые стандарты), как основа для нормативного подхода к обслуживанию, обычно лишены гибкости. Они не учитывают особенности эксплуатации отдельно взятого экземпляра оборудования, изменения его ТС между проверками, нарастающие эффекты усталости, историю отказов и редко содержат предписания, адаптируемые к текущей ситуации на объекте. С одной стороны, имеется обширный, но слабо формализованный набор эмпирических и экспертных данных, с другой, – формально полная, но жёсткая и неиндивидуализированная нормативная база. Это затрудняет формирование общей картины ТС оборудования, и требуется разработка подхода, способного включать разнородные источники в единую формальную модель, пригодную для использования в цифровой среде.

В этой связи актуальна задача объединения разнородных знаний, вовлечённых в процессы ПТО: *формализованных* в виде технической документации, инструкций по эксплуатации, стандартов обслуживания; *неформализованных*, включая наблюдения специалистов, текстовые описания результатов осмотров, прецеденты из истории ремонтов и индивидуальные особенности условий эксплуатации оборудования. Для решения этой задачи требуется создание формальной модели, способной выразить сущности, отношения и контекст ПТО в целостной и связной форме. Подобную модель можно создать в виде онтологии, позволяющей объединить и формализовать знания различной природы. Для этого необходимо формализовать предметную область (ПрО) ПТО с учётом её многоуровневой природы [6], выделить ключевые сущности и связи на основе анализа технической документации, стандартов, результатов осмотров и экспертных заключений, описать онтологическую структуру, построить полученную модель в *OWL*-формате [7] и проверить её применимость на реальных данных. Онтологическая модель (ОМ) предназначена для использования в цифровой среде и ориентируется на поддержку принятия решений (ППР), связанных с выбором и приоритизацией профилактических действий.

1 Обзор существующих подходов

В различных отраслях накоплен опыт применения онтологий для представления структурированных и неструктурированных данных, диагностики ТС, прогнозирования отказов и выбора обслуживающих воздействий.

Вопросы общей структуры и принципов построения онтологий рассмотрены в работе [8]. В контексте технических систем онтологии обеспечивают основу для семантической интероперабельности и повторного использования знаний. В [9] предложена гибкая методология инжиниринга онтологий, включающая поэтапное уточнение требований, итеративное построение онтологической структуры и валидацию с участием экспертов. Особое внимание уделяется прототипированию и адаптации к изменяющимся требованиям, что важно в усло-

виях промышленной эксплуатации оборудования. В [10] описаны онтологии, интегрированные в процессы проектирования, эксплуатации и обслуживания. Такой подход предполагает тесную связь между инженерными моделями, цифровыми двойниками и онтологическими представлениями. Важным является использование онтологии как структуры, объединяющей проектные, эксплуатационные и ремонтные данные. Анализ методологий, представленный в [11], сопоставляет распространённые подходы и выделяет критерии выбора методологии в зависимости от ПрО. Такой анализ важен при разработке онтологий для промышленных систем, где требуются адаптивность и итеративная валидация знаний.

Одно из направлений применения онтологий в технических системах связано с оценкой состояния оборудования и диагностикой отказов. В работах [12-14] ОМ используются как основа для представления признаков деградации, состояний объектов и правил принятия решений о необходимых воздействиях. ОМ позволяет формализовать причинно-следственные связи между наблюдаемыми аномалиями, факторами эксплуатации и потенциальными неисправностями. В [12] онтология дополняется предиктивным механизмом вывода и модулем интеллектуального слияния данных, что позволяет учитывать как текущие параметры состояния, так и историческую информацию о неисправностях, создавая предпосылки для более точного прогнозирования и раннего предупреждения отказов. Работа [15] посвящена оценке ТС электрооборудования с использованием нечётких весовых правил, разработке структуры признаков, состояний и воздействий, показана возможность гибкой интерпретации данных, поступающих из различных источников. В [16] предложено использовать иерархию продукционных правил, основанных на онтологической структуре объекта, для автоматизации диагностических процедур и принятия решений в условиях неполной информации. В [17] онтология используется как каркас для сопоставления цифровых моделей разрушенных стержневых систем с реальными объектами. Это позволяет формировать обоснованные предложения по техническому воздействию, учитывая различные источники информации о повреждениях и обстановке в эксплуатации. В [18] рассмотрен подход к построению ОМ на примере мостовых конструкций и приводятся конкретные правила, что позволяет оценивать ТС объекта на основе наблюдаемых признаков (например, трещин).

Для задач ППР в ПТО онтологии позволяют структурировать знания о типовых ситуациях, обслуживающих действиях, нормативных ограничениях и предпочтительных стратегиях ремонта. Архитектура цифрового двойника для диагностики неисправностей в производственных системах рассмотрена в [19] и предложено расширить когнитивные свойства цифровых двойников, где знания экспертов, семантическая совместимость и логический вывод используются в принятии решений в области обслуживания оборудования.

Онтологии находят широкое применение в моделировании жизненного цикла (ЖЦ) оборудования. Методология, предложенная в [20], дополняет рассмотренные подходы введением многоуровневой структуры онтологий, в которой различаются уровни концептов – от общих понятий до конкретных объектов оборудования. Таким образом, ОМ, учитывающие ЖЦ и контекст эксплуатации, обеспечивают точность, адаптивность и применимость в условиях промышленной эксплуатации оборудования.

Таким образом, актуальной задачей становится разработка ОМ, способной объединить различные уровни знаний – от описания объекта и признаков до определения действия и обеспечить их формализованное, логически связанное представление в цифровой среде.

2 Постановка задачи

Система ПТО на многих предприятиях строится на основе нормативно-справочной информации (перечни оборудования, классификаторы типовых работ, нормы ремонтных цик-

лов, методы контроля и др.). Эти данные в большинстве своём формализованы, что позволяет автоматизировать планирование ремонтов и документооборот. Однако действующие модели остаются ограниченными в части представления знаний о реальном ТС оборудования.

Практика эксплуатации оборудования на предприятии показывает, что информация о деградации оборудования и отклонениях от нормального ТС обычно содержится в текстовых описаниях актов осмотров, дефектных ведомостей, отчётов и оперативных журналах. Анализ описаний показывает, что в одном фрагменте текста могут одновременно присутствовать элементы различных уровней: описание физического объекта (например, «шток клапана»), наблюдаемый признак (например, «большой люфт»), оценка ТС (например, «допустимо, но требует наблюдения») и условия эксплуатации (например, «агрессивная среда»). Как правило, системы ПТО не обладают средствами формального представления таких многоуровневых знаний и не обеспечивают логических связей между условиями, признаками, состояниями и действиями. Это затрудняет автоматический анализ повторяющихся ситуаций, обобщение опыта, а также исключает возможность создания конкретизированных рекомендаций, учитывающих условия эксплуатации каждого экземпляра оборудования.

В условиях перехода к цифровым контурам управления и системам ППР ставится задача разработки ОМ экспертных знаний в ПТО, объединяющей результаты осмотров и условий эксплуатации и обеспечивающей ППР в ПТО.

3 Построение онтологической модели экспертных знаний

Предлагаемый подход основан на положениях стандартов, регламентирующих надёжно-ориентированное техническое обслуживание [21] и устанавливающих правила мониторинга ТС оборудования [22], а также принципах онтологического проектирования [23, 24].

3.1 Источники знаний

Классификация источников знаний представлена на рисунке 1.

Среди структурированных источников выделяются: нормативно-техническая документация, техническая и эксплуатационная документация (например, руководства по эксплуатации), классификаторы дефектов и др. (например, справочники технических характеристик оборудования). К числу неструктурированных источников относятся результаты осмотров, содержащие текстовые описания визуальных признаков, записи в различных учётных оперативных журналах, включающие экспертные оценки ТС и параметры условий эксплуатации.



Рисунок 1 – Источники знаний для использования в онтологической модели

3.2 Характеристика предметной области (пример)

Про исследования охватывает процессы ПТО запорной и регулирующей арматуры, эксплуатируемой в технологических системах химического производства. К данному классу оборудования относятся проходные седельные клапаны, предохранительные клапаны, регулирующие клапаны и электромагнитные клапаны различных типоразмеров. Эти изделия различаются по функциональному назначению, однако, обладают общими

конструктивными признаками и схожей структурой данных, что позволяет рассматривать их в едином онтологическом контексте.

Каждый клапан представляет собой техническую систему, включающую корпус, седло, запорный элемент (золотник, плунжер), пружинный механизм, уплотнительные элементы и привод. В процессе эксплуатации наибольшие нагрузки и износ испытывают запорные и уплотняющие детали, взаимодействующие со средой под давлением. В документации и данных осмотров выделяются типовые детали и узлы, формирующие основу для описания онтологических классов (корпус, седло, шток, пружина, уплотнение и др). В профилактическом обслуживании выявляются характерные дефекты и повреждения, связанные с коррозией, износом, деформацией и нарушением герметичности. Распространённые признаки, фиксируемые в результатах осмотров, включают, например: коррозионные повреждения корпуса или седла; износ уплотнительных элементов; ослабление пружины; загрязнение внутренних полостей; и др.

Для проведения анализа результатов осмотров выделяются следующие параметры условий эксплуатации: агрессивность среды (условно нормальная, повышенная или высокая); критичность оборудования (значимость отказа для технологического процесса); год изготовления (возраст оборудования); наработка (время) от предыдущего осмотра; история отказов.

Эти параметры образуют контекст, в рамках которого выполняется интерпретация признаков и формируются рекомендации по обслуживанию. Например, для клапанов с высокой критичностью и агрессивной средой даже незначительные признаки износа могут служить основанием для досрочной замены или внеочередного обслуживания, тогда как для клапанов нормальной категории допускается плановое устранение дефектов в рамках очередного цикла. График ПТО определяет периодичность осмотров, виды технических воздействий (очистка, регулировка, замена уплотнений, проверка герметичности и т.п.), а также позволяет согласовать загрузку ремонтных бригад и минимизировать простои технологического оборудования [25].

3.3 Структура знаний

Анализ источников позволяет выделить пять взаимосвязанных онтологических уровней, обеспечивающих полноту представления экспертных знаний (см. рисунок 2).

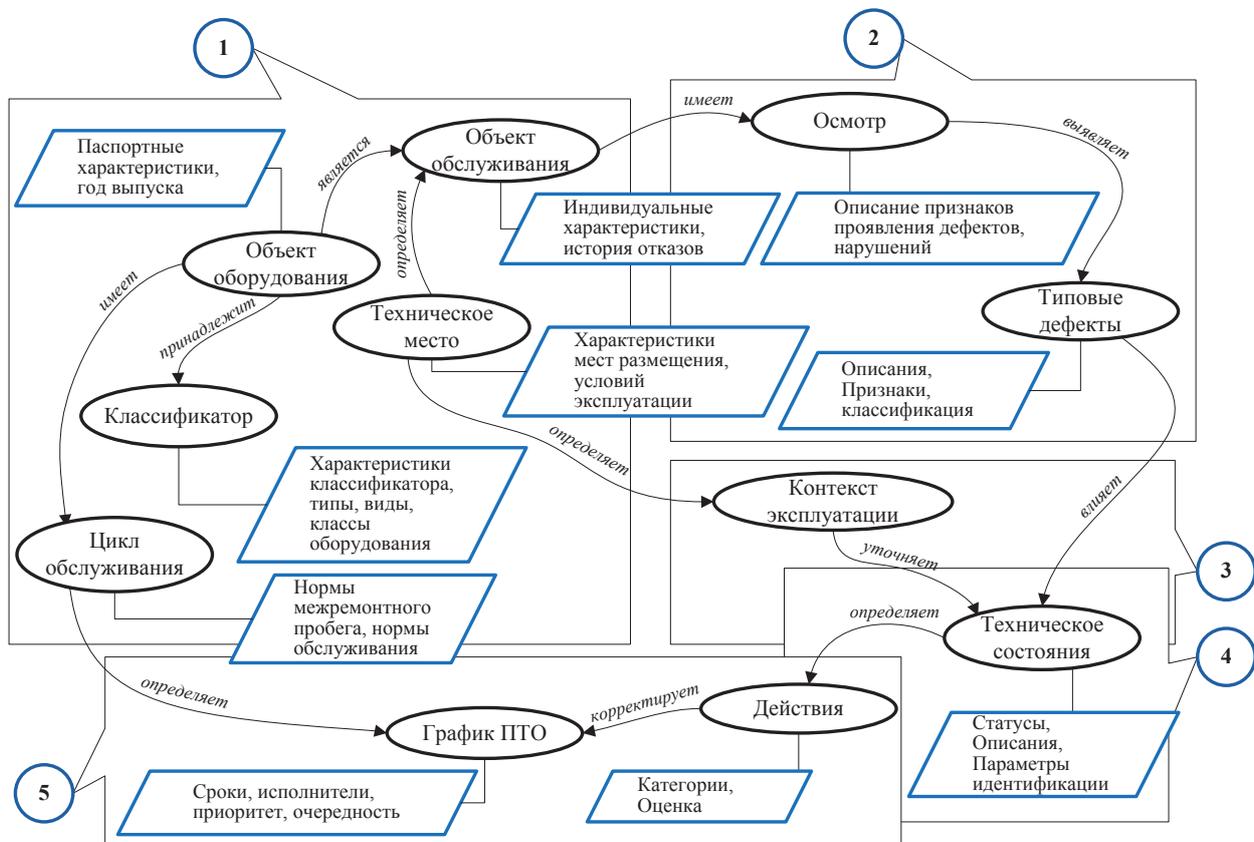


Рисунок 2 – Концептуальная схема онтологии профилактического технического обслуживания (ПТО)

- 1) *объектный уровень* представляет оборудование и его составные части (например, корпус, шток, седло и др.), обладающие конструктивными, функциональными и материальными характеристиками.
- 2) *признаковый уровень* содержит наблюдаемые признаки отклонений, выявляемые в процессе осмотров (например, коррозия, потёки, деформация, люфт и др.).
- 3) *контекстный уровень* описывает условия эксплуатации (например, температура, агрессивность среды, режимы нагрузки и др.), влияющие как на появление признаков, так и на допустимость определённого ТС.
- 4) *оценочный уровень* содержит экспертные суждения о ТС объекта (например, исправно, требует наблюдения, неисправно и др.).
- 5) *рекомендательный уровень* связывает оценки и контекст с типовыми действиями по обслуживанию, регламентными мероприятиями или дополнительными осмотрами.

Выделены сущности ПрО и их отношения и проведена формализация уровней в виде классов и свойств. ОМ позволяет учитывать обнаруженные дефекты и условия, в которых эксплуатируется объект.

3.4 Взаимодействие между уровнями онтологической модели

Переходы между уровнями ОМ формализованы следующими отображениями. Из множества результатов осмотров I извлекается множество признаков S с помощью функции $f_1: I \rightarrow S$. На основе множества признаков S и параметров контекста C определяется предполагаемое состояние объекта T функцией $f_2: S \times C \rightarrow T$. Каждому состоянию сопоставляется действие по обслуживанию A функцией $f_3: T \rightarrow A$.

Таким образом, сложная функция принятия решения имеет вид: $f(O) = f_3(f_2(f_1(I_O), C_O))$, где: I_O – результаты осмотров объекта O , C_O – параметры контекста эксплуатации объекта O , *результат* — действие A , учитывающее признаки дефектов и условия эксплуатации.

3.5 Компоненты онтологической модели

В таблице 1 приведён перечень компонентов ОМ с пояснениями их назначения, где представленные классы формируют концептуальную основу ОМ, определяя её предметную структуру. Каждый класс отражает отдельный аспект знаний о ТС оборудования – от первичных наблюдений до формализованных решений.

Таблица 1 – Классы модели

Наименование	Обозначение	Описание
Технический объект	<i>TechnicalObject</i>	Описывает технический объект (единицу оборудования), к которому относятся осмотры и параметры контекста
Результат осмотра	<i>Inspection</i>	Начальный источник информации, содержащий текстовое описание визуального состояния объекта. Представляет собой фактические наблюдения, зафиксированные экспертами или операторами
Признак	<i>ObservedSign</i>	Потенциально свидетельствует о нарушениях и является промежуточным звеном между неструктурированной информацией и её формализованным описанием
Контекст эксплуатации	<i>ContextParameter</i>	Включает параметры, влияющие на допустимые отклонения и требования к обслуживанию: критичность объекта, агрессивность среды эксплуатации. Эти параметры участвуют в логике определения состояния и приоритизации рекомендаций
Техническое состояние	<i>TechnicalState</i>	Формализованная категория, обобщающая совокупность признаков с учётом условий эксплуатации. Позволяет систематизировать объекты по степени отклонения от нормы и потенциальной угрозе отказа
Действие по обслуживанию	<i>MaintenanceAction</i>	Заключительное звено в цепочке вывода — конкретная рекомендация по вмешательству, обслуживанию или наблюдению

ОМ дополняется атрибутами, определяющими свойства экземпляров классов и обеспечивающими возможность логического вывода.

3.6 Инструментальные средства

ОМ построена с использованием библиотеки *Owlready2*¹, предназначенной для работы с онтологиями в формате *OWL (Web Ontology Language)*² в среде *Python*, что позволило обеспечить объединение онтологической структуры с процедурной логикой обработки технических осмотров и выработки рекомендаций. Выбор инструментария обусловлен функциональными возможностями библиотеки *Owlready2* и технологической совместимостью с инфраструктурой информационной системы³. Преимуществом данного инструментария является наличие поддержки классов *OWL*, объектных и атрибутивных свойств, механизмов логического вывода, а также возможность выполнения *SPARQL*⁴-запросов.

Интерактивная среда *Jupyter Notebook*⁵ позволила обеспечить пошаговую проверку логики модели и визуализацию промежуточных и итоговых результатов. Для предварительной обработки данных, загрузки таблиц, формирования отчётов и выполнения диагностических проверок применены инструменты библиотеки *pandas*⁶. Модули визуализации основаны на библиотеке *matplotlib*⁷. Структура модулей проекта представлена в таблице 2. Онтология сохраняется в формате *RDF/XML* и может быть экспортирована в другие системы.

Таблица 2 – Модули проекта

Модуль	Описание
<i>ontology_builder.py</i>	Построение и наполнение онтологии на основе исходных данных
<i>ontology_keywords.py</i>	Словари признаков, состояний и контекстных правил
<i>ontology_logic.py</i>	Логика вывода состояний и действий
<i>out_report.py</i>	Экспорт и форматирование отчётов в электронные таблицы
<i>ontology_visualizations.py</i>	Визуализация распределения признаков и состояний

3.7 Атрибуты классов

Для работы логики вывода требуется использование не только онтологических классов, но и их атрибутов – свойств, формализующих конкретные значения, описывающие состояние объекта (см. таблицу 3). Эти свойства позволяют модели структурировать информацию и выполнять над ней логические действия, например, фильтрация по возрасту объекта, по типу среды, по уровню критичности, получение итоговых рекомендаций и др.

Таблица 3 – Атрибуты классов модели

Класс	Атрибут	Тип	Назначение
<i>TechnicalObject</i>	<i>name</i>	Строка	Идентификатор объекта обслуживания
	<i>obj_type</i>	Строка	Тип оборудования
	<i>manufactureYear</i>	Целое число	Год выпуска оборудования (ввода в эксплуатацию)
	<i>criticality</i>	Строка	Уровень критичности отказов
	<i>environment</i>	Строка	Характеристика среды эксплуатации
<i>Inspection</i>	<i>inspection_date</i>	Дата	Дата проведения осмотра
	<i>inspection_text</i>	Строка	Текстовое описание результата осмотра
<i>ObservedSign</i>	<i>sign_name</i>	Строка	Наименование признака
<i>TechnicalState</i>	<i>state_description</i>	Строка	Описание состояния
<i>MaintenanceAction</i>	<i>action_description</i>	Строка	Текст рекомендуемого действия

¹ <https://pypi.org/project/owlready2>.

² <https://www.w3.org/OWL>.

³ Свидетельство о гос. регистр. пр. для ЭВМ № 2025612152 Росс. Ф. Система управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования (СММС) : заявл. 23.01.2025 : опубли. 28.01.2025 / М.А. Насонов.

⁴ <https://www.w3.org/TR/sparql11-query>.

⁵ <https://jupyter.org>.

⁶ <https://pandas.pydata.org>.

⁷ <https://matplotlib.org>.

3.8 Схема логического вывода

Логика работы модели выполняет поэтапный переход от результатов осмотра к формированию обоснованной рекомендации по ПТО (см. рисунок 3).



Рисунок 3 – Схема логического вывода

После получения результатов осмотра производится выделение признаков из текстового описания. Для этого используется словарь признаков, в котором каждому ключевому слову сопоставлен формализованный признак, а также связанное с ним возможное ТС. Анализ текста осмотра осуществляется по правилу полного или частичного совпадения с ключевыми словами. Один результат осмотра может содержать несколько признаков, каждый из которых учитывается при определении ТС. Для каждого технического объекта учитываются параметры, определяющие контекст эксплуатации (год выпуска оборудования, уровень критичности отказов, характеристика среды эксплуатации). Контекст оказывает непосредственное влияние на оценку выявленных признаков. Например, наличие потёков на объекте, эксплуатирующемся в агрессивной среде и с высокой критичностью, оценивается как более значимое отклонение, чем на объекте с низкой критичностью в нормальной среде. На основе совокупности признаков и контекстных факторов определяется предполагаемое ТС. Функция модуля *ontology_logic.py* реализует правила сопоставления признаков и состояний:

- приоритет состояний (например, ремонт имеет больший вес, чем вмешательство);
- диагностика в случае отсутствия признаков – объекту присваивается ТС «в норме»;
- обработка неопределённости (например, наличие противоречивых признаков или недостаточной информации приводит к присвоению ТС «не определено»).

После определения ТС формируется рекомендация по обслуживанию, при этом модулем *ontology_logic.py* учитываются:

- базовое действие, соответствующее ТС (например, ремонт → провести ремонт);
- модификации действия в зависимости от критичности (например, при высокой критичности добавляется указание на срочность);
- уточнение по агрессивности среды (например, добавляется требование полной разборки или усиленного контроля).

3.9 Обработка неполной информации

Особенностью построенной ОМ является способность системно обрабатывать неопределённость в исходной информации. Если в тексте осмотра не обнаружено ни одного ключевого слова, соответствующего признаку из словаря модуля *ontology_keywords.py*, то это может означать либо отсутствие технических замечаний (в случае, если текст явно указывает на норму, например, «замечаний нет»), либо неполноту или ошибку в описании результатов осмотра (например, слишком краткий или непонятный текст). Для различения этих случаев в ОМ введено правило: если текст содержит маркеры типа «замечаний нет», объекту присваивается ТС «в норме» и формируется рекомендация «не требует обслуживания». Если таких маркеров нет и признаки не найдены, то ТС объекта описывается как «не определено», а рекомендация — как «недостаточно данных для заключения».

Если в одном осмотре одновременно присутствуют признаки, которые при обычной логике вывода соответствуют различным ТС (например, и «коррозия» → ремонт, и «потёки» → вмешательство), то используется иерархия приоритетов:

- каждому признаку соответствует базовое состояние;
- ТС упорядочены по степени важности (например: норма < вмешательство < ремонт);
- выбирается наиболее жёсткое из возможных ТС.

Это позволяет гарантировать, что возможные риски не будут недооценены.

Если по объекту отсутствует информация о контексте эксплуатации (например, не указан год выпуска или критичность), то: возраст считается равным 0; критичность по умолчанию считается средней; агрессивность среды — нормальной. Эти значения используются как консервативная база, позволяющая продолжить формирование ТС и рекомендации, но с пометкой о необходимости уточнения данных.

Когда невозможно ни по признакам, ни по контексту достоверно определить ТС объекта, он классифицируется в специальную категорию «не определено». Это важно для:

- оценки качества входных данных;
- дополнительного контроля полноты осмотров;
- приоритизации повторных проверок.

Таким образом, ОМ позволяет выявлять явно заданные случаи, зоны информационной неопределённости и обрабатывать их в рамках общей логики.

4 Пример работы модели

В качестве источника данных использовались результаты осмотров оборудования, фрагмент с описанием которых представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Информация о результатах осмотров (фрагмент)

Объект	Содержание результата осмотра
Клапан №7	Обнаружены потёки из-под уплотнения
Клапан №8	Обнаружены следы подтекания рабочей жидкости, есть течь
Клапан №9	На корпусе обнаружены следы выдавливания смазки
Клапан №36	Наблюдается заедание штока при работе клапана
Клапан №31	Наблюдается растрескивание изоляции проводов на узле управления
Клапан №55	Замечания отсутствуют
Клапан №32	Следы коррозии на крепёжных соединениях трубопровода и клапана

Результаты осмотров были зафиксированы в условиях различной критичности и агрессивности среды эксплуатации. Фрагмент информационного представления условий эксплуатации оборудования представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Информация о контексте эксплуатации оборудования (фрагмент)

Объект	Год выпуска	Критичность отказа	Агрессивность среды	Вероятность безотказной работы в течение срока службы	Количество циклов работы до отказа
Клапан №7	2017	Средняя	Слабо агрессивная	0,99	4000
Клапан №8	2018	Средняя	Агрессивная	0,99	4000
Клапан №9	1998	Низкая	Агрессивная	0,98	3000
Клапан №36	2015	Высокая	Агрессивная	0,97	2000
Клапан №31	2011	Средняя	Высоко агрессивная	0,99	4000
Клапан №55	2022	Средняя	Агрессивная	0,99	4000
Клапан №32	2014	Низкая	Высоко агрессивная	0,98	3000

В таблице 6 приведены обобщённые тексты осмотров и признаки, автоматически извлечённые из неструктурированных описаний с использованием словаря. Признаки могут включать как единичные термины, так и их сочетания, что влияет на дальнейшую интерпретацию.

Таблица 6 – Результаты осмотров и извлечённые признаки (пример)

Объект	Год выпуска	Результат осмотра	Извлечённые признаки
Клапан_№7	2017	Обнаружены потёки	Потёки
Клапан_№8	2018	Утечка и потёки на корпусе	Утечка, потёки
Клапан_№9	1998	Признаки разрушения уплотнения	Разрушение
Клапан_№36	2015	Нарушение нормальной работы штока	Повреждение
Клапан_№31	2011	Корпус частично разрушен	Разрушение
Клапан_№55	2022	Замечаний нет	(нет признаков)
Клапан_№32	2014	Коррозия элементов	Коррозия

В таблице 7 приведены признаки и контекст эксплуатации к формализованному ТС. В логике модели учитывается приоритет критичных признаков, возраст объекта, а также отсутствие информации. Например, в случае объекта Клапан_№55 ТС определено как «норма» на основании отсутствия замечаний.

Таблица 7 – Интерпретированные состояния по признакам и контексту (пример)

Объект	Признак	Состояние	Основание интерпретации
Клапан_№7	Потёки	Вмешательство	выявлен признак средней важности
Клапан_№8	Утечка, потёки	Вмешательство	множественные признаки
Клапан_№9	Разрушение	Ремонт	критичный признак + давний год выпуска
Клапан_№36	Повреждение	Ремонт	критичный признак
Клапан_№31	Разрушение	Ремонт	критичный признак
Клапан_№55	(нет признаков)	Норма	отсутствуют признаки, указано «нет замечаний»
Клапан_№32	Коррозия	Наблюдение	выявлен признак средней важности

Таблица 8 содержит пример итоговых рекомендаций по ПТО, сформированных с учётом всех факторов. Например, для Клапана №9 сформулирована жёсткая мера — «замена» – ввиду критичного признака разрушения и истекшего срока службы, а для Клапана №55, эксплуатируемого в нормальной среде с низкой критичностью, указано отсутствие необходимости вмешательства. Пример иллюстрирует полноту и адаптивность онтологического вывода, демонстрируя как прямые логические зависимости (признак → действие), так и влияние контекста эксплуатации на итоговую рекомендацию.

Таблица 8 – Итоговые рекомендации по техническому обслуживанию (пример)

Объект	Состояние	Рекомендация
Клапан_№7	Вмешательство	Провести техническое обслуживание в плановом порядке
Клапан_№8	Вмешательство	Провести техническое обслуживание в плановом порядке
Клапан_№9	Ремонт	Заменить из-за истекшего срока службы, не ремонтировать
Клапан_№36	Ремонт	Выполнить ремонт немедленно
Клапан_№31	Ремонт	Выполнить ремонт в плановом порядке, с полной диагностикой
Клапан_№55	Норма	Не требует обслуживания
Клапан_№32	Наблюдение	Провести техническое обслуживание в плановом порядке

ОМ формализует последовательность переходов от наблюдаемых признаков к действиям по ПТО с учётом контекста эксплуатации и возможной неполноты информации. На выборке из 58 записей осмотров клапанов получены следующие результаты и выводы:

- извлечение признаков из текстов осмотров выполнено автоматически с точностью более 90%;
- интерпретация ТС в случае множественных и конфликтующих признаков проводилась корректно;

- рекомендации, сформированные моделью, в 87% случаев совпали с экспертными заключениями;
- для объектов с недостаточной информацией ТС «не определено» с предложением повторной диагностики.

На рисунке 4 представлено распределение состояний клапанов в виде круговой диаграммы. Распределение свидетельствует о преобладании состояния «вмешательство», что требует приоритизации профилактических мероприятий. Вместе с тем, почти треть объектов находится в норме, и лишь менее 2% остались без определения (что говорит о хорошей полноте данных). Автоматически формируемый отчёт в машиночитаемом формате (*Excel*) пригоден для передачи в подсистему планирования ремонтов, а визуализация (в виде круговых диаграмм) повышает удобство анализа.

Предложенная ОМ показала возможность её применения на практике, позволяя ППР в интерпретации осмотров, устойчивость к неполным данным и возможность интеграции в информационную систему поддержки технического обслуживания.



Рисунок 4 – Результат распределения клапанов по состояниям

Заключение

Предложена ОМ экспертных знаний в системе ПТО, которая основана на многоуровневой структуре, включающей результаты осмотров, признаки ТС, параметры контекста эксплуатации, интерпретированные состояния и соответствующие рекомендации по обслуживанию. Модель устойчива при наличии частичных или неоднозначных данных и способна формировать рекомендации, учитывающие технические, контекстные и организационные параметры. ОМ построена с использованием инструментов открытого программного обеспечения, что позволяет применить её в условиях промышленной эксплуатации.

Предложенная ОМ представляет собой основу для интеллектуальной ППР в системе ПТО, обеспечивая формализацию и развитие экспертных знаний предприятия.

Список источников

- [1] **Антонов А.В.** Оптимизация периодов технического обслуживания объектов стареющего типа. *Физико-техническая информатика (СРТ2023): Материалы Междунар. конф.*, Пушкино, 16–19 мая 2023 г. Н. Новгород: АНО в области информационных технологий "Научно-исследовательский центр физико-технической информатики", 2023. С.300-306. DOI: 10.54837/9785604289174_СРТ2023-p300.
- [2] **Гладких Т.Д.** Подход к оценке технического состояния нефтепромыслового электросетевого оборудования. *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2016. №3. С.34-38. EDN: WCLYAP.
- [3] **Федоров Д.В., Михайлов Ю.И.** Подходы к оценке технического состояния оборудования. Развивая энергетическую повестку будущего: Сб. докладов Междунар. науч.-пр. конф. для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК, Санкт-Петербург, 10–11 декабря 2021 г. Санкт-Петербург: "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2021. С.392-394. EDN: NGOCWF.
- [4] **Трутаев С.Ю., Кузнецов К.А.** О необходимости совершенствования подходов к оценке технического состояния оборудования опасных производственных объектов, работающего при непроектных нагрузках. *Территория Нефтегаз*. 2019. №7-8. С.56-64.

- [5] **Мясникова О.В.** Методологические основы формирования дорожной карты прикладных решений цифровой трансформации производственно-логистических систем. *Организатор производства*. 2024. Т.32, №1. С.107–120. DOI: 10.36622/1810-4894.2024.54.75.009.
- [6] **Шилов Н.Г.** Разработка мультиаспектной онтологии для поддержки принятия решений в производственных системах. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2024. №2. С.52–64. DOI: 10.14357/20718632240205.
- [7] **Torres Da Silva V., Dos Santos J. S., Thiago R.** OWL ontology evolution: understanding and unifying the complex changes. *The Knowledge Engineering Review*. 2022. Vol.37. P.e10. DOI: 10.1017/s0269888922000066.
- [8] **Борзест 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.
- [9] **Abdelghany A.S., Darwish N.R., Hefni H.A.** An agile methodology for ontology development. *Int. J. of Intelligent Engineering and Systems*. 2019. Vol.12, No.2. P.170–181. DOI 10.22266/ijies2019.0430.17.
- [10] **Poveda-Villalón M., Fernández-Izquierdo A., Fernández-López M., García-Castro R.** LOT: An industrial oriented ontology engineering framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. Vol.111. P.104755. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.104755.
- [11] **Sattar A., Salwana E., Nazir M.** [et al.] Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review. *Int. J. of Advanced Computer Science and Applications*. 2020. Vol.11, No.5. DOI: 10.14569/ijacsa.2020.0110515.
- [12] **Cao Q., Samet A., Zanni-Merk C., De Beuvron F. D. B., Reich C.** An ontology-based approach for failure classification in predictive maintenance using fuzzy C-means and SWRL rules. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol.159. P.630–639. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.218.
- [13] **Polenghi A., Roda I., Macchi M., Pozzetti A.** Multi-attribute Ontology-based Criticality Analysis of manufacturing assets for maintenance strategies planning. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Vol.54, No.1. P.55–60. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.08.192.
- [14] **Matsokis A., Karray H.M., Chebel-Morello B., Kiritsis D.** An ontology-based model for providing semantic maintenance. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010. Vol.43. No.3. P.12–17. DOI: 10.3182/20100701-2-PT-4012.00004.
- [15] **Колоденкова А.Е., Верещагина С.С., Фаворская Е.А., Осипова Е.А.** Подход к оценке технического состояния электрооборудования с использованием взвешенных нечётких правил. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14. №1. С.134–144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [16] **Колоденкова А.Е., Верещагина С.С.** Разработка системы иерархических продукционных правил для диагностирования электротехнического оборудования. *Онтология проектирования*. 2020. №1 (35). DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-63-72.
- [17] **Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф.** Цифровые модели повреждаемых стержневых систем для интеллектуальной поддержки их жизненного цикла. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №3. С.449–458. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-449-458.
- [18] **Ren G., Ding R., Li H.** Building an ontological knowledgebase for bridge maintenance. *Advances in Engineering Software*. Vol.130. P.24–40. DOI 10.1016/j.advengsoft.2019.02.001.
- [19] **Zappa S., Franciosi Ch., Polenghi A., Voisin A.** Ontology-based Digital Twin for maintenance decisions in manufacturing systems: an application at laboratory scale. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol.58, No.8. P.13–18. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.043.
- [20] **Ковалев С.М., Колоденкова А.Е.** Построение базы знаний интеллектуальной системы контроля и предупреждения рискованных ситуаций для этапа проектирования сложных технических систем. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №4(26). С.398–409. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-398-409.
- [21] ГОСТ Р 27.606–2013. Надёжность в технике. Управление надёжностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность. Утв. и введ. в действие приказом Росстандарта от 19.09.2013 № 1077-ст.
- [22] ГОСТ Р ИСО 17359–2015. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство. Утв. и введ. в действие приказом Росстандарта от 20.10.2015 № 1581-ст.
- [23] **Mora M., Wang F., Gómez J. M., Phillips-Wren G.** Development methodologies for ontology-based knowledge management systems: A review. *Expert Systems*. 2022. Vol.39, No.2. DOI: 10.1111/exsy.12851.
- [24] **Abdallah A.A., Fan I.S.** Towards building ontology-based applications for integrating heterogeneous aircraft maintenance records. *Proc. of 2022 IEEE 20th Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN)*. 2022. P.293–299. DOI: 10.1109/INDIN51773.2022.9976080.
- [25] **Насонов М.А., Манищев С.А.** Моделирование распределения загрузки ремонтных бригад при планировании технического обслуживания и ремонтов оборудования на промышленном предприятии. *Моделирование систем и процессов*. 2025. Т.18, №1. С.51–59. DOI 10.12737/2219-0767-2025-51-59.

Сведения об авторах



Насонов Михаил Алексеевич, 1972 г.р. Окончил Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (2003), Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ (2022). Руководитель проектов автоматизации производства в Группе компаний «Синтез ОКА», участвовал в проектах автоматизации управления производством крупных промышленных предприятий. В списке научных трудов более 20 работ. SPIN-код: 5676-2795; ORCID: 0000-0002-0200-8271. ma.nasonov@sintez-oka.ru. ✉.



Манцеров Сергей Александрович, 1980 г.р. Окончил НГТУ в 2002 г., д.т.н. (2024), заведующий кафедрой «Автоматизация машиностроения», директор Образовательно-научного института промышленных технологий машиностроения НГТУ. В списке научных трудов более 140 работ. Author ID: 627667; Scopus ID: 57204970096; ORCID 0000-0001-8458-8259. mca_9@nntu.ru.

Поступила в редакцию 16.06.2025, после рецензирования 16.10.2025. Принята к публикации 8.12.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39

Ontological model of preventive maintenance of industrial enterprise equipment

© 2026, М.А. Насонов¹✉, С.А. Манцеров²

¹ *Sintez OKA group of companies, Dzerzhinsk, Russia*

² *Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract

This paper addresses the problem of formalizing expert knowledge in the field of preventive maintenance of industrial equipment, which arises when interpreting the results of visual inspections taking into account the operating conditions. The focus of the study is the development of an ontological model that provides a logically grounded transition from unstructured descriptions of technical condition indicators to specific equipment maintenance actions. A multi-level ontological model is proposed, including the following levels: inspection, indicators, operating context, technical condition, and action. The results are intended for use in decision support systems for equipment maintenance. The novelty of the study lies in combining contextual parameters (such as equipment age, criticality level, aggressiveness of the operating environment, and others) with a logical inference mechanism, as well as in applying a method for structuring recommendations as a composition of a basic action and context-dependent refinements. The model was built in a Python environment and tested on a specific dataset, where equipment states were automatically determined, adaptive recommendations were generated, and reports were produced. The model showed robustness to incomplete information. The applied ontological approach to technical diagnostics contributed to the achievement of practically significant results for the digitalization of preventive maintenance processes of industrial enterprise equipment.

Keywords: *ontology, preventive maintenance, equipment inspection, technical condition, operational context, logical inference, expert knowledge.*

For citation: *Nasonov MA, Mantserov SA. Ontological model of preventive maintenance of industrial enterprise equipment [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 25-39. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39.*

Authors' contributions: *Nasonov M.A.* - problem formulation, concept development, model formalization, and software implementation. *Mantserov S.A.* – expert review of the materials and validation of results.

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

List of figures and tables

- Figure 1 – Knowledge sources for use in the ontological model
Figure 2 – Conceptual diagram of the preventive maintenance ontology
Figure 3 – Logical inference diagram
Figure 4 – Result of valve distribution by states
Table 1 – Model classes
Table 2 – Project modules
Table 3 – Model class attributes
Table 4 – Inspection results information (fragment)
Table 5 – Equipment operating context information (fragment)
Table 6 – Inspection results and extracted indicators (example)
Table 7 – Interpreted states based on indicators and context (example)
Table 8 – Final recommendations for maintenance (example)

References

- [1] **Antonov AV.** Optimization of maintenance periods for aging-type facilities [In Russian]. In: *Proceedings of the International Conference “Physical and Technical Informatics (CPT2023)”*, Pushchino, May 16–19, 2023. Nizhny Novgorod: Scientific Research Center of Physical and Technical Informatics, 2023. P.300–306. DOI: 10.54837/9785604289174_CPT2023-p300.
- [2] **Gladkikh TD.** An approach to assessing the technical condition of oilfield electrical network equipment [In Russian]. *Elektro: Electrical Engineering, Electric Power Engineering, Electrotechnical Industry*, 2016, no.3, P.34–38.
- [3] **Fedorov DV, Mikhailov YuI.** Approaches to assessing the technical condition of equipment [In Russian]. In: *Developing the Energy Agenda of the Future: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference for Young Engineers of the Fuel and Energy Complex*, St. Petersburg, December 10–11, 2021. St. Petersburg: LETI University, 2021, pp. 392–394.
- [4] **Trutaev SYu, Kuznetsov KA.** On the need to improve approaches to assessing the technical condition of equipment at hazardous production facilities operating under non-design loads [In Russian]. *Territory of Oil and Gas*, 2019; (7–8): 56–64.
- [5] **Myasnikova OV.** Methodological foundations for developing a roadmap of applied solutions for the digital transformation of production and logistics systems [In Russian]. *Organizer of Production*, 2024; 32(1): 107–120. DOI: 10.36622/1810-4894.2024.54.75.009.
- [6] **Shilov NG.** Development of a multi-aspect ontology for decision support in manufacturing systems [In Russian]. *Information Technologies and Computing Systems*, 2024; 2: 52–64. DOI: 10.14357/20718632240205.
- [7] **Torres da Silva V, Dos Santos JS, Thiago R.** OWL ontology evolution: understanding and unifying complex changes. *The Knowledge Engineering Review*, 2022; 37: e10. DOI: 10.1017/S0269888922000066.
- [8] **Borgest NM.** System and ontological analyses: similarities and differences between the concepts [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2024; 14(1): 9–28. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28.
- [9] **Abdelghany AS, Darwish NR, Hefni HA.** An agile methodology for ontology development. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 2019; 12(2): 170–181. DOI: 10.22266/IJIES2019.0430.17.
- [10] **Poveda-Villalón M, Fernández-Izquierdo A, Fernández-López M, García-Castro R.** LOT: an industrial-oriented ontology engineering framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2022; 111: 104755. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.104755.
- [11] **Sattar A, Salwana E, Nazir M. et al.** Comparative analysis of methodologies for domain ontology development: a systematic review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2020; 11(5). DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110515.
- [12] **Cao Q, Samet A, Zanni-Merk C, De Beuvron FDB, Reich C.** An ontology-based approach for failure classification in predictive maintenance using fuzzy C-means and SWRL rules. *Procedia Computer Science*, 2019; 159: 630–639. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.218.
- [13] **Polenghi A, Roda I, Macchi M, Pozzetti A.** Multi-attribute ontology-based criticality analysis of manufacturing assets for maintenance strategies planning. *IFAC-PapersOnLine*, 2021; 54(1): 55–60. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.08.192.
- [14] **Matsokis A, Karray HM, Chebel-Morello B, Kiritsis D.** An ontology-based model for providing semantic maintenance. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010; 43(3): 12–17. DOI: 10.3182/20100701-2-PT-4012.00004.

- [15] **Kolodenkova AE, Vereshchagina SS, Favorskaya EA, Osipova E.A.** An approach to assessing the technical condition of electrical equipment using weighted fuzzy rules [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2024; 14(1): 134–144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [16] **Kolodenkova AE, Vereshchagina SS.** Development of a system of hierarchical production rules for electrical equipment diagnosing [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2020; 10(1): 63–72. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-63-72.
- [17] **Doronin SV, Filippova YuF.** Digital models of damaged rod systems for intelligent support throughout the life cycle [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2025; 15(3): 449–458. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-449-458.
- [18] **Ren G, Ding R, Li H.** Building an ontological knowledge base for bridge maintenance. *Advances in Engineering Software*, 2020; 130: 24–40. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2019.02.001.
- [19] **Zappa S, Franciosi C, Polenghi A, Voisin A.** Ontology-based digital twin for maintenance decisions in manufacturing systems: an application at laboratory scale. *IFAC-PapersOnLine*, 2024; 58(8): 13–18. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.043.
- [20] **Kovalev SM, Kolodenkova AE.** Knowledge base design for the intelligent system for control and prevention of risk situations at the design stage of complex technical systems [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2017; 7(4): 398–409. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-398-409.
- [21] **GOST R 27.606–2013.** Reliability in technology. Reliability-centered maintenance [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2013.
- [22] **GOST R ISO 17359–2015.** Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidelines [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2015.
- [23] **Mora M, Wang F, Gómez JM, Phillips-Wren G.** Development methodologies for ontology-based knowledge management systems: a review. *Expert Systems*, 2022; 39(2). DOI: 10.1111/exsy.12851.
- [24] **Abdallah AA, Fan IS.** Towards building ontology-based applications for integrating heterogeneous aircraft maintenance records. In: *Proceedings of the 2022 IEEE 20th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2022, pp. 293–299. DOI: 10.1109/INDIN51773.2022.9976080.
- [25] **Nasonov MA, Manzerov SA.** Modeling the workload distribution of repair teams in planning maintenance and repairs at an industrial enterprise [In Russian]. *Modeling of Systems and Processes*, 2025; 18(1): 51–59. DOI: 10.12737/2219-0767-2025-51-59.

About the authors

Mikhail Alekseevich Nasonov (b. 1972) graduated from the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (2003) and the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (2022). Project Manager for production automation at the "Sintez OKA" Group, participated in automation projects for production management at large industrial enterprises. Author of more than 20 scientific publications. SPIN-code: 5676-2795, ORCID: 0000-0002-0200-8271. ma.nasonov@sintez-oka.ru. ✉.

Sergey Alexandrovich Mantserov (b. 1980) graduated from Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (NSTU) in 2002. Doctor of Technical Sciences (2024). Head of the Department of Automation in Mechanical Engineering and Director of the Educational and Scientific Institute of Industrial Technologies in Mechanical Engineering at NSTU. Author of more than 140 scientific publications. Author ID: 627667; Scopus ID: 57204970096; ORCID 0000-0001-8458-8259. mca_9@nntu.ru.

Received June 16, 2025. Revised October 16, 2025. Accepted December 8, 2025.



Онтологическая модель динамического конфигурирования социотехнической системы цифровым сообществом

© 2026, А.В. Смирнов, Т.В. Левашова✉, Н.Г. Шилов, А.В. Пономарев

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской Академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассматривается построение многоаспектной онтологии для конфигурирования социотехнической системы в соответствии с требованиями, накладываемыми изменяющейся обстановкой в среде её функционирования. Аспектом называется онтология, разработанная в соответствии с предъявляемыми требованиями в конкретной проблемной области и отражающая определённое представление о содержимом и структуре описываемых знаний. Конфигурирование осуществляется участниками цифрового сообщества, которое состоит из людей и программных агентов, взаимодействующих и обменивающихся сервисами в цифровой среде. Предлагаемая онтология включает аспекты: социотехнической системы; цифрового сообщества; динамического конфигурирования; план конфигурирования; поддержки принятия решений; профиля и контекста. Сформирован глобальный уровень онтологии, который отражает специфику проблемной области «динамическое конфигурирование социотехнических систем», и содержит обобщённые понятия для поддержки семантической интероперабельности аспектов. Новизна заключается в использовании оригинальной методологии построения многоаспектных онтологий для представления комплексных знаний. Применение многоаспектной онтологии демонстрируется на примере задачи динамического конфигурирования транспортного отдела логистической компании. В решение задачи вовлечены люди и программные агенты, обладающие компетенциями для выполнения функций обработки заказов, выбора ресурсов, построения маршрута и принятия решений. Предложенная онтология уменьшает трудоёмкость построения модели знаний рассматриваемой проблемной области и позволяет повысить её качество за счёт использования готовых решений для отдельных аспектов, расширить модель знаний проблемной области дополнительными аспектами и создать основу для сценариев конфигурирования сложных систем.

Ключевые слова: социотехническая система, цифровое сообщество, динамическое конфигурирование, онтологическая модель, многоаспектная онтология, поддержка принятия решений.

Цитирование: Смирнов А.В., Левашова Т.В., Пономарев А.В., Шилов Н.Н. Онтологическая модель динамического конфигурирования социотехнической системы цифровым сообществом. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.40-59. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-40-59.

Финансирование: исследование выполнено в рамках бюджетной темы FFZF-2025-0003.

Вклад авторов: Смирнов А.В. – разработка концепции исследования; Левашова Т.В. – разработка аспектов многоаспектной онтологии; Шилов Н.Г. – разработка формальной модели многоаспектной онтологии; Пономарев А.В. – разработка концепции динамического конфигурирования социотехнической системы цифровым сообществом.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Социотехническая система (СТС) – это самоорганизующийся элемент гибридной техногенной среды, возникающий и развивающийся в результате взаимодействия человека, технической инфраструктуры и технологий [1]. Постоянные изменения в среде приводят к тому, что со временем система перестаёт соответствовать реальности, и требуется её модификация

или реконфигурирование под новые условия. Сложность реконфигурирования СТС заключается в необходимости одновременного учёта и оптимизации технологических и социальных аспектов, которые тесно взаимосвязаны.

Цифровые сообщества (ЦС) возникают вследствие появления социальных сетей и представляют собой сетевые системы, в которых с помощью цифровых технологий поддерживается взаимодействие географически разделённых лиц и организаций, объединившихся в целях совместного решения проблем [2]. ЦС считаются объединением, которое способно инициировать создание цифровых продуктов, а также разработать и внедрить новые технологические решения [3]. В данной статье предлагается использовать потенциал ЦС для решения задачи динамического конфигурирования (ДК) СТС и рассматривать её как задачу принятия решений участниками ЦС. Под ДК понимается процесс создания или модификации существующей конфигурации СТС, связанный с определением структуры, свойств и поведения системы в соответствии с изменяющейся обстановкой.

Для моделирования знаний проблемной области ДК СТС ЦС предложено использовать аппарат многоаспектных онтологий (МАО) [4]. Такие онтологии представляют собой многоуровневую модель, которая является удобным средством представления распределённых многоуровневых систем [5,6]. Эти онтологии позволяют объединить знания из разных областей, что является необходимым условием для моделирования сложных систем [7].

Целью статьи является построение МАО, которая представляет знания проблемной области ДК СТС участниками ЦС. В этой области проблемой считается задача ДК, а предметной областью исследования являются СТС.

1 Понятие многоаспектной онтологии

МАО – это многоуровневая модель, которая объединяет несколько онтологий с целью представления комплексных знаний [8–10]. В МАО онтологии рассматриваются как аспекты – совокупности понятий и отношений проблемной области, отражающих определённое представление о содержимом и структуре описываемых знаний. Полнота онтологии определяется достаточностью аспектов для решения задач проблемной области участниками ЦС. Если в проблемной области предполагается решать задачу формирования ЦС, то в МАО должны быть добавлены соответствующие аспекты (например, аспект самоорганизации).

МАО состоит из трёх уровней (рисунок 1):

- 1) *глобальный уровень* – унифицированное представление концептов и отношений, которые являются общими для двух и более аспектов аспектного уровня;
- 2) *аспектный уровень* – унифицированное представление концептов и отношений, которые принадлежат двум или более локальным аспектам;
- 3) *локальный уровень* представляет концепты и отношения, принадлежащие конкретному аспекту, выраженному средствами собственного формализма.

Первые два уровня описываются с использованием единой нотации, выбранной разработчиками онтологии, – формализма МАО (например, формализма, используемого в онтологии для поддержки принятия решений в производственных системах [11]), а третий – средствами внутреннего формализма аспекта. Между понятиями глобального и аспектного уровней устанавливаются связующие отношения, которые формализуют соподчинённость и эквивалентность понятий.

Объединение аспектов осуществляется на основе связующих отношений, что позволяет интегрировать разнородные онтологии, описанные с использованием различных нотаций и формализмов, не прибегая к установке согласующих отношений непосредственно между понятиями из объединяемых онтологий.

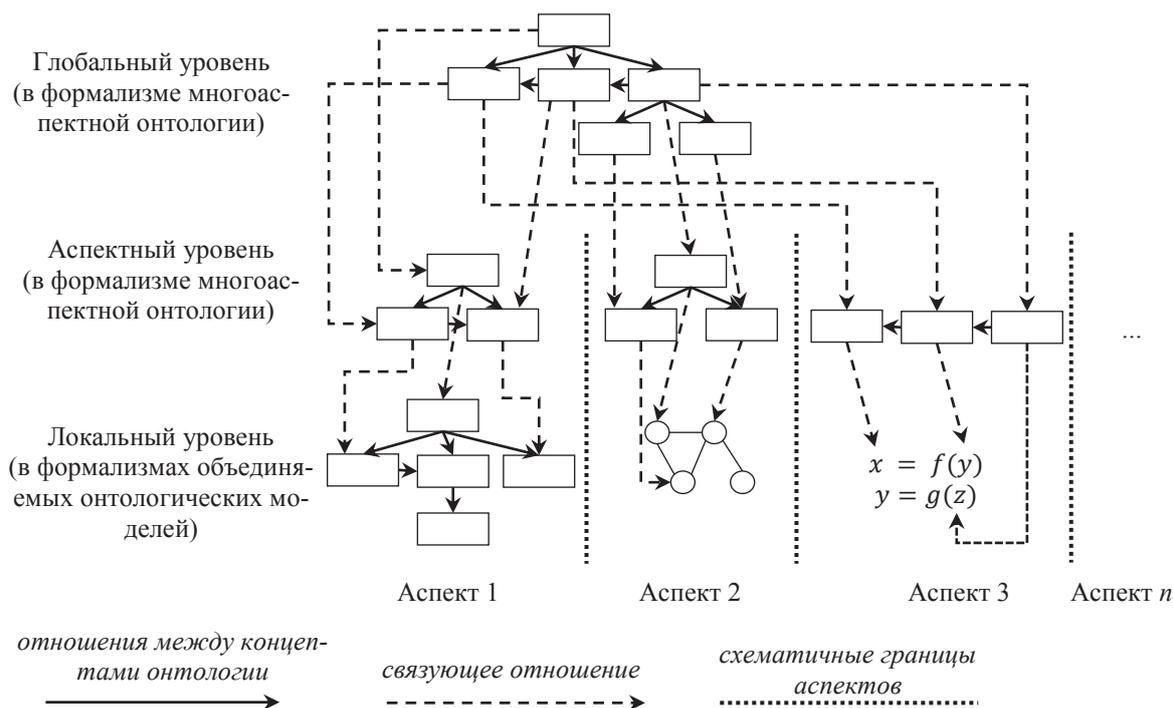


Рисунок 1 – Основные элементы многоаспектных онтологий

2 Концептуальная модель динамического конфигурирования социотехнической системы

Концептуальная модель ДК СТС, как целенаправленного коллективного поведения в ЦС (рисунок 2), лежит в основе онтологической модели (ОМ) ДК СТС ЦС. Концептуальная модель описывается следующей семантикой.

СТС – сложная система, состоящая из организационной и подчинённых ей социальной и технической составляющих, которые способны в процессе функционирования изменять своё поведение и организационную структуру для достижения заданной цели в условиях изменчивости среды. Частью среды является регулятор – орган управления, обеспечивающий возможность существования СТС и накладывающий на неё обязательства. Совокупность ресурсов СТС и их состояний описывается конфигурацией СТС. Компонентами конфигурации СТС являются организационная структура, ресурсы, действующие субъекты. Для того чтобы система соответствовала изменяющимся условиям, выполняется реконфигурирование СТС.

Реконфигурирование осуществляется участниками ЦС, которое состоит из людей и программных агентов – действующих субъектов, – использующих цифровые технологии для обмена информацией и предоставления сервисов. Технологии предлагают участникам ЦС каналы и среды для взаимодействия, которые обеспечивают возможность выполнения участниками требуемых действий. Устранение несоответствия между текущей конфигурацией СТС и желаемой ситуацией посредством реконфигурирования является целью участников ЦС и определяет их целенаправленное коллективное поведение. Реконфигурирование проводится в соответствии с планом выполнения действий, который строят участники. План включает создание организационной структуры для выполнения задачи реконфигурирования.

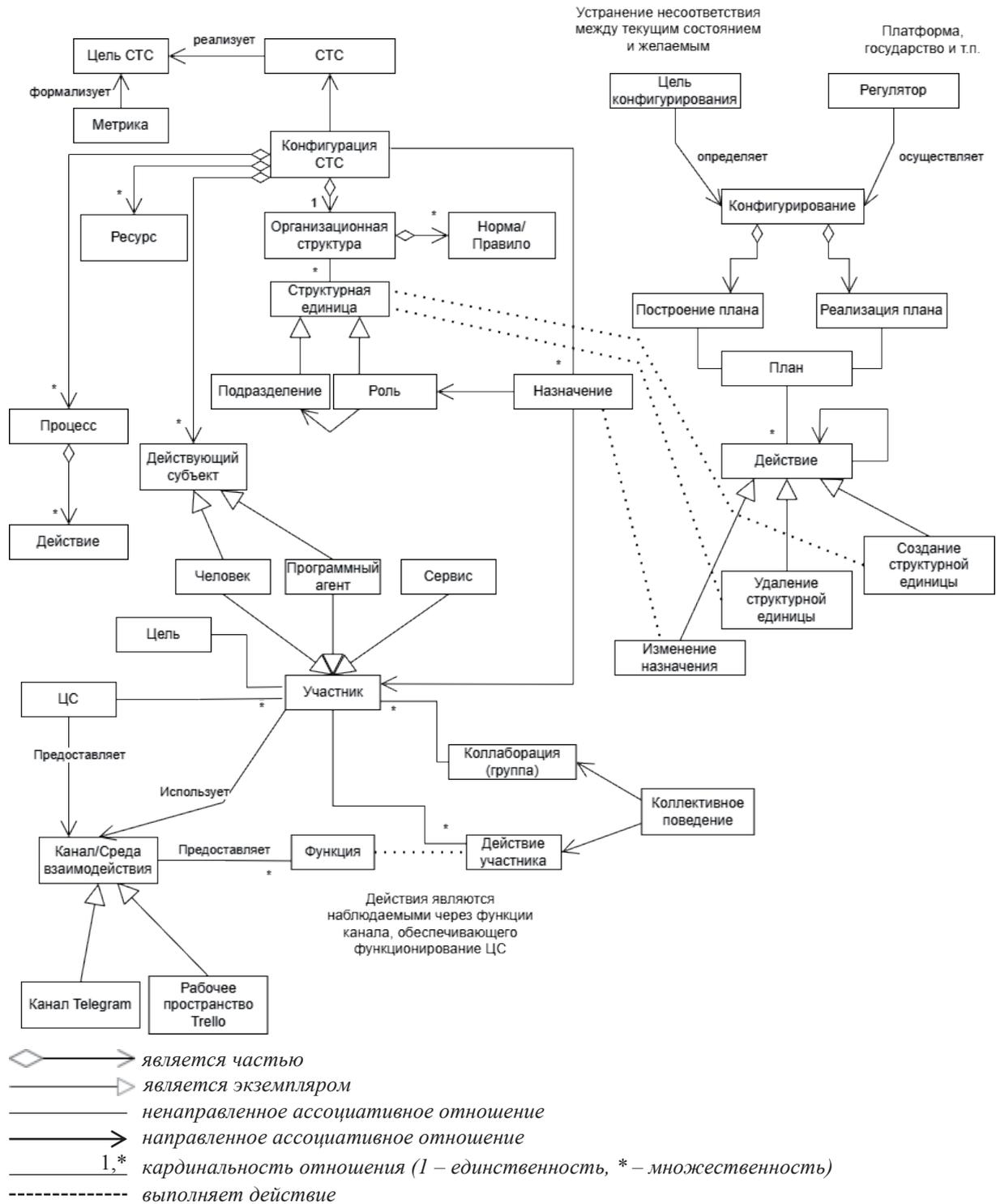


Рисунок 2 – Концептуальная модель динамического конфигурирования социотехнической системы на основе целенаправленного коллективного поведения в цифровых сообществах

3 Создание многоаспектной онтологии

МАО ДК СТС ЦС построена в соответствии с методологией [4] и ОМ [12].

3.1 Локальный уровень

Локальный уровень представлен аспектами, которые определены на основании концептуальной модели (рисунок 2). Аспекты, определённые в результате анализа концептуальной модели: СТС, ЦС, конфигурирование, план. Аспекты, описывающие знания области действия онтологии: ДК, сложная система, контекст. Аспекты, описывающие знания области применения онтологии: ДК, СТС, ЦС, профиль (участника ЦС), поддержка принятия решений (ППР). Аспекты сложная система и СТС объединены в один аспект, так же, как и ДК и конфигурирование. Аспект СТС показан на рисунке 3.

Цель – конкретный результат, на достижение которого направлены действия субъектов СТС, или выполняемая системой функция.

Метрика – критерий качества конфигурации СТС.

Техническая (система, ТС) – аппаратное и программное обеспечение, инфраструктура, используемые для достижения цели, а также связанные с ними процессы и процедуры.

Социальная (система) – люди с их компетенциями и предпочтениями, которые взаимодействуют с субъектами ТС для достижения цели в рамках организационной структуры.

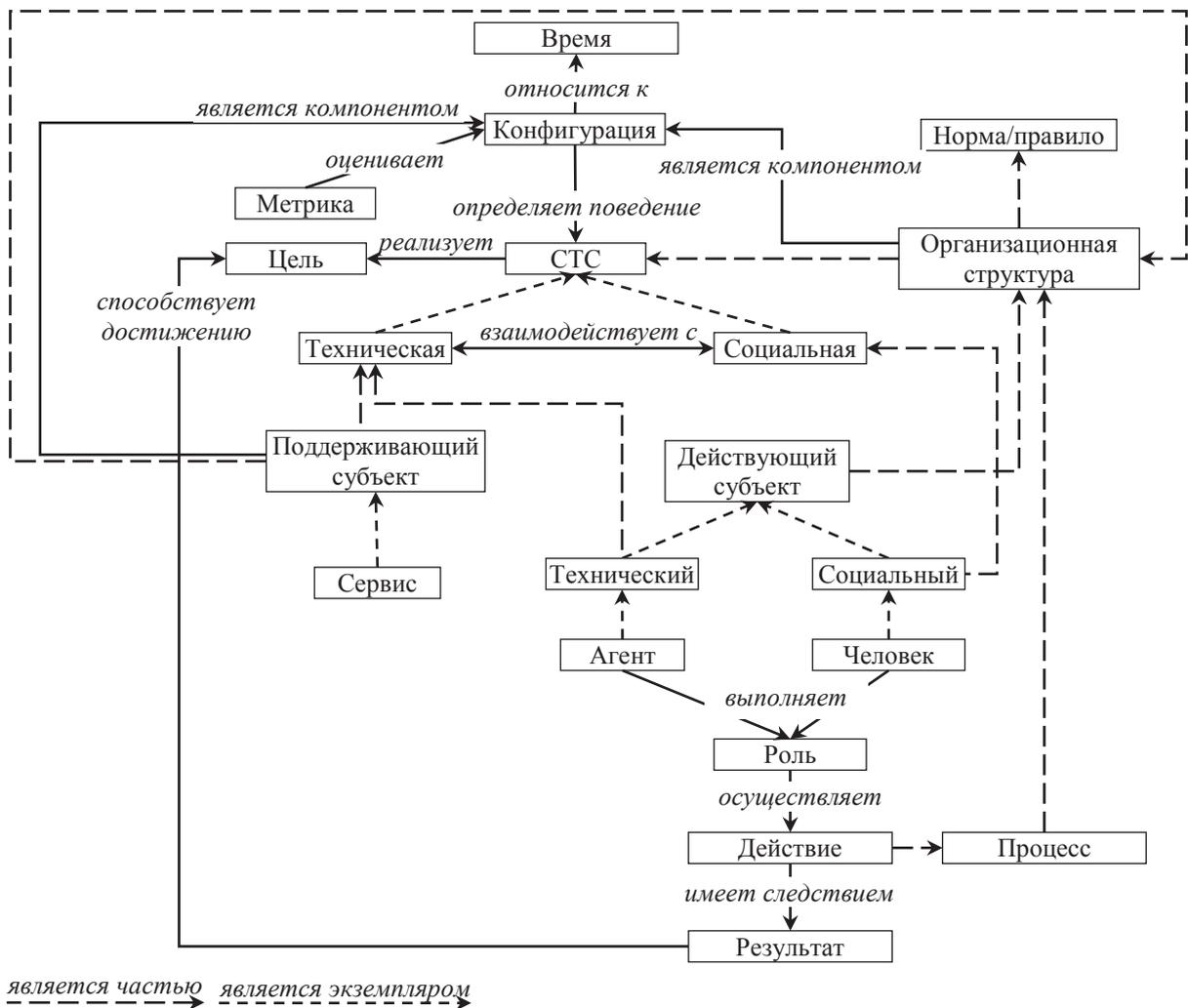


Рисунок 3 – Социотехническая система

Организационная структура – схема, определяющая взаимосвязи и отношения между подразделениями и людьми в СТС, порядок принятия решений и принципы распределения ответственности.

Норма/правило – часть организационной структуры, включающая формальные (законы, стандарты, директивы) и неформальные (нормы, ценности, привычки) правила, налагаемые институциональным режимом и определяющие поведение субъектов СТС.

Конфигурация – состояние компонентов конфигурации СТС и связи между ними в определённое время.

Время – сущность, описывающая временные интервалы и моменты времени.

Действующий субъект – вид субъекта (понятие субъекта не показано на рисунке), компонент технической или социальной системы, осуществляющий действия, направленные на реализацию цели, и инициирующий взаимодействие с любым компонентом системы или процессом, обеспечивающими функционирование СТС.

Поддерживающий субъект – вид субъекта, компонент ТС, который предоставляет помощь, ресурсы или возможности для осуществления действий, направленных на достижение цели.

Агент – вид действующего субъекта, представленный программными сущностями ТС, которые вовлечены в СТС для осуществления действий, направленных на достижение цели.

Сервис – услуга, которая выполняет определённую функцию или набор функций для действующих субъектов.

Человек – вид действующего субъекта, представленный сущностями социальной системы – людьми, которые вовлечены в систему для осуществления действий, направленных на достижение цели.

Роль – положение, устанавливающее ограниченное множество видов действий, которые субъект, занимающий данное положение, способен осуществлять.

Действие – активность, которую осуществляет субъект, и которая направлена на достижение цели и приводит к определённому результату.

Результат – следствие, итог, которые получаются после осуществления определённого действия.

Процесс – последовательная смена состояний СТС при осуществлении действий.

Аспект ЦС приведён на рисунке 4.

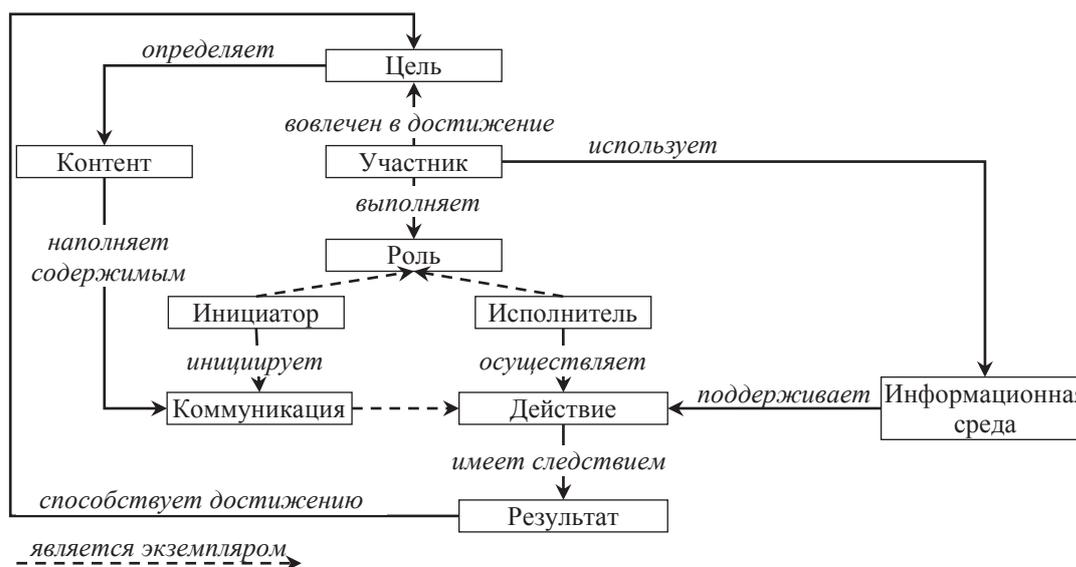


Рисунок 4 – Цифровое сообщество

Участник – социальный субъект (человек) или технический субъект (программный агент), вовлечённый в ЦС и выполняющий действия, способствующие достижению цели.

Цель – получение решения стоящей перед ЦС задачи посредством обмена знаниями между участниками, их сотрудничества, взаимной поддержки и развития.

Роль – положение, устанавливающее ограниченное множество видов действий, которые участник, занимающий данное положение, способен осуществлять.

Инициатор – вид роли, действия в рамках которой ограничены отправкой информации, инициирующей взаимодействие.

Исполнитель – вид роли, действия в рамках которой связаны с реакцией на информацию, полученную от инициатора, и включают отправку ответной информации или выполнение других инициированных действий.

Коммуникация – последовательность коммуникативных актов, в результате которых происходит обмен информацией между участниками коммуникации при поддержке информационной среды.

Действие – активность, которую осуществляет исполнитель, и которая направлена на достижение цели и приводит к определённому результату.

Результат – конечное следствие, итог, которые получаются после осуществления исполнителем определённого действия.

Контент – информация, наполняющая коммуникативные акты содержанием.

Информационная среда – совокупность средств и технологий, объединяющих процессы сбора, хранения, обработки, поиска, передачи и представления информации в электронном виде.

В аспекте ДК (рисунок 5) под таким конфигурированием понимается процесс создания или изменения конфигурации объекта, связанный с определением структуры, свойств и поведения объекта.

Объект – сущность, создание или изменение конфигурации которой является целью конфигурирования.

Конфигурация – состояние компонентов (частей) объекта и связей между ними.

Ресурс – любой компонент объекта, необходимый для функционирования этого объекта, наличием и свойствами которого можно управлять при конфигурировании.

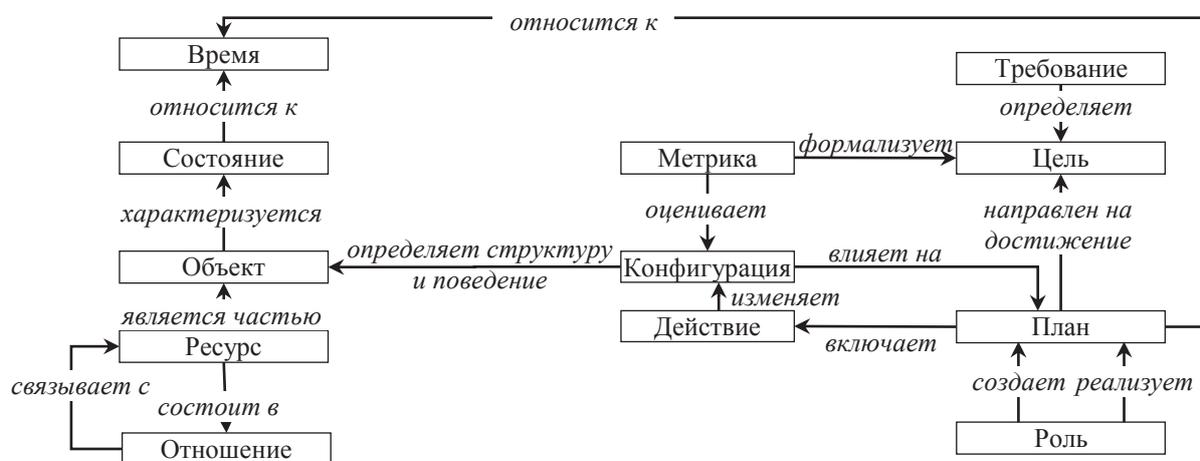


Рисунок 5 – Динамическое конфигурирование

Состояние – совокупность свойств объекта с определёнными значениями в определённый интервал (момент) времени.

Отношение – взаимосвязь между ресурсами.

Требование – условие, задающее желаемое состояние объекта.

Цель – устранение несоответствия между текущим состоянием и желаемым состоянием объекта посредством (ре)конфигурирования.

Метрика – числовой показатель, характеризующий конфигурацию объекта.

План – последовательность действий по изменению конфигурации объекта, предусматривающая порядок и сроки их осуществления.

Роль – статус, описывающий множество видов действий по созданию и выполнению плана конфигурирования объекта, которые способна осуществлять сущность, имеющая данный статус.

Время – сущность, описывающая временные интервалы и моменты времени.

Аспект *план* (рисунок 6) представляет план как последовательность целенаправленных действий, которая включает порядок и сроки осуществления действий субъектами в соответствии с выполняемыми ими ролями, а также предусловия и постусловия действий, позволяющие отслеживать, что процесс достижения цели соответствует плану.

Цель – желаемый результат, являющийся следствием осуществления последовательности действий.

Субъект – сущность, способная к осуществлению действий.

Роль – положение, устанавливающее ограниченное множество видов действий, которые субъект, занимающий данное положение, способен осуществлять.

Действие – активность, которую осуществляет субъект в соответствии с планом и выполняемой им ролью.

Предусловие – условие, которое должно быть выполнено перед началом осуществления действия.

Постусловие – условие, свидетельствующее о завершении действия и представляющее результат, полученный после его осуществления.

Начало – вид предусловия, (запланированный) момент времени начала конкретного действия.
Окончание – вид постусловия, (запланированный) момент времени завершения конкретного действия.
Предыдущее – действие в последовательности действий, предшествующее следующему действию.
Следующее – действие в последовательности действий, следующее за предыдущим действием.
Последнее – действие, завершающее последовательность действий; результат последнего действия является целью, которая должна быть достигнута в ходе осуществления последовательности действий.
Критерий успешности – показатель, позволяющий оценить результат действия.
 Концепт *Empty* (пустой список) и отношения *hasNext* (имеет следующего) и *follows* (следует за) соответствуют концепту отношений, используемых в паттерне моделирования последовательностей на OWL [13].

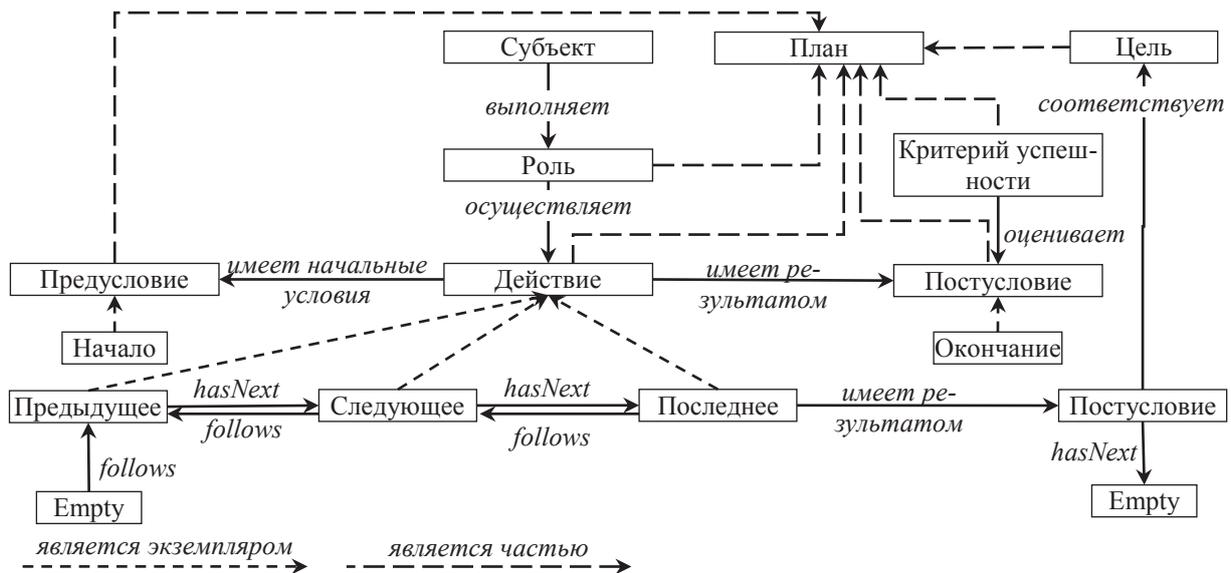


Рисунок 6 – План

Аспект *поддержки принятия решений* (рисунок 7) представляет модель принятия решений. Данный аспект используется, поскольку задача конфигурирования решается как задача принятия решений.

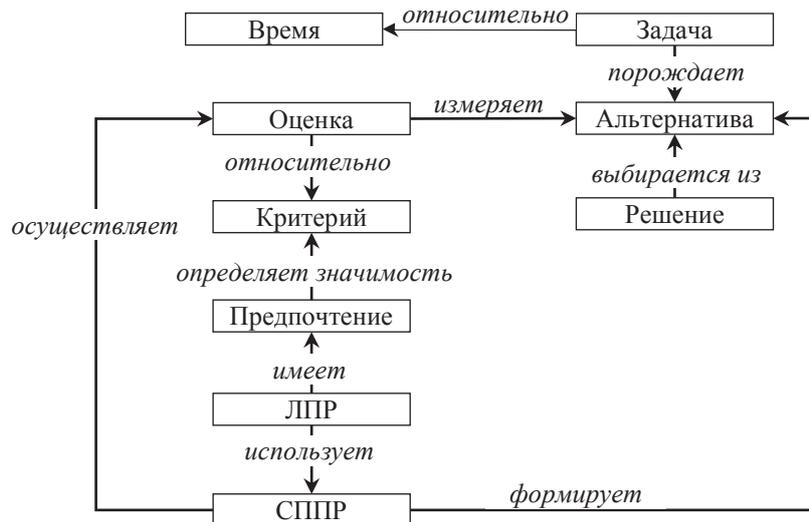


Рисунок 7 – Поддержка принятия решений

Задача – конкретная цель или проблема, требующая решения или выполнения действий. Задача возникает в определённый момент времени и существует до момента получения решения.
Лицо, принимающее решение (ЛПР), – субъект, выполняющий действия по принятию решений.

Критерий – функция, выражающая предпочтения ЛПР. Понятие критерия объединяет различные показатели, используемые в методологиях принятия решений для оценки гипотез, альтернатив, результатов и решений.

Предпочтения – критерии, которые ЛПР считает более значимыми, и значения этих критериев.

Альтернативы – множество вариантов решений задачи или планов действий, направленных на её решение.

Решение – выбранная альтернатива (план) для решения задачи.

Оценка – суждение, насколько оцениваемый объект соответствует предпочтениям и ожиданиям ЛПР.

Система поддержки принятия решений (СППР) – вычислительная сущность, осуществляющая действия по поддержке принятия решений.

В аспекте *профиля* он определён как структурированное описание конкретного субъекта. На ОМ профиля (рисунок 8) структурные единицы приведены выборочно. Многоточие означает, что в профиле может быть представлена любая дополнительная информация, которая является релевантной для конкретной проблемной области.

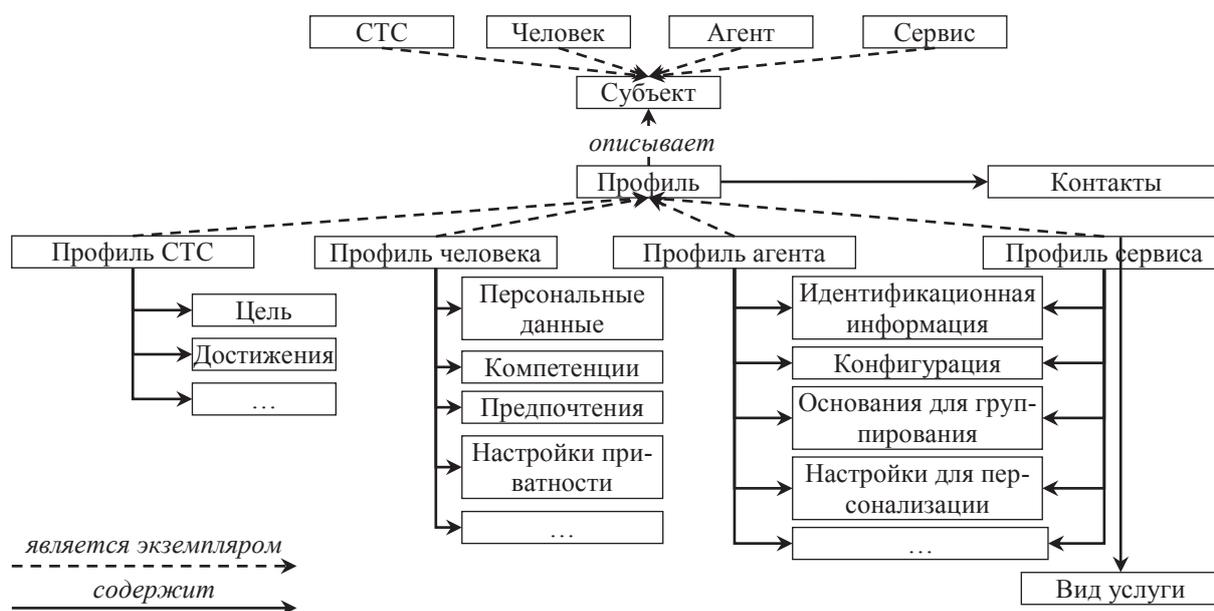


Рисунок 8 – Профиль

Профиль СТС – структурированное описание деятельности, истории, целей, ценностей системы, контактной информации о ней, а также любой другой дополнительной информации.

Субъект – сущность, характеристики и поведение которой описываются в профиле.

Контакты – информация для связи с субъектом (адрес, канал связи и т.п.).

Человек – социальный субъект.

Агент – автономный вычислительный субъект, способный реагировать на среду, в которой он функционирует, вызывать в ней изменения и взаимодействовать с другими субъектами.

Сервис – вычислительный субъект, предоставляющий услуги по требованию других субъектов.

Цель – конкретный результат, на достижение которого направлена деятельность СТС.

Достижения – важнейшие результаты.

Профиль человека – информация, связанная с конкретным человеком в системе, которая позволяет его идентифицировать и обеспечить персонализацию взаимодействия.

Персональные данные – имя, дата рождения, место жительства, друзья и т.д.

Компетенции – задачи и функции, которые человек способен выполнять, опираясь на свои знания, навыки, умения и личностные качества.

Предпочтение – фактор, определяющий при выборе преимущество одного варианта над другим.

Настройки приватности – ограничения на доступ к информации о человеке и на её использование.

Профиль агента – набор параметров, которые определяют характеристики и поведение или функциональность агента.

Профиль сервиса – набор параметров, определяющих поведение сервиса, используемые им ресурсы и возможности его обнаружения.

Идентификационная информация – набор параметров, по значениям которых можно однозначно идентифицировать агента/сервис в цифровой среде.

Конфигурация – набор параметров, определяющих возможности агента/сервиса, например, права доступа к агенту/сервису, их коммуникационные и функциональные возможности, параметры безопасности и др.

Основания для группирования – набор параметров, на основании которых агентов/сервисы можно объединять в группы, например, выполняемые агентами/сервисами роли, зоны ответственности агентов/область действия сервисов и др.

Настройки для персонализации – набор параметров для настройки агента/сервиса под конкретные потребности.

Вид услуги – конкретная задача или функция, выполняемая сервисом.

Аспект контекста (рисунок) введён в связи с тем, что любой субъект и объект проблемной области существуют в контексте, и любая задача тоже решается в контексте.

Контекстом считается совокупность информации и знаний о состоянии окружающей среды и находящихся в ней субъектов/объектов/сущностей проблемной области.

Онтология контекста – структурированное представление контекстной информации и знаний проблемной области, используемое для моделирования и понимания окружающей среды, в которой функционирует система. Эта онтология является основой для сбора и анализа различных контекстно-зависимых факторов, таких как активность пользователя, местоположение, время, характеристики устройства и др.

Сущность – класс онтологии, релевантный для понимания ситуации или задачи в определённый момент времени.

Время – ОМ времени, например, онтология времени на языке моделирования онтологий *OWL* [14].

Местонахождение – ОМ местоположений, например, онтология местоположений [15].

Свойство – признак, отличающий множество индивидов класса сущность.

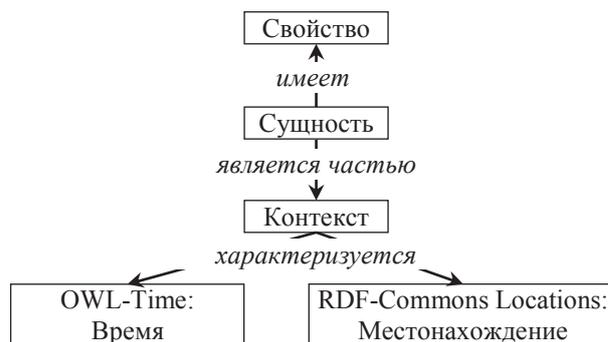


Рисунок 9 – Контекст

3.2 Аспектный уровень

На этапе формирования аспектного уровня эксперты определяют фрагменты онтологий, в которых представлены концепты локального уровня и отношения между ними. В качестве таковых выбираются те концепты ОМ локального уровня (исходные концепты), для которых существует хотя бы одно семантическое отображение в концепты других ОМ этого уровня (целевые концепты). В таблице 1 для аспектов добавлены следующие обозначения: К – контекст, П – профиль.

3.3 Глобальный уровень

На этапе создания глобального уровня МАО производится идентификация концептов, принадлежащих нескольким фрагментам аспектного уровня. Из этих концептов выбираются те, которые представляются на глобальном уровне, и создаётся структура концептов глобального уровня.

К концептам, являющимся общими для нескольких аспектов, относятся: Агент, Время, Действие, Конфигурация, Метрика, План, Результат, Ресурс, Роль, Сервис, СТС, Субъект, Цель, Человек. Глобальный уровень МАО показан на рисунке 10.

Связующие отношения между концептами глобального и аспектного уровней формализуются средствами языка описания онтологий на основе различных точек зрения *Multi-Viewpoint OWL / MVP-OWL* [10]. В статье для иллюстрации представлена часть множества отношений.

Таблица 1 – Отображения между концептами аспектов локального уровня

Исходный концепт	Целевой концепт	Исходный концепт	Целевой концепт
Субъект	СТС: поддерживающий субъект СТС: действующий субъект ЦС: участник; ДК: ресурс План: субъект; К: сущность П: субъект	Цель	ЦС: цель ДК: цель План: цель ППР: задача
СТС	СТС: СТС ДК: объект П: СТС	Конфигурация	СТС: конфигурация ДК: конфигурация План: цель, План: постусловие ППР: альтернатива; ППР: решение
Агент	СТС: агент; ДК: ресурс К: сущность; П: агент	Роль	СТС: роль; ЦС: роль; ДК: роль План: роль; ППР: ЛПР
Сервис	СТС: сервис; ДК: ресурс К: сущность П: сервис	Действие	СТС: действие; ЦС: действие ДК: действие; План: действие ППР: оценка
Человек	СТС: человек ДК: ресурс К: сущность П: человек	Метрика	СТС: метрика ДК: метрика План: критерий успешности ППР: критерий
Результат	ЦС: результат План: цель; План: постусловие	Свойство	ДК: отношение К: свойство; К: время
План	ДК: план План: план	Время	СТС: время; ДК: время ППР: время; К: время

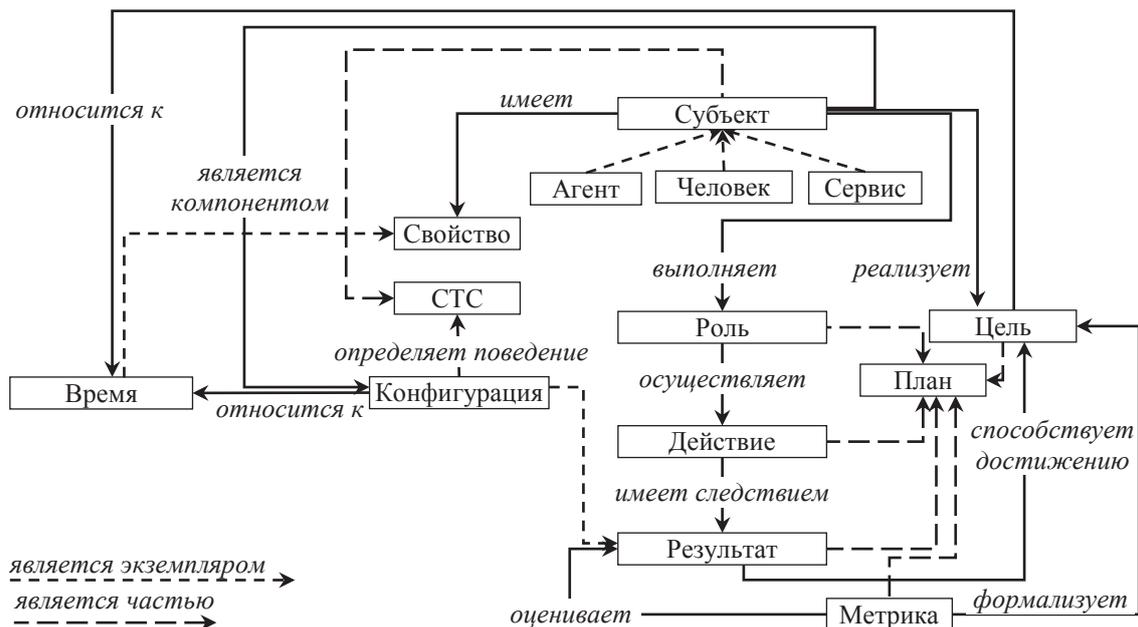


Рисунок 3 – Глобальный уровень многоаспектной онтологии

Отношения для концепта СТС глобального уровня (ГУ):

ГУ: СТС $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ СТС: СТС – отношение эквивалентности (множество экземпляров концепта СТС ГУ совпадает с множеством экземпляров концепта СТС аспектного уровня аспекта СТС);

ГУ: СТС $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ П: СТС – отношение эквивалентности (множество экземпляров концепта СТС ГУ совпадает с множеством экземпляров концепта СТС аспектного уровня аспекта профиль);

ГУ: СТС $\overset{\equiv}{\rightarrow}$ ДК: объект – отношение вхождения (экземпляры концепта СТС ГУ являются экземплярами концепта объект аспектного уровня аспекта ДК).

Отношения для концепта субъект ГУ, где

ГУ: субъект $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ (СТС: поддерживающий_субъект \cap СТС: действующий_субъект):

ГУ: субъект $\overset{\equiv}{\rightarrow}$ К: сущность – отношение вхождения между концептом субъект ГУ и концептом сущность аспекта контекст аспектного уровня;

ГУ: субъект $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ ЦС: участник – отношение эквивалентности между концептом субъект ГУ и концептом участник аспекта ЦС аспектного уровня;

ГУ: субъект $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ План: субъект – отношение эквивалентности между концептом субъект ГУ и концептом субъект аспекта план аспектного уровня;

ГУ: субъект $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ П: субъект – отношение эквивалентности между концептом субъект ГУ и концептом субъект аспекта профиль аспектного уровня.

Формализация того, что задача конфигурирования решается как задача ППР участниками ЦС, описывается следующим множеством связующих отношений:

ГУ: цель $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ ППР: задача; ГУ: конфигурация $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ ППР: решение; ГУ: роль $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ ЦС: роль;

ГУ: субъект $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ ЦС: участник; ГУ: действие $\overset{\equiv}{\leftrightarrow}$ ЦС: действие.

3.4 Многоаспектная онтология

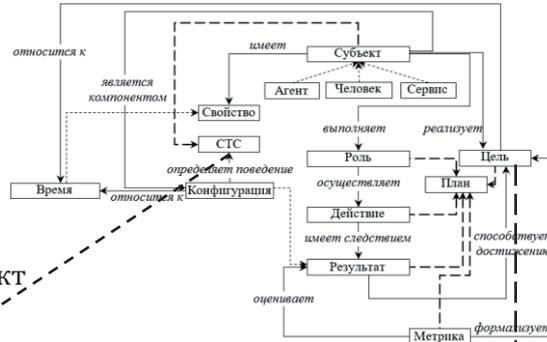
Фрагмент, иллюстрирующий МАО ДК СТС ЦС, представлен на рисунке 11. В качестве иллюстративных примеров выбраны аспекты ДК и ППР. Приведены два отношения между: концептом объект аспекта ДК и концептом СТС ГУ; концептом задача аспекта ППР и концептом цель ГУ. Предложенная онтология поддерживает следующий сценарий ДК СТС ЦС.

ЦС получает запрос на реконфигурирование СТС, определяющий набор свойств, которым должна удовлетворять новая конфигурация. Участники ЦС сотрудничают в общей информационной среде, обеспечивающей возможность взаимодействия. Характеристики участников, такие как компетентность (человека), предпочтения (человека), функциональность (агента), решаемые задачи (сервисом) и т.п. представлены в их профилях.

Участники создают план решения задачи реконфигурирования, в котором определены порядок и сроки осуществления ими действий по решению данной задачи в соответствии с выполняемыми ролями, а также указаны критерии, на основании которых оценивается, насколько результаты фактических действий соответствуют запланированным. План предусматривает действия по оценке текущего состояния компонентов конфигурации, выполнению предусловий для возможности осуществления следующего действия, ППР и проверки успешности выполнения плана. Текущее состояние субъектов, которые являются частью СТС, в том числе компонентов конфигурации, и действий участников, отображается в контексте. Контекст представляет актуальные значения свойств субъектов и других контекстно-зависимых сущностей онтологии (например, роль, действие и т.п.).

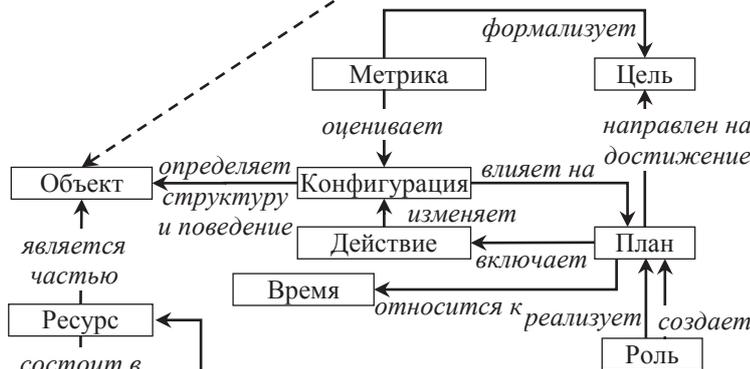
В соответствии с планом участники разрабатывают альтернативные варианты конфигурации, которые оцениваются относительно выбранных ими критериев и предпочтений участника, выполняющего роль ЛПР, и выбирают наиболее предпочтительную конфигурацию, которая считается решением задачи.

Глобальный уровень
(рисунок)



ГУ: СТС \sqsubseteq ДК: объект

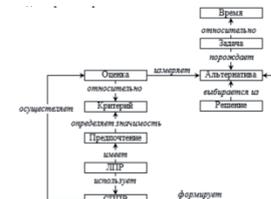
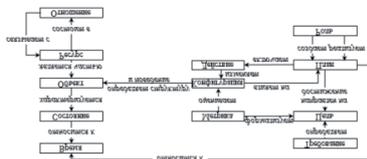
Аспектный уровень



ГУ: цель \leftrightarrow ППР: задача



Локальный уровень



Динамическое конфигурирование
(рисунок Рисунок)

связующее отношение с аспектом динамического конфигурирование

связующее отношение с аспектом поддержки принятия решений

ППР (рисунок Ри-)
схематичные границы аспектов и уровней

Рисунок 11 – Многоаспектная онтология динамического конфигурирования социотехнической системы цифровым сообществом (фрагмент)

В случае невыполнения предусловий возможности осуществления некоторого действия или изменения несоответствия фактических результатов действий запланированным, участники ЦС корректируют план.

4 Конфигурирование транспортного отдела логистической компании

Рассмотрен упрощенный пример использования MAO ДК СТС для задачи конфигурирования транспортного отдела логистической компании с целью выполнения входящего заказа с учётом текущей ситуации. Роль СТС выполняет транспортный отдел. Аспект ЦС в примере явным образом не представлен. Принято, что, участники ЦС являются ресурсами СТС, которые формируют план решения задачи конфигурирования посредством общения в цифровом

пространстве, и могут быть вовлечены в решение этой задачи. В приведенной конкретизации понятий, фигурирующих в рассматриваемом примере, семантически эквивалентные понятия конкретизируются однажды под перечнем аспектов, в которых они встречаются.

Аспект: СТС (рисунок 3):

СТС – транспортный отдел; Конфигурация – совокупность назначений ресурсов на выполнение подзадач логистической задачи.

Аспекты: СТС (рисунок 3), План (рисунок 6):

Цель – выполнение заказов (решение логистической задачи).

Аспекты: СТС (рисунок 3), ДК (рисунок 5):

Ресурсы – грузовые автомобили (свойства: доступность, допустимый объём груза, допустимые габариты груза, допустимая масса груза, класс вместимости, стоимость использования), персонал (свойства: компетенция, доступность); Метрики (оценки конфигурации) – стоимость и время использования ресурсов.

Аспект: ППР (рисунок 7):

Задача – конфигурирование транспортного отдела; Критерий – минимизация стоимости и времени использования ресурсов; Альтернатива – допустимая конфигурация СТС; Решение – итоговая конфигурация СТС.

Аспекты: СТС (рисунок 3), ДК (рисунок 5), План (рисунок 6):

Роль – роли, выполняемые персоналом СТС; Действие – деятельность, которую выполняет персонал при решении логистической задачи.

Аспект: План (рисунок 6):

Критерий успешности – наличие решения.

Аспект: Профиль (рисунок 8):

Ресурсы СТС и их свойства.

Аспект: Контекст (рисунок 9):

Конкретные значения свойств сущностей, которые вовлечены в задачу ДК СТС, в определённое время.

Для каждой конкретной СТС аспект ДК может объединять несколько специфичных для этой СТС аспектов. В данном примере такими аспектами являются: бизнес-процесс обработки заказа, выбор ресурсов, построение маршрута. Эти аспекты выступают в роли «чёрных ящиков», решая соответствующие задачи предусмотренными в них методами. Онтологическому моделированию таких аспектов посвящён ряд ранее опубликованных в журнале работ (например, [16, 17]). Взаимодействие с этими аспектами (передача в них исходных данных и получение результатов) осуществляется с помощью связующих отношений.

В соответствии с описанным сценарием ЦС получает запрос на реконфигурирование транспортного отдела для выполнения заказа, содержащего следующие свойства:

- дата и время поступления (I_{tL}), $I_{tL} = 07.03.2025, 16: 25$;
- число мест груза (L), $L = 2$;
- объём места l (I_{VL_l}): объём места 1 – $I_{VL_0} = 6,5 \text{ м}^3$, объём места 2 – $I_{VL_1} = 3,9 \text{ м}^3$;
- габариты места l (I_{SL_l}): габариты места 1 – $I_{SL_0} = \{2,5; 2; 1,3\} \text{ м}$; $I_{SL_1} = \{1,5; 2; 1,3\} \text{ м}$;
- масса места l (I_{ML_l}): масса места 1 – $I_{ML_0} = 700 \text{ кг}$, масса места 2 – $I_{ML_1} = 400 \text{ кг}$;
- адрес (геопозиция) и допустимое время погрузки $I_{T_1L} = \{14.03.2025 \quad 10: 00 \quad 18: 00\}$;
- адрес (геопозиция) и допустимое время разгрузки $I_{T_2L} = \{14.03.2025 \quad 10: 00 \quad 18: 00\}$,
 $\{15.03.2025 \quad 10: 00 \quad 15: 00\}$;
- допустимое время транспортировки ($I_{t_{\Delta}L}$), $I_{t_{\Delta}L} = 24 \text{ ч}$;
- диапазон допустимой стоимости ($I_{C_{min}L}, I_{C_{max}L}$), $I_{C_{min}L} = 0 \text{ руб.}$, $I_{C_{max}L} = 3200 \text{ руб.}$

Участниками ЦС для составления плана предлагаются:

- возможные виды действий, которые определены в аспектах СТС, ДК и ППР;
- виды ролей, специфицированные в аспекте СТС;
- список конкретных субъектов СТС – людей, агентов и сервисов – и их компетенций.

При составлении плана субъекты назначаются на роль в соответствии с их компетенциями. Составленный участниками ЦС план решения задачи конфигурирования (таблица 2) определяет следующую последовательность действий: 1) построение бизнес-процесса обра-

ботки заказа; 2) выбор ресурсов; 3) построение маршрута; 4) оценка и выбор конфигурации. Для каждого действия указываются сроки начала и окончания (в таблице не представлены). Действия 1 – 3 специфицированы в классе действие аспекта СТС. Действие 4 представлено в аспекте ППР как оценка и выбор решения в связи с наличием связующего отношения ГУ: конфигурация $\stackrel{\equiv}{\leftrightarrow}$ ППР: решение. В графе «Аспект» (не входит в план) представлены специфичные аспекты, предлагающие методы решения задач, предусмотренных действиями.

Таблица 2 – План решения задачи конфигурирования транспортного отдела

Порядок действия	Действие	Предусловие	Постусловие	Роль	Ресурс	Критерий успешности	Аспект
1	Построение бизнес-процесса	Поступил заказ	Назначен менеджер по обработке заказа	Обработчик входящего заказа	Агент	Получено допустимое решение	Бизнес-процесс обработки заказа
2	Выбор ресурсов	Назначен менеджер по обработке заказа	Перечень используемых ресурсов (со значениями свойств)	Организатор	Агент – решатель ограничений	Получено эффективное решение	Выбор ресурсов
3	Построение маршрута	Наличие значений для класса автомобиля, точек погрузки и разгрузки, временных ограничений	Время подачи автомобиля, время погрузки, маршрут, время разгрузки	Логист-планировщик	Агент – сервис прокладки маршрутов	Получено эффективное решение	Построение маршрута
4	Оценка и выбор конфигурации СТС	Имеется конфигурация СТС	Имеется эффективная конфигурация СТС	Логист-ППР	Человек	Получена эффективная конфигурация	ППР

Бизнес-процесс обработки входящего заказа (действие 1), как правило, является стандартизованным (приём заказа, верификация, подготовка документов и т.п.), но может иметь ветвления в зависимости от конкретных параметров заказа и заказчика, а также текущей ситуации, что описывается контекстом. Действие по созданию бизнес-процесса заключается в решении задачи, описываемой с помощью продукционных правил (если ..., то ...). Эту задачу решает специально разработанный агент, выполняющий роль обработчика входящего заказа. В рассматриваемом примере заказ является стандартным, норматив времени на его обработку составляет 2 часа. Этот заказ передается ресурсу СТС, выполняющему роль менеджера по обработке заказа. Действие 2, связанное с выбором ресурсов, вовлечённых в задачу транспортировки заказа, состоит в решении задачи выбора, как задачи удовлетворения ограничений. Эту задачу решает организатор с учётом критерия минимизации стоимости используемых ресурсов. Роль организатора выполняет агент-решатель ограничений. Используемые виды ресурсов: грузовые автомобили, водители (принадлежат классу персонал). Выбор осуществлялся среди автомобилей трёх классов вместимости (малого, среднего, большого) и водителей с тремя видами компетенций (допуск к управлению автомобилями классов вместимости: малого; малого и среднего; малого, среднего и большого). Свойства заказа передаются в задачу выбора ресурсов посредством связующих отношений r . Например, следующее отношение описывает, что отношение r_v между допустимым объёмом груза ресурса R_w и

объёмом места I_{VL} , указанном в заказе, соответствует ограничению на допустимый объём груза ресурса R_w , который не должен превышать сумму объёмов мест в заказе:

$$(r_v(I_{VR_w}, I_{VL}) = True) \stackrel{\equiv}{\leftrightarrow} \left(I_{VR_w} \geq \sum_{l=0}^L I_{VR_l} \right).$$

Эффективность решения по выбору ресурсов определяется стоимостью их использования, которая учитывается решателем ограничений при генерации решения.

Организатором выбраны следующие ресурсы:

- автомобиль среднего класса вместимости, доступный 14.03.2025 с 14:00 до 16:00 и с 20:00 до 22:00; 15.03.2025 с 8:00 до 22:00, при меньшей стоимости удовлетворяющий всем ограничениям;
- водитель, имеющий допуск к управлению автомобилями малого и среднего классов вместимости, с почасовой оплатой 300 руб./ч., свободный для выполнения работы 14.03.2025 с 18:00 до 22:00 и 15.03.2025 с 8:00 до 22:00.

Построение маршрута транспортировки заказа (действие 3) выполняет логист-планировщик в лице агента-сервиса прокладки маршрутов. Этот сервис имеет возможность прогнозирования дорожной ситуации, результаты которого используются для окончательного расчёта (учитывается время подачи автомобиля, время погрузки и разгрузки). Входными данными для сервиса являются временные ограничения, класс автомобиля, точки погрузки и разгрузки, передаваемые с помощью соответствующих связующих отношений эквивалентности. Критерием эффективности маршрута является время использования ресурсов.

При заданных исходных данных задача построения маршрута не имеет решения, поскольку автомобиль, выбранный организатором, не может выполнить заказ при заданных временных ограничениях. Об этом информируется логист-ЛПП, который должен выполнить оценку предложенного решения (действие 4). Логист-ЛПП принимает решение о реконфигурировании СТС.

В новой конфигурации используются грузовой автомобиль большого класса вместимости (ГАБ) и водитель, имеющий допуск к управлению автомобилями большого класса вместимости (КМСБ) и свободный в рассматриваемом интервале времени. Итоговая конфигурация транспортного отдела (S) для выполнения заказа имеет вид:

$S_1 = \{ \text{менеджер по обработке заказа; } \{08.03.2025 \quad 2:00\} \}$ менеджер по обработке заказа обрабатывает заказ 08.03.2025 в течение 2-х часов;

$S_2 = \left\{ \begin{array}{l} \text{транспортное средство ГАБ; } \{15.03.2025 \quad 9:30 \quad 16:00\} \\ \text{водитель КМСБ; } \{15.03.2025 \quad 9:30 \quad 16:00\} \end{array} \right\}$ для выполнения заказа 15.03.2025 с 9:30 до 16:00 используется транспортное средство ГАБ и привлекается водитель КМСБ;

$S_3 = \{ \text{маршрут транспортировки} \}$ конкретный маршрут транспортировки с временными отметками.

Заключение

В статье описан процесс создания MAO для ДК СТС участниками ЦС. Определены аспекты, знания которых должны быть включены в онтологию, и разработаны их OM: СТС, ЦС, ДК, план (конфигурирования), ППР, профиль, контекст. Из OM аспектов выбраны их части, релевантные для представления знаний рассматриваемой проблемной области, и сформирован ГУ MAO. Этот уровень отражает специфику проблемной области ДК СТС и содержит обобщённые понятия для поддержки семантической интероперабельности аспектов. Применение MAO продемонстрировано на примере задачи ДК транспортного отдела логистической компании. Показана возможность вовлечения в выполнение этой задачи раз-

личных аспектов, решающих отдельные подзадачи в рамках общей задачи ДК. MAO обеспечивают интеграцию разнородных аспектов в общую онтологию и отличаются возможностью сохранения их внутренних формализмов, обеспечения их независимости от самой MAO и других аспектов, а также использования уже существующих в рамках аспектов методов решения задач конфигурирования отдельных элементов СТС. MAO совместно с концепцией ЦС открывает возможности для вовлечения разрозненных ресурсов (людей и программных сущностей), обладающих соответствующими компетенциями, в решение различных задач. Такой подход привлекателен при решении задач, где требуется использование междисциплинарных знаний.

Список источников

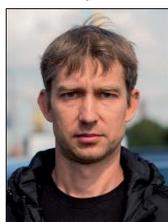
- [1] **Сергеев С.** Социотехнические системы с искусственным интеллектом: вопросы теории и методологии. *Организационная психология и психология труда*, 2022. Вып.7, №1. С.4–23. DOI: 10.38098/ipran.opwp_2022_22_1_001.
- [2] **Xu J.** Digital Community Management Mobile Information System Based on Edge Computing // *Mob. Inf. Syst.*, 2021. Vol.2021(8). P.1–11. DOI:10.1155/2021/5842291.
- [3] **Тимова А.С., Сухарева М.А., Федосеев А.И.** Анализ стратегий сообществ в контексте развития цифровой экономики и ее социальных последствий. *Государственное управление. Электронный вестник*, 2022. Вып.93 (август) С.162–174. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-93.
- [4] **Smirnov A., Levashova T., Ponomarev A., Shilov N.** Methodology for Multi-Aspect Ontology Development: Ontology for Decision Support Based on Human-Machine Collective Intelligence // *IEEE Access*, 2021. Vol.9. P.135167–135185. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3116870.
- [5] **Голенков В.В.** [и др.] Проектирование предприятий рецептурного производства на основе онтологий. *Онтология проектирования*, 2022. Т.7, №2. С.123–144. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-123-144.
- [6] **Баринов И.И.** [и др.] Формирование стратегии развития Комитета по искусственному интеллекту в Научно-образовательном центре «Инженерия будущего». *Онтология проектирования*, 2021. Т.11, №3. С.260–293. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-260-293.
- [7] **Смирнов С.В.** Онтологический подход к формированию гетерогенных сред моделирования. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки*, 2011. Т.4, №32. С.50–61.
- [8] **Cruz I.F., Xiao H.** Ontology Driven Data Integration in Heterogeneous Networks. *Complex Systems in Knowledge-based Environments: Theory, Models and Applications. Studies in Computational Intelligence*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. Vol.168. P.75–98. DOI: 10.1007/978-3-540-88075-2_4.
- [9] **Hagedorn T.J., Smith B., Krishnamurthy S., Grosse I.** Interoperability of disparate engineering domain ontologies using basic formal ontology. *J. Eng. Des.* 2019. P.1–30. DOI: 10.1080/09544828.2019.1630805.
- [10] **Heman M., Boufaïda Z.** MVP-OWL: a multi-viewpoints ontology language for the Semantic Web. *Int. J. Reason. Intell. Syst.* 2011. Vol.3, no.3/4. P.147–155. DOI: 10.1504/IJRIS.2011.043539.
- [11] **Шилов Н.Г.** Разработка мультиаспектной онтологии для поддержки принятия решений в производственных системах. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2024. №2. С.52–64. DOI: 10.14357/20718632240205.
- [12] **Смирнов А.В., Левашова Т.В.** Онтология паттернов человеко-машинного сотрудничества для поддержки принятия решений. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №3. С.421–439. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-421-439.
- [13] **Drummond N.** [et al.] Putting OWL in Order: Patterns for Sequences in OWL. *Proc. of the OWLED'06 Workshop on OWL: Experiences and Directions 2006* / ed. B.C. Grau et al. – CEUR Workshop Proceedings, 2006. http://ceur-ws.org/Vol-216/submission_12.pdf.
- [14] **Hobbs J.R., Pan F.** Time Ontology in OWL. *W3C Candidate Recommendation Draft* 15 November 2022. – W3C, 2022. – <https://www.w3.org/TR/owl-time/>.
- [15] Commons Locations Ontology. EDM Council, 2025. – <https://spec.edmcouncil.org/fibo/ontology/FND/Places/Locations/>.
- [16] **Скобелев П.О.** Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге. *Онтология проектирования*. 2013. №2. С.26–48.
- [17] **Жилыев А.А.** Онтологии как инструмент создания открытых мультиагентных систем управления ресурсами. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №2. С. 261–281. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-261-281.

Сведения об авторах



Смирнов Александр Викторович, 1956 г. рождения. Окончил Ленинградский Политехнический институт им. М.И. Калинина в 1979 г., д.т.н. (1996) профессор. Главный научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации СПб ФИЦ РАН. Член IEEE с 2002 г. В списке научных трудов более 400 работ в области многоагентных систем, интеллектуальных систем поддержки принятия решений, человеко-машинных сред. Author ID (РИНЦ): 7968; Author ID (Scopus): 55725403900; Researcher ID (WoS): A-7557-2012. ORCID 0000-0001-8364-073X. smir@iias.spb.su.

Левашова Татьяна Викторовна, 1962 г. рождения. Окончила Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина) в 1986 г., к.т.н. (2009). Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации СПб ФИЦ РАН. В списке научных трудов более 200 работ в области управления знаниями, интеллектуальной поддержки принятия решений, контекстно-управляемых систем. Author ID (РИНЦ): 124630; Author ID (Scopus): 6603894696; Researcher ID (WoS): E-3643-2012. ORCID 0000-0002-1962-7044. tatiana.levashova@iias.spb.su. ✉.



Шилов Николай Германович, 1976 г. рождения. Окончил Санкт-Петербургский государственный технический университет в 1998 г., к.т.н. (2005), доцент. Ведущий научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации СПб ФИЦ РАН. В списке научных трудов более 250 работ в области искусственного интеллекта, инженерии знаний, интеллектуальных систем поддержки принятия решений, человеко-машинных сред. Author ID (РИНЦ): 123486; Author ID (Scopus): 55932123000; Researcher ID (WoS): A-7559-2012. ORCID 0000-0002-9264-9127. nick@iias.spb.su.



Пonomарев Андрей Васильевич, 1981 г. рождения. Окончил Тюменский государственный нефтегазовый университет в 2003 г., к.т.н. (2012). Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации СПб ФИЦ РАН. Член ACM с 2011 г. В списке научных трудов более 100 работ в области интеллектуальной поддержки принятия решений, коллективного интеллекта, прикладного машинного обучения. Author ID (РИНЦ): 185825; Author ID (Scopus): 55858984800; Researcher ID (WoS): M-7034-2013. ORCID 0000-0002-9380-5064. ponomarev@iias.spb.su.

Поступила в редакцию 02.12.2025, после рецензирования 11.02.2026. Принята к публикации 19.02.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-40-59

An ontological model for the dynamic configuration of a sociotechnical system by a digital community

© 2026, A.V. Smirnov, T.V. Levashova✉, N.G. Shilov, A.V. Ponomarev

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russia

Abstract

The article addresses the development of a multi-aspect ontology for configuring a sociotechnical system according in accordance with the requirements imposed by changes in its operating environment. An aspect is defined as an ontology developed to meet the requirements of a specific problem domain and reflecting a particular representation of the content and structure of the knowledge being described. Configuration is carried out by members of a digital community composed of humans and software agents that interact and exchange services within a digital environment. The proposed ontology comprises the following aspects: the sociotechnical system; the digital community; dynamic configuration; configuration plan; decision support; profile; and context. A global ontology level has been constructed to capture the specific characteristics of the problem domain “dynamic configuration of sociotechnical systems” and to provide generalized concepts that ensure semantic interoperability among the aspects. The novelty of the proposed approach lies in the use of an original methodology for the development of multi-aspect ontologies to represent complex knowledge. The application of the multi-aspect ontology is demonstrated through the case of dynamically configuring the transpor-

tation department of a logistics company. The problem solution involves both humans and software agents possessing the competencies required to perform order processing, resource selection, route planning, and decision-making functions. The proposed ontology reduces the effort required to construct a knowledge model for the given problem domain and improves its quality through the reuse of established solutions for individual aspects. It also enables the extension of the domain knowledge model with additional aspects and provides a foundation for developing configuration scenarios for complex systems.

Keywords: *sociotechnical system, digital community, dynamic configuration, ontology model, multi-aspect ontology, decision support.*

For citation: *Smirnov AV, Levashova TV, Shilov NG, Ponomarev AV.* An ontological model for the dynamic configuration of a sociotechnical system by a digital community [In Russian]. *Ontology of designing.* 2026; 16(1): 40-59. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-40-59.

Financial Support: The research was carried out within the framework of the state-funded research project FFZF-2025-0003.

Authors' contributions: *Smirnov A.V.* – research concept development; *Levashova T.V.* – development of the facets of the multi-aspect ontology; *Shilov N.G.* – development of the formal model of the multi-aspect ontology; *Ponomarev A.V.* – development of the concept of dynamic configuration of a sociotechnical system by a digital community.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Core elements of multi-aspect ontologies

Figure 2 – Conceptual model of dynamic configuration of a sociotechnical system based on goal-oriented collective behaviour in digital communities

Figure 3 – Sociotechnical system

Figure 4 – Digital community

Figure 5 – Dynamic configuration

Figure 6 – Configuration plan

Figure 7 – Decision support

Figure 8 – Profile

Figure 9 – Context

Figure 10 – Global level of multi-aspect ontology

Figure 11 – Multi-aspect ontology for dynamic configuration of a sociotechnical system by a digital community (fragment)

Table 1 – Mappings between concepts of local-level aspects

Table 2 – Configuration task solution plan for the transport department

References

- [1] **Sergeev S.** Sociotechnical systems with artificial intelligence: questions of theory and methodology [In Russian]. *Scientific e-Journal "Institute of Psychology Russian Academy of Sciences. Organization Psychology and Labor Psychology.* 2022; 7(1):4–23. DOI: 10.38098/ipran.opwp_2022_22_1_001.
- [2] **Xu J.** Digital Community Management Mobile Information System Based on Edge Computing. *Mob. Inf. Syst.* 2021; 2021(8): 1–11. DOI: 10.1155/2021/5842291.
- [3] **Titova AS, Sukhareva MA, Fedoseev AI.** Analysis of Community Approaches in Digital Economy Field and its Social Implications [In Russian]. *Public Administration. E-Journal* 2022; 93(August): 162–174. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-93.
- [4] **Smirnov A, Levashova T, Ponomarev A, Shilov N.** Methodology for Multi-Aspect Ontology Development: Ontology for Decision Support Based on Human-Machine Collective Intelligence. *IEEE Access* 2021; 9:135167–135185. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3116870.
- [5] **Golenkov V. et al.** Designing Batch-Manufacturing Enterprises Using Ontologies [In Russian]. *Ontology of Designing* 2017; 7(2):123–144. DOI:10.18287/2223-9537-2017-7-2-123-144.

- [6] **Barinov II. et al.** Development strategy formation of the Committee on Artificial Intelligence in the Scientific and Educational Center "Engineering of the Future" [In Russian]. *Ontology of Designing* 2021; 11(3): 260–293. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-260-293.
- [7] **Smirnov SV.** Ontology-based approach to the building of heterogeneous modeling environments [In Russian]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series* 2011; 4(32): 50–61.
- [8] **Cruz IF, Xiao H.** Ontology Driven Data Integration in Heterogeneous Networks. *Complex Systems in Knowledge-based Environments: Theory, Models and Applications. Studies in Computational Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009; 168: 75–98. DOI: 10.1007/978-3-540-88075-2_4.
- [9] **Hagedorn TJ, Smith B, Krishnamurty S, Grosse I.** Interoperability of disparate engineering domain ontologies using basic formal ontology. *J. Eng. Des.* 2019: 1–30. DOI: 10.1080/09544828.2019.1630805.
- [10] **Hemam M, Boufaïda Z.** MVP-OWL: a Multi-Viewpoints Ontology Language for the Semantic Web. *Int. J. Reason. Intell. Syst.* 2011; 3(3/4): 147–155. DOI: 10.1504/IJRIS.2011.043539.
- [11] **Shilov NG.** Development of a Multi-Aspect Ontology for Decision Support in Production Systems. *Information Technologies and Computing Systems* 2024; 2: 52–64. DOI: 10.14357/20718632240205.
- [12] **Smirnov A, Levashova T.** Ontology of human-machine collaboration patterns for decision support [In Russian]. *Ontology of Designing* 2024; 14(3): 421–439. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-3-421-439.
- [13] **Drummond N. et al.** Putting OWL in Order: Patterns for Sequences in OWL. In: Grau B.C. et al. (ed.). *Proc. of the OWLED'06 Workshop on OWL: Experiences and Directions* 2006. CEUR Workshop Proceedings, 2006. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-216/submission_12.pdf.
- [14] **Hobbs JR, Pan F.** Time Ontology in OWL. W3C Candidate Recommendation Draft 15 November 2022. – W3C, 2022. <https://www.w3.org/TR/owl-time/>.
- [15] Commons Locations Ontology – EDM Council, 2025. <https://spec.edmcouncil.org/fibo/ontology/FND/Places/Locations/>.
- [16] **Skobelev P.** Situation-driven decision making and multi-agent technology: finding solutions in dialogue [In Russian]. *Ontology of Designing* 2013; 2: 261–281.
- [17] **Zhilyaev A.** Ontology as a tool for creating open multi-agent resource management systems [In Russian]. *Ontology of Designing* 2019; 9(2): 261–281. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-261-281.

About the authors

Alexander Smirnov (b. 1956) graduated from the Leningrad Polytechnic Institute named after M.I. Kalinin (Leningrad, USSR) in 1979, Doctor of Technical Sciences (1996), Professor. He is a Chief Researcher at the Laboratory of Integrated Automation Systems, SPC RAS. He has been a member of IEEE since 2002. He is the author and a co-author of more than 400 scientific works in the areas of multi-agent systems, intelligent decision support systems, and human-machine environments. Author ID (RSCI): 7968; Author ID (Scopus): 55725403900; Researcher ID (WoS): A-7557-2012. ORCID 0000-0001-8364-073X, smir@iias.spb.su.

Tatiana Levashova (b. 1962) graduated from the Leningrad Electrotechnical Institute named after V.I. Ulyanov (Lenin) (Leningrad, USSR) in 1986, Candidate of Technical Sciences (2009). She is a Senior Researcher at the Laboratory of Integrated Automation Systems, SPC RAS. She is the author and a co-author of more than 200 scientific works in the areas of knowledge management, intelligent decision support, and context-aware systems. Author ID (RSCI): 124630; Author ID (Scopus): 6603894696; Researcher ID (WoS): E-3643-2012. ORCID 0000-0002-1962-7044, tatiana.levashova@iias.spb.su. ✉

Nikolay Shilov (b. 1976) graduated from St. Petersburg State Technical University in 1998, Candidate of Technical Sciences (2005), Associate Professor. He is a Leading Researcher at the Laboratory of Integrated Automation Systems, SPC RAS. He is an author and co-author of more than 250 scientific works in the areas of artificial intelligence, knowledge engineering, intelligent decision support systems, and human-machine environments. Author ID (RSCI): 123486; Author ID (Scopus): 55932123000; Researcher ID (WoS): A-7559-2012. ORCID 0000-0002-9264-9127, nick@iias.spb.su.

Ponomarev Andrew (b. 1981) graduated from Tyumen State Oil and Gas University, Candidate of Technical Sciences (2012). He is a Senior Researcher at the Laboratory of Integrated Automation Systems, SPC RAS. He has been a member of ACM since 2011. He is the author and a co-author of more than 100 scientific works in the areas of intelligent decision support, collective intelligence, and applied machine learning. Author ID (RSCI): 185825; Author ID (Scopus): 55858984800; Researcher ID (WoS): M-7034-2013. ORCID 0000-0002-9380-5064, ponomarev@iias.spb.su.

Received December 2, 2025. Revised February 11, 2026. Accepted February 19, 2026.



Онтологическая модель сегментации изображений пожаров с помощью адаптивной нейро-нечёткой сети

© 2026, М.В. Бобырь✉, Б.А. Бондаренко

Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ), Курск, Россия

Аннотация

Сегментация изображений пожаров является важной задачей для систем раннего обнаружения и мониторинга чрезвычайных ситуаций. Традиционные методы, такие как пороговая обработка и сложные вычислительные модели, имеют ограничения по скорости и точности в условиях реального времени. Цель исследования – обеспечение процесса сегментации изображений в режиме, близком к реальному времени. В статье представлена онтологическая модель сегментации изображений пожаров, основанная на адаптивной нейро-нечёткой системе с оптимизированным дефаззификатором метода отношения площадей. В модели структурируются процессы обработки данных, включая преобразование изображений в цветовое пространство оттенка, насыщенности и яркости, использование треугольных функций принадлежности и адаптивную настройку параметров для выделения очагов возгорания. В онтологии систематизированы классы, процессы и их взаимосвязи, обеспечивая модульность и гибкость решения. Эксперименты на изображениях ночных пожаров с дымом показали, что предложенная модель достигает высокой точности и скорости, превосходя сравниваемые методы сегментации, и содержит потенциал для применения в системах мониторинга в реальном времени.

Ключевые слова: онтология, нейро-нечёткий алгоритм, сегментация изображений, дефаззификация, искусственный интеллект.

Цитирование: Бобырь М.В., Бондаренко Б.А. Онтологическая модель сегментации изображений пожаров с помощью адаптивной нейро-нечёткой сети. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.60-73. DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-1-60-73.

Финансирование: работа выполнена при поддержке государственного задания №075-03-2025-526.

Вклад авторов: Бобырь М.В. – концепция нейро-нечёткой сети сегментации изображений; Бондаренко Б.А. – разработка онтологической модели сегментации изображений пожаров и проведение экспериментов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Обнаружение и локализация пожаров – важнейшие задачи в области безопасности и мониторинга окружающей среды, особенно в условиях роста числа лесных пожаров и техногенных катастроф. Пожар, как сущность, обладает нечёткими, динамичными и контекстно-зависимыми свойствами и может быть смоделирована в рамках нечёткой онтологии, где границы объектов и принадлежность к классу градуальны, а не бинарны. Применяемые методы сегментации не эффективны в связи с высокой вариативностью и неопределённостью визуальных признаков пожара, а глубокие нейросети не обеспечивают интерпретируемости. Использование тепловых датчиков и визуального наблюдения [1] часто ограничено по скорости реакции и точности, особенно в сложных условиях, включая ночное время, сильный дым или горную местность [2]. Онтологии, как инструмент структурирования знаний, позволяют формализовать процессы и данные для анализа динамичных ситуаций. Разработка онтологий является трудной задачей для точной формализации сложной предметной области, при необ-

ходимости адаптации к реальным условиям и нехватке стандартизированных инструментов для объединения онтологий с вычислительными системами. Это затрудняет их практическое применение в задачах мониторинга пожаров и делает актуальным продолжение исследований. Развитие методов обработки изображений позволяет автоматизировать процесс обнаружения очагов возгорания через сегментацию изображений, обеспечивая оперативное выделение зон огня даже при ограниченной видимости [3, 4].

Исследования в области локализации пожаров активно развиваются. Например, в [5] предложено применение адаптивных нейро-нечётких систем вывода (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS*) для моделирования процессов, связанных с пожарами, что может быть использовано для анализа распространения огня с высокой точностью. В [6] представлены мультимодальные наборы данных, включая изображения пожаров, для разработки моделей сегментации. В [7] описан метод анализа пожароопасных ситуаций с использованием сложных вычислительных моделей и отмечена их высокая вычислительная сложность. В [8] показана необходимость разработки методов с минимальной зависимостью от больших объёмов данных.

Современные вычислительные модели, такие как *U-Net* [9] и *Mask R-CNN* [10], показали высокую эффективность в задачах сегментации изображений пожаров [11, 12], но их применение ограничено необходимостью значительных вычислительных ресурсов и больших объёмов размеченных данных [13]. В [14] отмечается, что такие модели требуют десятков тысяч изображений для обучения, что затрудняет их использование в условиях реального времени. В [15] предлагаются гибридные подходы на основе генетических алгоритмов для оптимизации пороговой сегментации, которые сложны в настройке.

Пороговая сегментация в цветовом пространстве – тон, насыщенность, яркость (*Hue, Saturation, Brightness, HSV*) – простой и быстрый метод [16], однако его точность снижается при наличии дыма или переменного освещения. В [17] предложен подход с динамической адаптацией порогов *HSV* для обнаружения огня в условиях лесных пожаров, но он уступает по точности более сложным методам. Нейро-нечёткие системы (например, *ANFIS*) эффективно сочетают адаптивность и точность при меньшей зависимости от данных [18, 19].

В данной статье представлена онтологическая модель (ОМ) сегментации изображений пожаров, адаптированная для условий ночного освещения с дымом на фоне гор. Модель структурирует процессы обработки данных и включает преобразование изображений в цветовое пространство *HSV*, использование треугольных функций принадлежности и адаптивную настройку параметров для выделения очагов возгорания. В онтологии систематизированы классы, процессы и их взаимосвязи, обеспечивая модульность и гибкость решения. Исследования [20–24] подтверждают актуальность таких подходов для мониторинга пожаров и автоматизации анализа данных в чрезвычайных ситуациях.

1 Онтологическая модель сегментации

ОМ сегментации изображений (см. рисунок 1) представляет собой структурированное описание концепций, объектов, процессов и их взаимосвязей задаётся в виде кортежа:

$$O = \left\langle \begin{array}{cccc} 7 & 6 & 9 & 5 \\ O_c & O_i & O_p & O_a \end{array} \right\rangle, \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{cccc} k = 1 & a = 1 & d = 1 & x = 1 \end{array} \right\}$$

где O_c – ОМ классов объектов ($c = 1 \dots 7$, где c – количество классов объектов); O_i – ОМ изображения ($i = 1 \dots 6$, где i – количество подклассов изображения); O_p – ОМ процесса ($p = 1 \dots 9$, где p – количество подклассов процесса); O_a – ОМ атрибутов ($a = 1 \dots 5$, где a – количество атрибутов). Данные модели описаны в таблицах 1-4.

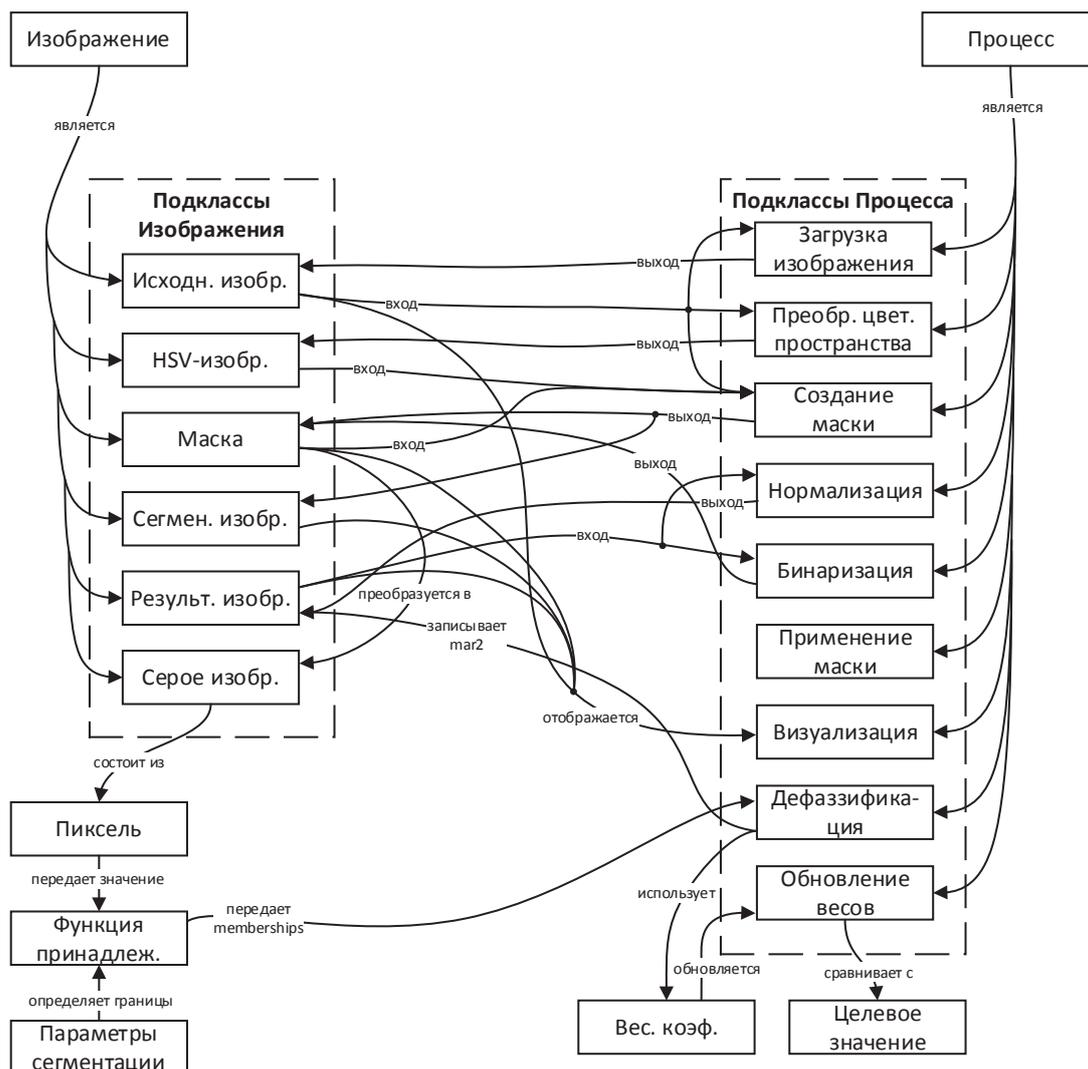


Рисунок 1 – Онтологическая модель сегментации изображений

Таблица 1 – Онтология классов модели сегментации изображений

№	Онтология классов		
	Название класса	Описание	Взаимосвязь
1.	Изображение	Представляет входные и выходные изображения, с которыми работает программа.	Процесс, Пиксель
2.	Пиксель	Элементарная единица изображения, характеризуется значением интенсивности (в RGB, HSV или градациях серого).	Функция принадлежности
3.	Функция принадлежности	Математическая модель для оценки степени принадлежности пикселя к определённой категории (например, фон или вода).	Дефаззификация, Формула (1)
4.	Параметры сегментации	Набор значений, определяющих границы для функций принадлежности (например, triangular_params)	Функция принадлежности
5.	Весовой коэффициент	Адаптивный параметр, используемый для настройки дефаззификации	Дефаззификация, Обновление весов
6.	Целевое значение	Значение (например, ytarget), к которому стремится результат сегментации	Обновление весов
7.	Процесс	Операции, выполняемые программой для достижения цели сегментации	Изображение

Таблица 2 – Онтология класса «Изображение» модели сегментации изображений

№	Онтология изображения		
	Название подкласса	Описание	Взаимосвязь
1.	Исходное изображение	Цветное изображение, загружаемое из файла (<i>RGB</i>)	Загрузка изображения, Преобразование цветового пространства, Создание маски, Визуализация
2.	<i>HSV</i> -изображение	Преобразованное изображение в цветовом пространстве <i>HSV</i>	Преобразование цветового пространства, Создание маски
3.	Маска	Бинарное изображение, выделяющее объект (например, воду)	Создание маски, Бинаризация, Серое изображение, Визуализация
4.	Сегментированное изображение	Результат применения маски к исходному изображению	Создание маски, Визуализация
5.	Серое изображение	Промежуточное изображение в градациях серого	Пиксель, Маска
6.	Результирующее изображение	Выходное изображение после дефаззификации	Нормализация, Дефаззификация, Бинаризация, Визуализация

Таблица 3 – Онтология класса «Процесс» модели сегментации изображений

№	Онтология процессов		
	Название подкласса	Описание	Взаимосвязь
1.	Загрузка изображения	Отвечает за чтение исходного изображения из файла в память программы. Вход: путь к файлу (<i>image_path</i>). Выход: объект <i>OriginalImage</i> .	Функция <i>Load Image</i>
2.	Преобразование цветового пространства	Преобразует изображение из цветового пространства <i>RGB</i> в <i>HSV</i> для упрощения анализа цветов. Вход: <i>OriginalImage</i> . Выход: <i>HSVImage</i> .	Функция <i>Convert</i>
3.	Создание маски	Создаёт начальную бинарную маску для выделения объекта (например, воды) на основе цветовых диапазонов. Вход: <i>HSVImage</i> , границы цвета (<i>lower_blue</i> , <i>upper_blue</i>). Выход: <i>Mask</i> .	Функция <i>Create Mask</i>
4.	Дефаззификация	Преобразует нечёткие значения принадлежности пикселей в чёткие значения интенсивности. Вход: список <i>memberships</i> , <i>learn1</i> , границы (<i>ymin</i> , <i>ymax</i>). Выход: результирующее значение <i>mar1</i> .	Формула (2), функция <i>defuzzy</i>
5.	Обновление весов	Адаптивно корректирует весовой коэффициент <i>learn1</i> на основе ошибки между результатом дефаззификации и целевым значением. Вход: <i>learn1</i> , <i>mar1</i> , <i>utarget</i> , параметры обучения (<i>w</i> , <i>t</i>). Выход: обновлённое значение <i>learn1</i> .	Формула (3)
6.	Нормализация	Приводит значения результирующего изображения к стандартному диапазону [0, 255]. Вход: <i>ResultImage</i> . Выход: нормализованное изображение.	Функция <i>Normalize</i>
7.	Бинаризация	Преобразует нормализованное изображение в бинарную маску с чёткими границами объекта. Вход: нормализованное изображение, порог (50). Выход: <i>BinaryMask</i> .	Функция <i>Binarize</i>
8.	Применение маски	Выделяет сегментированную область на исходном изображении с использованием бинарной маски. Вход: <i>OriginalImage</i> , <i>BinaryMask</i> . Выход: <i>SegmentedImage</i> .	Функция <i>Apply Mask</i>
9.	Визуализация	Отображает промежуточные и финальные результаты сегментации на экране. Вход: различные изображения (<i>OriginalImage</i> , <i>ResultImage</i> , <i>BinaryMask</i> , <i>SegmentedImage</i>). Выход: отображение на экране.	Функция <i>Output</i>

Таблица 4 – Онтология атрибутов модели сегментации изображений

№	Онтология атрибутов		
	Название класса	Атрибут	Описание
1.	Изображение	<i>path</i> (строка)	Путь к файлу изображения
		<i>data</i> (массив)	данные изображения (<i>RGB</i> , <i>HSV</i> , маска и т.д.).
		<i>shape</i> (кортеж)	размеры изображения (высота, ширина, каналы).
2.	Пиксель	<i>value</i> (число)	интенсивность пикселя (например, в градациях серого или <i>HSV</i>)
		<i>coordinates</i> (кортеж)	позиция пикселя (<i>i, j</i>)
3.	Функция принадлежности	<i>parameters</i> (кортеж)	границы треугольной функции (<i>x, y, z</i>)
		<i>membership_value</i> (число)	степень принадлежности (от 0 до 1)
4.	Весовой коэффициент	<i>value</i> (число)	текущее значение <i>learn</i>
		<i>min_value</i> (число)	минимально допустимое значение (0.001)
		<i>max_value</i> (число)	максимально допустимое значение (10)
5.	Целевое значение	<i>value</i> (число)	целевая интенсивность (например, 170)

Разработанная ОМ сегментации изображения представляет собой структурированное описание ключевых сущностей, процессов и их взаимосвязей, используемых для выделения объектов на изображении с применением нейро-нечёткого подхода. Модель включает основные классы, такие как *Изображение*, *Пиксель*, *Функция принадлежности*, *Весовой коэффициент*, *Параметры сегментации*, *Целевое значение* и *Процесс*, а также их подклассы, детализирующие этапы обработки данных. Процессы, такие как *Загрузка изображения*, *Преобразование цветового пространства*, *Дефаззификация*, *Обновление весов* и другие, формируют последовательный поток обработки, начиная с ввода исходного изображения и заканчивая визуализацией сегментированного результата.

Особенностью модели является её ориентация на онтологическую структуру, использующую нечёткие функции принадлежности для представления процессов сегментации изображений пожаров. Визуализация модели в виде графа упрощает анализ и модификацию ОМ.

2 Математическая модель

Работа нейро-нечёткой модели состоит из трёх шагов.

Шаг 1. Фаззификация – формирование треугольной функции принадлежности:

$$\mu(s, x, y, z) = \begin{cases} \frac{s-x}{y-x}, & \text{если } x < s \leq y; \\ \frac{z-s}{z-y}, & \text{если } y < s < z; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

где *s* – входящий сигнал, в данном случае значение интенсивности пикселя изображения; *x, y, z* – метки функций принадлежности, задаваемые разработчиком. Переменные *x, y, z* подбираются в зависимости от требуемого вида треугольной функции принадлежности. В результате операции фаззификации формируются две функции принадлежности (рисунок 2).

Степень активации нечётких правил определяется на основе функций принадлежности. При этом *max-min* композиция, основанная на правилах Заде (нечёткая импликация Мамдани [25]), исключена благодаря применению модифицированного метода отношения площадей в дефаззификаторе, что повышает быстродействие предложенного нечётко-логического вывода. Значения степеней активации, соответствующие классам «Фон» и «Объект», включены в структуру дефаззификатора, что обеспечивает обработку данных без дополнительных промежуточных этапов.

Шаг 2. Дефаззификация – определение выходного значения на основе модифицированного метода отношения площадей:

$$\text{MAR2} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n \times \text{Learn}_{i+1}} \cdot (Y_{\max} - Y_{\min}) \right] + Y_{\min}, \quad (3)$$

где M_i – значение, полученное из функций принадлежности $\mu(s, x, y, z)$, n – число выходных нечётких функций принадлежности, Learn_{i+1} – весовой коэффициент (по умолчанию 1), Y_{\max} – максимальное значение ядра, Y_{\min} – минимальное значение ядра.

Шаг 3. Процесс обучения – определение выходного значения после обучения:

$$\text{Learn}_{i+1} = \text{Learn}_i + ([\text{MAR2} - Y_{\text{target}}] \times w), \text{ until } |\text{MAR2} - Y_{\text{target}}| \leq T, \quad (4)$$

где Learn_i – весовой коэффициент (значение равно Learn_{i+1} с этапа дефаззификации); w – скорость обучения (по умолчанию 0.04); T – пороговый коэффициент (по умолчанию 0.01); Y_{target} – ожидаемое выходное значение после дефаззификации.

3 Метод адаптивной нейро-нечёткой сегментации изображений

На основе ОМ разработанный метод нейро-нечёткой сегментации изображений *ANFIS-OMAR* (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – Optimized Method Area Ratio*) включает девять этапов.

- 1) получение изображения в формате *RGB* (*Red, Green, Blue* – красный, зелёный, синий) с оптико-электронного прибора или из базы данных, где визуальная информация фиксируется в виде трёхканального массива (*RGB*).
- 2) преобразование изображения в формат *HSV* для определения параметров насыщенности, что улучшает выделение цветовых диапазонов при изменении освещённости благодаря интуитивным характеристикам цвета.
- 3) создание и применение маски по заданным цветовым значениям с последующим обнулением или подавлением пикселей, не соответствующих цвету, что фокусирует обработку на интересующих объектах.
- 4) преобразование в градации серого с использованием взвешенного среднего значений каналов *RGB*, упрощающее анализ текстуры и интенсивности пикселей для подачи в нечёткую систему.
- 5) фаззификация входных и выходных переменных с двумя треугольными функциями («Фон», «Объект») и выходными значениями, адаптируемыми в зависимости от условий.
- 6) дефаззификация результирующего значения, определяющая принадлежность пикселя к искомому классу на основе выходов нечёткой системы.
- 7) обучение системы, где результат сравнивается с эталонным значением, а весовые коэффициенты корректируются итерационно для повышения точности сегментации.
- 8) нормализация изображения после нечёткого вывода, приводящая значения к стандартной шкале.

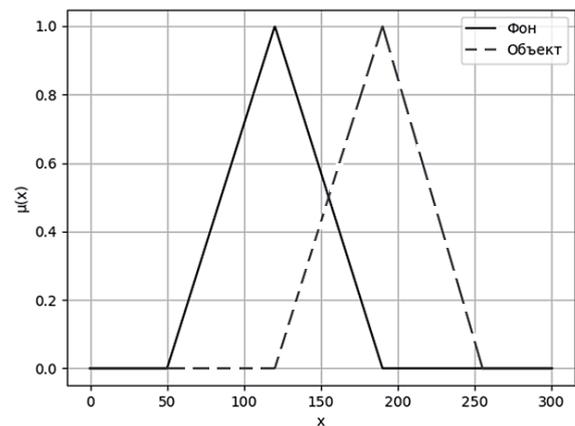


Рисунок 2 – Функции принадлежности «Фон» и «Объект»

9) формирование итогового сегментированного изображения, где маска визуализирует классификацию пикселей и пригодна для анализа, сегментации, распознавания или дальнейшей обработки.

Представленный метод адаптивной нейро-нечёткой сегментации изображений позволяет эффективно объединить нечёткие механизмы логического вывода с элементами машинного обучения.

4 Программа сегментации изображений

С целью воспроизводимости предложенного метода разработан программный код для реализации ОМ. На входе в программу поступают изображения, выходными данными являются обработанные изображения, на которых детектируемый объект выделен маской.

Алгоритм сегментации изображений пожаров с использованием модели *ANFIS-OMAR*, содержит следующие основные этапы.

1. Загрузка данных (строки 1-6): Алгоритм принимает входное изображение *I* в формате *RGB* размером 1024x720 пикселей и эталонную маску *GT*. Проверяется успешность загрузки файлов *fire1.jpg* и *fire1_mask.jpg*.
2. Преобразование в *HSV* (строки 7-20): Изображение преобразуется из формата *RGB* в цветовое пространство *HSV* для анализа оттенка (*H*), насыщенности (*S*) и яркости (*V*). Задаётся диапазон *HSV* (*lower_red* = [0, 40, 70], *upper_red* = [50, 255, 255]), соответствующий цветам огня (красные и оранжевые оттенки). Создаётся начальная маска огня (*Mask*), где пиксели в заданном диапазоне получают значение 255, остальные – 0.
3. Применение маски и преобразование в градации серого (строки 21-22): Маска применяется к исходному изображению для выделения области огня (*FireRegion*), после чего изображение преобразуется в градации серого (*GrayMask*) с использованием стандартных весов (0.114, 0.587, 0.299).
4. Инициализация параметров (строки 23-32): Создаётся выходное изображение *ResultImage* размером с *GrayMask*, заполненное нулями. Определяются параметры модели.
 - 4.1. *triangular_params* = [(50, 130, 255), (130, 190, 255)] – две треугольные функции принадлежности для классификации пикселей (огонь/фон).
 - 4.2. *Learn_i* – массив весовых коэффициентов, изначально заполненный единицами.
 - 4.3. *Y_{target}* = 180 – целевая интенсивность для адаптации.
 - 4.4. *w* = 0.004 – скорость обучения.
 - 4.5. *T* = 0.01 – порог ошибки для обновления *Learn_i*.
 - 4.6. *Y_{min}* = 0, *Y_{max}* = 255 – суппорт ядра выходной переменной.
 - 4.7. *threshold* = 30 – порог для бинаризации.
5. Обработка пикселей (строки 33-47). Для каждого пикселя (*x, y*) в *GrayMask*.
 - 5.1. Вычисляется интенсивность пикселей в маске *s*.
 - 5.2. Определяются степени принадлежности *h₁* и *h₂* к двум треугольным функциям в цикле из 4 итераций.
 - 5.2.1. Вычисляется дефазифицированное значение *defuzzy* с использованием оптимизированного метода отношения площадей (3).
 - 5.2.2. Значение ограничивается диапазоном [*Y_{min}*, *Y_{max}*].
 - 5.2.3. Если ошибка между *defuzzy* и *Y_{target}* превышает *T*, обновляется *Learn_i(x, y)* с использованием градиентного спуска (4), ограничивая его в пределах [0.001, 10].
 - 5.2.4. Результат записывается в *ResultImage(x, y)*.
6. Нормализация и бинаризация (строки 48-56): *ResultImage* нормализуется в диапазон [0, 255] по формуле минимакс-нормализации. Затем создаётся бинарная маска *BinaryMask*, где пиксели с интенсивностью выше порога (30) получают значение 255, остальные – 0.
7. Формирование результата (строки 57-58): Бинарная маска применяется к исходному изображению для получения сегментированного изображения *SegmentedImage*, которое выводится как результат.

Ниже представлен псевдокод разработанной программы.

```

Algorithm ANFIS-OMAR Image Segmentation
Require: Image I, GroundTruth GT
Ensure: SegmentedImage
1. Load Image I from file "fire1.jpg"
2. Load GroundTruth GT from file "fire1_mask.jpg"
3. If I or GT is not loaded then
4.   Output "Error loading image or mask"
    
```

```

5.   Exit
6. End If
7. Convert I from BGR to HSV: H, S, V = BGR_to_HSV(I)
8. Define HSV range:
9.   lower_red = [0, 40, 70]
10.  upper_red = [50, 255, 255]
11. Create Mask:
12.  For each pixel (x, y) do
13.    If lower_red[0] ≤ H(x, y) ≤ upper_red[0] and
14.      lower_red[1] ≤ S(x, y) ≤ upper_red[1] and
15.      lower_red[2] ≤ V(x, y) ≤ upper_red[2] then
16.      Mask(x, y) = 255
17.    Else
18.      Mask(x, y) = 0
19.    End If
20.  End For
21. Apply Mask: FireRegion = I * (Mask / 255)
22. Convert to grayscale: GrayMask = 0.114 * FireRegion_B + 0.587 * FireRegion_G + 0.299 * FireRegion_R
23. Initialize ResultImage = zeros_like(GrayMask)
24. Set Parameters:
25.   triangular_params = [(50, 130, 255), (130, 190, 255)]
26.   learni = ones_like(GrayMask)
27.   ytarget = 180
28.   w = 0.004
29.   t = 0.01
30.   ymin = 0
31.   ymax = 255
32.   threshold = 30
33. For each pixel (x, y) in GrayMask do
34.   s = GrayMask(x, y)
35.   h_1 = TriangularMembership(s, triangular_params[0][0], triangular_params[0][1], triangular_params[0][2])
36.   h_2 = TriangularMembership(s, triangular_params[1][0], triangular_params[1][1], triangular_params[1][2])
37.   memberships = [h_1, h_2]
38.   For i = 1 to 6 do
39.     defuzzy = (sum(memberships[j] * (2 - memberships[j]) for j in range(2)) / (2 * learni(x, y))) *
(ymax - ymin) + ymin
40.     defuzzy = max(ymin, min(defuzzy, ymax))
41.     If |defuzzy - ytarget| > t then
42.       learni(x, y) = learni(x, y) + w * (ytarget - defuzzy)
43.       learni(x, y) = max(0.001, min(learni(x, y), 10))
44.     End If
45.     ResultImage(x, y) = defuzzy
46.   End For
47. End For
48. Normalize ResultImage: ResultImage = (ResultImage - min(ResultImage)) / (max(ResultImage) - min(ResultImage)) * 255
49. Binarize ResultImage:
50.  For each pixel (x, y) do
51.    If ResultImage(x, y) > threshold then
52.      BinaryMask(x, y) = 255
53.    Else
54.      BinaryMask(x, y) = 0
55.    End If
56.  End For
57. Apply BinaryMask: SegmentedImage = I * (BinaryMask / 255)
58. Output SegmentedImage
End Algorithm

```

5 Экспериментальные исследования

Эксперименты проведены для оценки эффективности модели *ANFIS-OMAR* в задаче высокоскоростной сегментации изображений пожаров в сравнении с методами *HSV* и *U-Net*. В ходе экспериментов использовались четыре изображения формата 1024x720 пикселей, представляющие ночные пожары с дымом на фоне гор. Каждое изображение сопровождалось эталонной маской, созданной вручную для обозначения областей огня. Цель экспериментов

– определение способности методов сегментировать начинающиеся очаги возгорания при сохранении высокой скорости обработки, что важно для задач мониторинга пожаров в реальном времени. Результаты экспериментов представлены на рисунках 3-6.

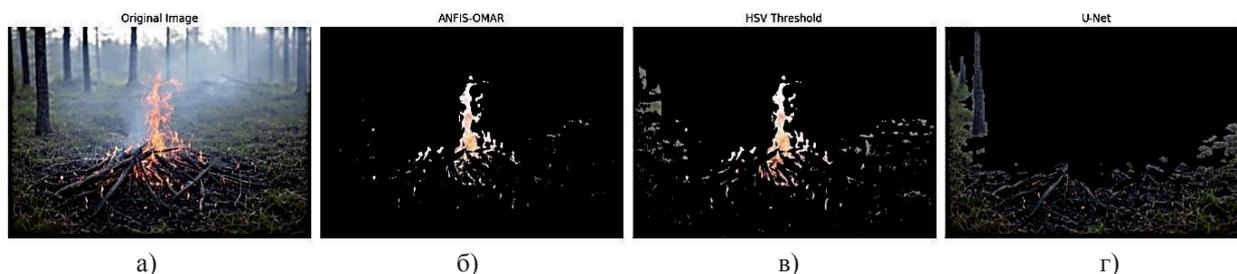


Рисунок 3 – Результаты эксперимента 1: а) оригинальное изображение, б) сегментированное моделью *ANFIS-OMAR*, в) сегментированное методом *HSV Threshold*, г) сегментированное моделью *U-Net*

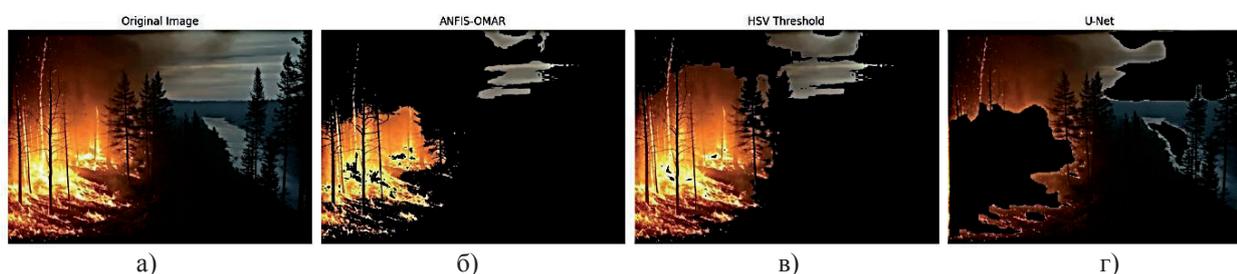


Рисунок 4 – Результаты эксперимента 2: а) оригинальное изображение, б) сегментированное моделью *ANFIS-OMAR*, в) сегментированное методом *HSV Threshold*, г) сегментированное моделью *U-Net*

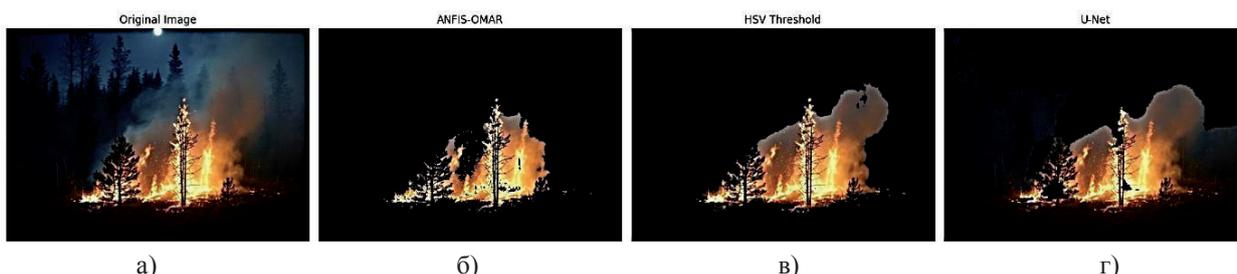


Рисунок 5 – Результаты эксперимента 3: а) оригинальное изображение, б) сегментированное моделью *ANFIS-OMAR*, в) сегментированное методом *HSV Threshold*, г) сегментированное моделью *U-Net*

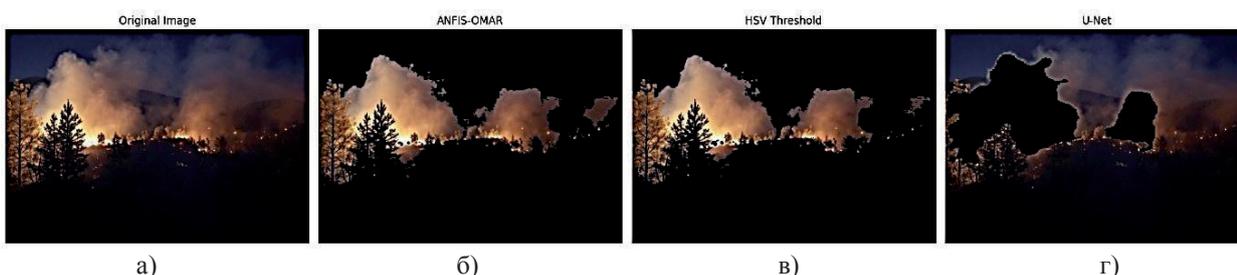


Рисунок 6 – Результаты эксперимента 4: а) оригинальное изображение, б) сегментированное моделью *ANFIS-OMAR*, в) сегментированное методом *HSV Threshold*, г) сегментированное моделью *U-Net*

ANFIS-OMAR: Использовалась адаптивная нейро-нечёткая система вывода с оптимизированным дефаззификатором метода отношения площадей. Параметры: диапазон *HSV* (*lower_red* = [0, 40, 70], *upper_red* = [50, 255, 255]), треугольные функции принадлежности $((50, 130, 255), (130, 190, 255))$, целевая интенсивность $Y_{target} = 180$, порог бинаризации 30.

HSV: Пороговая сегментация в том же диапазоне *HSV* (*lower_red* = [0, 40, 70], *upper_red* = [50, 255, 255]) без дополнительной обработки.

U-Net: Упрощённая свёрточная сеть с предварительным обучением на 300 изображениях (30 эпох), входное изображение масштабировалось до 256x256, порог бинаризации 0.1.

Оценка производилась по метрикам: время выполнения (*Time, s*), среднеквадратичная ошибка (*RMSE*), коэффициент пересечения и объединения (*IoU*), коэффициент *Dice* и средняя абсолютная процентная ошибка (*MAPE*). Результаты представлены в таблице 5. Анализ результатов показал следующее.

Таблица 5 – Результаты экспериментов

	<i>Time, s</i>	<i>RMSE</i>	<i>IoU</i>	<i>Dice</i>	<i>MAPE</i>
Эксперимент 1					
<i>ANFIS-OMAR</i>	0.1466	0.8877	0.3783	0.5489	72.8
<i>HSV</i>	0.0020	0.8978	0.2813	0.4390	70.5
<i>U-Net</i>	2.4721	2.2161	0.0004	0.0008	142.6
Эксперимент 2					
<i>ANFIS-OMAR</i>	0.1576	0.9699	0.2243	0.3664	69.8
<i>HSV</i>	0.0020	1.0564	0.1306	0.2311	64.8
<i>U-Net</i>	2.3706	2.0598	0.0002	0.0004	158.6
Эксперимент 3					
<i>ANFIS-OMAR</i>	0.1596	0.7448	0.4041	0.5756	42.1
<i>HSV</i>	0.0030	0.7873	0.2947	0.4553	27.7
<i>U-Net</i>	2.3321	1.8794	0.0663	0.1243	67.1
Эксперимент 4					
<i>ANFIS-OMAR</i>	0.1359	0.7464	0.0781	0.1448	50.1
<i>HSV</i>	0.0020	0.7381	0.0756	0.1406	54.8
<i>U-Net</i>	2.3563	1.6388	0.0086	0.0171	135.5

U-Net – неэффективен (*IoU*=0.0086).

ANFIS-OMAR различал огонь и фон (дым, горы), минимизируя ложноположительные пиксели, в отличие от *HSV*, который чаще включал дым, и от *U-Net*, который переобучался. Время выполнения *ANFIS-OMAR* (~0.14–0.16 с) значительно ниже *U-Net* (~2.3–2.5 с), но больше *HSV* (~0.002–0.003 с). Это подтверждает пригодность *ANFIS-OMAR* для реального времени.

Заключение

Исследование показало эффективность ОМ сегментации изображений пожаров на основе *ANFIS-OMAR* в условиях ночного освещения с дымом на фоне гор. В разработанной ОМ систематизированы ключевые сущности, процессы и их взаимосвязи, включая преобразование изображений в цветовое пространство оттенка, насыщенности и яркости, использование треугольных функций принадлежности и адаптивную настройку параметров с оптимизированным дефаззификатором метода отношения площадей. Модель структурирует процессы обработки данных для выделения очагов возгорания. Эксперименты на четырёх изображениях формата 1024x720 подтвердили, что *ANFIS-OMAR* превосходит методы *HSV* и *U-Net* по ключевым метрикам (*IoU* и *Dice*), особенно в сложных условиях с переменной интенсивностью огня и дымом. *HSV* быстрее (~0.002 с), но уступает по точности (*IoU* до 0.2947), а *U-Net* (~2.3 с) демонстрирует низкую эффективность (*IoU* до 0.0663) из-за ограниченного обучения.

Малое время обработки *ANFIS-OMAR* (0.14-0.16 с.) делает модель пригодной для мониторинга пожаров в реальном времени. Онтологический подход, лежащий в основе *ANFIS-OMAR*, обеспечивает чёткое описание классов, процессов и атрибутов, упрощая анализ и модификацию алгоритма.

Эксперимент 1: ANFIS-OMAR показал лучшее качество сегментации (*IoU*=0.3783, *Dice*=0.5489) по сравнению с *HSV* (*IoU*=0.2813, *Dice*=0.4390), хотя *MAPE* остался выше (72.8% против 70.5%). *U-Net* показал низкую точность (*IoU*=0.0004, *Dice*=0.0008) из-за переобучения на одном изображении.

Эксперимент 2: ANFIS-OMAR сохранил преимущество по *IoU* (0.2243) и *Dice* (0.3664) над *HSV* (0.1306 и 0.2311), но *MAPE* ухудшился (69.8% против 64.8%). *U-Net* показал низкие результаты (*IoU*=0.0002).

Эксперимент 3: ANFIS-OMAR достиг наилучших показателей (*IoU*=0.4041, *Dice*=0.5756, *MAPE*=42.1099%), значительно превосходя *HSV* (*IoU*=0.2947, *Dice*=0.4553, *MAPE*=27.7%). *U-Net* улучшился (*IoU*=0.0663).

Эксперимент 4: ANFIS-OMAR и *HSV* показали схожие низкие результаты (*IoU*=0.07–0.08, *Dice*=0.14), вероятно из-за малого раз-

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Kanand T., Kemper G., König R., Kemper H.** Wildfire detection and disaster monitoring system using uas and sensor fusion technologies. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2020, XLIII-B3-2020, 1671–1675, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1671-2020.
- [2] **Шваров Н.Н., Хасан Я., Фахми Ш.С.** Метод автоматизированного обнаружения и исследования лесных пожаров. *Наука настоящего и будущего*. 2018. Т.1. С.119-123. EDN: VAREEB.
- [3] **Abdusalomov A., Baratov N., Kutlimuratov A., Whangbo T. K.** An improvement of the fire detection and classification method using YOLOv3 for surveillance systems. *Sensors*, 2021, 21(19). DOI: 10.3390/s21196519.
- [4] **Алиев И.Р., Павлов В.А.** Применение алгоритмов компьютерного зрения для обнаружения и локализации пожаров на аэрофотоснимках. *СПбНТОРЭС: труды ежегодной HTK*. 2020. №1(75). С.225-228.
- [5] **Станкевич Т.С., Далнер Д., Трчка М., Томитчек А.** Оперативное прогнозирование теплового потока при пожаре в вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой с использованием ANFIS. *Пожаровзрывобезопасность*. 2020. Т.29, №5. С.13-39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.13-39.
- [6] **Doborjeh Z., Hemmington N., Doborjeh M., Kasabov N.** Artificial intelligence: a systematic review of methods and applications in hospitality and tourism. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 2022, 34(3), 1154–1176. DOI: 10.1108/IJCHM-06-2021-0767
- [7] **Станкевич Т.С.** Применение сверточных нейронных сетей для решения задачи оперативного прогнозирования динамики распространения лесных пожаров. *Бизнес-информатика*. 2018. №4(46). С.17-27. DOI: 10.17323/1998-0663.2018.4.17.27.
- [8] **Yang S.Y., Zhong Y.D., Zhong B.C., Lin Y.Y.** Enhancing Flooding Depth Forecasting Accuracy in an Urban Area Using a Novel Trend Forecasting Method. *Water Resources Management*, 2024, 38(4), P.1359–1380. DOI: 10.1007/s11269-023-03725-4.
- [9] **Mseddi W.S., Ghali R., Jmal M., Attia R.** Fire Detection and Segmentation using YOLOv5 and U-NET. In *European Signal Processing Conference (Vol. 2021-August. P.741–745)*. European Signal Processing Conference, 2021, EUSIPCO. DOI: 10.23919/EUSIPCO54536.2021.9616026.
- [10] **Guan Z., Miao X., Mu Y., Sun Q., Ye Q., Gao D.** Forest Fire Segmentation from Aerial Imagery Data Using an Improved Instance Segmentation Model. *Remote Sensing*, 2022, 14(13). DOI: 10.3390/rs14133159.
- [11] **Ghali R., Akhloufi M. A.** Deep Learning Approaches for Wildland Fires Remote Sensing: Classification, Detection, and Segmentation. *Remote Sensing*, 2023. 15(3). DOI: 10.3390/rs15071821.
- [12] **Бочков В.С., Катаева Л.Ю., Масленников Д.А.** Точная многоклассовая сегментация пожаров: подходы, нейронные сети, схемы сегментации. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2024. №3. С.71-86. DOI 10.14357/20718594240306.
- [13] **Saponara S., Elhanashi A., Gagliardi A.** Real-time video fire/smoke detection based on CNN in antifire surveillance systems. *Journal of Real-Time Image Processing*. 2021, 18(3), 889–900. DOI:10.1007/s11554-020-01044-0.
- [14] **Jonnalagadda A.V., Hashim H.A.** SegNet: A segmented deep learning based Convolutional Neural Network approach for drones wildfire detection. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2024, 34. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101181.
- [15] **Феоктистова О.В., Горбачев И.В.** Выявление участков улучшенных свойств пласта, основанное на анализе результатов сегментации сейсмических данных с помощью генетических алгоритмов. *Геофизика*. 2021. №4. С.40-50. EDN: CKHVFT.
- [16] **Zarkasi A., Nurmaini S., Stiawan D., Firdaus, Abdurahman, Deri Amanda C.** Implementation of fire image processing for land fire detection using color filtering method. In *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics Publishing. 2019. Vol. 1196., DOI: 10.1088/1742-6596/1196/1/012003.
- [17] **Mon Arjay F. Malbog, Alvin Sarraga Alon, Cherry D. Casuat, Rufo I. Marasigan Jr., Joshua S. Gulmatico.** Hybrid-FireID: Fire Identification using Hybrid Features Extraction for Combustible and Fluid Fire Segmentation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2020, 8(2). P.471-475. DOI: 10.30534/ijeter/2020/35822020.
- [18] **Chen G., Chen C., Yuan Y., Xu L.** Control strategy of injection rail pressure of diesel engine based on T-S model and adaptive neural fuzzy inference system. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2021, 83(1). P.67-82.
- [19] **Alghamdi M.I.** Neutrosophic set with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Liver Tumor Segmentation and Classification Model. *International Journal of Neutrosophic Science*, 2022, 18(2). P.174-185. DOI: 10.54216/IJNS.180202.
- [20] **Yandouzi M., Grari M., Berrahal M., Idrissi I., Moussaoui O., Azizi M., Elmiad A.K.** Investigation of combining deep learning object recognition with drones for forest fire detection and monitoring. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2023, 14(3). P.377–384. DOI: 10.14569/IJACSA.2023.0140342.

- [21] **Корабошев О.З.** Анализ и перспективы применения методов машинного обучения для чрезвычайных ситуаций. *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2024. №1(37). С.12-17. DOI 10.20295/2413-2527-2024-137-12-17.
- [22] **Fahmy A.** Opportunities and challenges of applying artificial intelligence in healthcare. *Premier Journal of Artificial Intelligence*. 2024. P.67-82. DOI 10.70389/pjai.100003.
- [23] **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.
- [24] **Шошина К.В., Алешко Р.А., Березовский В.В.** Тематическое дешифрирование аэроснимков лесных территорий на основе концептуального моделирования. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, № 3(49). С.437-454. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-437-454.
- [25] **Пегат А.** Нечёткое моделирование и управление. Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборат. знаний, 2011. 798 с.

Сведения об авторах



Бобырь Максим Владимирович, 1978 г. рождения. Окончил Курский государственный технический университет в 2000 г., к.т.н. (2003 г.). Д.т.н., профессор кафедры программной инженерии ЮЗГУ. Председатель первого в России диссертационного совета ЮЗГУ по специальности «Когнитивное моделирование» (технические науки). В списке научных трудов более 450 работ в области систем управления сложными объектами на основе интеллектуальных систем технического зрения. Author ID (РИНЦ): 276211; Author ID (Scopus): 57191724301; Researcher ID (WoS): G-2604-2013; ORCID: 0000-0002-5400-6817. maxbobyry@gmail.com ✉.



Бондаренко Богдан Андреевич, 1997 г. рождения. Аспирант кафедры программной инженерии ЮЗГУ по специальности 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. Область научных интересов: обучающие нечётко-логические системы, распознавание образов. Author ID (РИНЦ): 1176529; Researcher ID (WoS): HGV-0751-2022; ORCID: 0000-0001-5415-9015. sikersinko@gmail.com

Поступила в редакцию 27.03.2025, после рецензирования 15.10.2025. Принята к публикации 11.12.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-60-73

Ontological model for fire image segmentation using an adaptive neuro-fuzzy network

© 2026, М.В. Бобырь ✉, В.А. Бондаренко

Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract

Fire image segmentation is a critical task for early detection and emergency monitoring systems. Traditional methods, such as thresholding and complex computational models, face limitations in terms of speed and accuracy under real-time conditions. The objective of this study is to enable an image segmentation process operating in near real-time. This paper presents an ontological model for fire image segmentation based on an adaptive neuro-fuzzy system with an optimized defuzzifier employing the area ratio method. The proposed model structures data processing workflows, including image transformation into the hue-saturation-brightness color space, the use of triangular membership functions, and adaptive parameter tuning for identifying fire regions. The ontology systematizes classes, processes, and their interrelationships, thereby ensuring modularity and flexibility of the solution. Experiments on images of nighttime fires with smoke showed that the proposed model achieves high accuracy and speed, outperforming the compared segmentation methods, and demonstrates potential for application in real-time monitoring systems.

Keywords: *ontology, neuro-fuzzy algorithm, image segmentation, defuzzification, artificial intelligence.*

For citation: *Bobyry MV, Bondarenko BA. Ontological model for fire image segmentation using an adaptive neuro-fuzzy network [In Russian]. Ontology of designing. 2026; 16(1): 60-73. DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-1-60-73.*

Financial Support: The work was carried out with the support of State Assignment No. 075-03-2025-526.

Authors' contributions: *Bobyry MV.* – development of the concept of a neuro-fuzzy network for image segmentation; *Bondarenko BA.* – development of the ontological model for fire image segmentation and conducting experiments.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Ontological model of image segmentation

Figure 2 – Membership functions "Background" and "Object"

Figure 3 – Results of Experiment 1: a) original image, b) segmented using the ANFIS-OMAR model, c) segmented using the HSV Threshold method, d) segmented using the U-Net model

Figure 4 – Results of Experiment 2: a) original image, b) segmented using the ANFIS-OMAR model, c) segmented using the HSV Threshold method, d) segmented using the U-Net model

Figure 5 – Results of Experiment 3: a) original image, b) segmented using the ANFIS-OMAR model, c) segmented using the HSV Threshold method, d) segmented using the U-Net model

Figure 6 – Results of Experiment 4: a) original image, b) segmented using the ANFIS-OMAR model, c) segmented using the HSV Threshold method, d) segmented using the U-Net model

Table 1 – Ontology of classes of the image segmentation model

Table 2 – Ontology of the "Image" class of the image segmentation model

Table 3 – Ontology of the "Process" class of the image segmentation model

Table 4 – Ontology of attributes of the image segmentation model

Table 5 – Experimental results

References

- [1] **Kanand T, Kemper G, König R, Kemper H.** Wildfire detection and disaster monitoring system using uas and sensor fusion technologies. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2020, XLIII-B3-2020, 1671–1675, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1671-2020.
- [2] **Shvarov NN, Hasan Ya, Fahmi ShS.** A method for automated detection and analysis of forest fires [In Russian]. *Science of the present and future.* 2018; 1: 119-123.
- [3] **Abdusalomov A, Baratov N, Kutlimuratov A, Whangbo TK.** An improvement of the fire detection and classification method using YOLOv3 for surveillance systems. *Sensors*, 2021, 21(19). DOI: 10.3390/s21196519.
- [4] **Aliyev IR, Pavlov VA.** Application of computer vision algorithms for detection and localization of fires on aerial photographs [In Russian]. *SPbNTORES: proceedings of the annual STC.* 2020; 1(75): 225-228.
- [5] **Stankevich TS, Dalner D, Trčka M, Tomitschek A.** Operational forecasting of heat flow in a fire in a vertical steel tank with a protective wall using ANFIS [In Russian]. *Fire and explosion safety.* 2020; 29(5): 13-39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.13-39.
- [6] **Doborjeh Z, Hemmington N, Doborjeh M, Kasabov N.** Artificial intelligence: a systematic review of methods and applications in hospitality and tourism. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 2022, 34(3), 1154–1176. DOI: 10.1108/IJCHM-06-2021-0767.
- [7] **Stankevich TS.** Application of convolutional neural networks to solve the problem of operational forecasting of the dynamics of forest fire spread [In Russian]. *Business informatics.* 2018; 4(46): 17-27. DOI: 10.17323/1998-0663.2018.4.17.27.
- [8] **Yang SY, Zhong YD, Zhong BC, Lin YY.** Enhancing flooding depth forecasting accuracy in an urban area using a novel trend forecasting method. *Water Resources Management*, 2024, 38(4), 1359–1380. DOI: 10.1007/s11269-023-03725-4.
- [9] **Mseddi WS, Ghali R, Jmal M, Attia R.** Fire Detection and Segmentation using YOLOv5 and U-NET. In European Signal Processing Conference. *European Signal Processing Conference*, 2021; Vol.2021-August: 741–745. EUSIPCO. DOI: 10.23919/EUSIPCO54536.2021.9616026.
- [10] **Guan Z, Miao X, Mu Y, Sun Q, Ye Q, Gao D.** Forest fire segmentation from aerial imagery data using an improved instance segmentation model. *Remote Sensing*, 2022, 14(13). DOI: 10.3390/rs14133159.
- [11] **Ghali R, Akhloofi MA.** Deep Learning Approaches for Wildland Fires Remote Sensing: Classification, Detection, and Segmentation. *Remote Sensing*, 2023. MDPI. DOI: 10.3390/rs15071821.

- [12] **Bochkov VS, Kataeva LYu, Maslennikov DA.** Accurate multi-class segmentation of fires: approaches, neural networks, segmentation schemes [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2024; 3: 71-86. DOI: 10.14357/20718594240306.
- [13] **Saponara S, Elhanashi A, Gagliardi A.** Real-time video fire/smoke detection based on CNN in antifire surveillance systems. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2021, 18(3), 889–900. DOI:10.1007/s11554-020-01044-0.
- [14] **Jonnalagadda AV, Hashim HA.** SegNet: A segmented deep learning based Convolutional Neural Network approach for drones wildfire detection. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2024; 34. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101181.
- [15] **Feoktistova OV, Gorbachev IV.** Identification of areas with improved reservoir properties based on the analysis of seismic data segmentation results using genetic algorithms [In Russian]. *Geophysics*. 2021; 4: 40-50.
- [16] **Zarkasi A, Nurmaini S, Stiawan D, Firdaus A, Deri AC.** Implementation of fire image processing for land fire detection using color filtering method. In *Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1196)*. Institute of Physics Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1196/1/012003.
- [17] **Mon Arjay F, Malbog, Alvin Sarraga Alon, Cherry D, Casuat, Rufo I, Marasigan Jr., Joshua S. Gulmatico.** Hybrid-FireID: Fire identification using hybrid features extraction for combustible and fluid fire segmentation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2020; 8(2): 471–475. DOI: 10.30534/ijeter/2020/35822020.
- [18] **Chen G, Chen C, Yuan Y, Xu L.** Control strategy of injection rail pressure of diesel engine based on T-S model and adaptive neural fuzzy inference system. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2021; 83(1): 67–82.
- [19] **Alghamdi MI.** Neutrosophic set with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Liver Tumor Segmentation and Classification Model. *International Journal of Neutrosophic Science*. 2022; 18(2): 174–185. DOI: 10.54216/IJNS.180202.
- [20] **Yandouzi M, Grari M, Berrahal M, Idrissi I, Moussaoui O, Azizi M, Elmiad AK.** Investigation of combining deep learning object recognition with drones for forest fire detection and monitoring. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2023; 14(3): 377–384. DOI: 10.14569/IJACSA.2023.0140342.
- [21] **Koraboshev OZ.** Analysis and prospects of application of machine learning methods for emergency situations [In Russian]. *Intelligent Technologies in Transport*. 2024; 1(37): 12-17. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-137-12-17.
- [22] **Fahmy A.** Opportunities and challenges of applying artificial intelligence in healthcare. *Premier Journal of Artificial Intelligence*. 2024. P.67-82. DOI: 10.70389/pjai.100003.
- [23] **Malykhina GF, Zhirakova PS, Militsyn AV.** 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.
- [24] **Shoshina KV, Aleshko RA, Berezovsky VV.** Thematic interpretation of aerial photographs of forest areas based on conceptual modeling [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(3): 437-454. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-437-454.
- [25] **Pegat A.** Fuzzy modeling and control [In Russian]. Trans. from English. Moscow: BINOM. Laboratory of knowledge, 2011. 798 p.

About the authors

Maxim Vladimirovich Bobyr (b. 1978) graduated from Kursk State Technical University (KSTU) in 2000, Ph.D in Engineering (2003). Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Software Engineering at Southwest State University. Chair of the first dissertation council in Russia at Southwest State University in the specialty "Cognitive modeling" (Engineering Sciences). The list of scientific papers includes more than 450 works in the field of control systems for complex objects based on intelligent vision systems. Author ID (RSCI): 276211; Author ID (Scopus): 57191724301; Researcher ID (WoS): G-2604-2013; ORCID: 0000-0002-5400-6817. maxbobyr@gmail.com. ✉

Bogdan Andreevich Bondarenko (b. 1997) is a postgraduate student at the Department of Software Engineering, Southwest State University, majoring in 05.13.06 Automation and Control of Technological Processes and Production. Research interests include trainable fuzzy logic systems and pattern recognition. Author ID (RSCI): 1176529; Researcher ID (WoS): HGV-0751-2022; ORCID: 0000-0001-5415-9015. sikersinko@gmail.com

Received March 27, 2025. Revised October 15, 2025. Accepted December 11, 2025.



Автоматизация построения мультиагентной системы для проектирования интегрированных энергетических систем

© 2026, Е.А. Барахтенко ✉, Д.В. Соколов, Г.С. Майоров

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), Иркутск, Россия

Аннотация

В статье предложен подход к автоматизации построения мультиагентной системы на базе онтологии, включающей описание агентов системы, программных компонентов, реализующих методы, алгоритмы и математические модели подсистем и элементов. Подход основан на концепциях модельно-управляемой разработки и разработки программного обеспечения на основе онтологии, которые адаптированы к особенностям мультиагентного моделирования интегрированных энергетических систем. В решаемой задаче информация разделена на многократно используемые знания и данные, описывающие её контекст. Программные агенты разработаны для многократного применения и не зависят от конкретных моделей оборудования. Их объединение с математическими моделями интегрированных энергетических систем и методами решения задач выполняется при построении мультиагентной системы. Приведено описание: архитектуры единой программной платформы; методики построения онтологии мультиагентной системы; методики автоматизированного построения мультиагентной системы для проведения вычислений при проектировании интегрированных энергетических систем. Представлены результаты применения подхода при проектировании интегрированной энергетической системы.

Ключевые слова: онтология, мультиагентная система, моделирование, автоматизация, интегрированная энергетическая система, проектирование.

Цитирование: Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С. Автоматизация построения мультиагентной системы для проектирования интегрированных энергетических систем. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.74-86. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-74-86.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант №24-29-00823).

Вклад авторов: Барахтенко Е.А. – концептуализация, методические основы; Соколов Д.В. – методология, исследование; Майоров Г.С. – подготовка данных, анализ результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Развитие новых технологий и внедрение инновационного энергетического оборудования оказывает значительное влияние на работу энергетических инфраструктур, включающих системы электро-, тепло-, холодо-, газоснабжения и др. [1]. Объединение этих систем на технологическом и организационном уровнях приводит к формированию интегрированных энергетических систем (ИЭС), которые обеспечивают повышение надёжности и эффективности ИЭС и рациональное использование энергетических ресурсов.

Сложность задачи проектирования ИЭС обусловлена особенностью сетевой конфигурации этих систем, множеством объектов с индивидуальным поведением, наличием ряда центров принятия решений и необходимостью согласования решений [2].

Применение мультиагентного подхода при решении задачи проектирования ИЭС позволяет рассматривать большое количество активных элементов, в т.ч. распределённые источники энергии, и активных потребителей с собственными источниками энергии [3-5]. В осно-

ве мультиагентного подхода лежит понятие мобильного программного агента. Решение задачи проектирования ИЭС осуществляется независимыми друг от друга центрами принятия решений, обменивающимися между собой информацией, а на этапе согласования находится компромиссное решение, учитывающее интересы всех участников энергоснабжения [6].

Сложность организации мультиагентного моделирования ИЭС приводит к необходимости разработки подходов, которые обеспечат автоматизацию построения мультиагентной системы (МАС). Эффективным средством автоматизации построения больших программных систем являются концепция модельно-управляемой разработки (*Model-Driven Engineering, MDE*) [7, 8] и концепция разработки программного обеспечения на основе онтологии (*Ontology Driven Software Engineering, ODSE*) [9, 10]. В статье сделана попытка применения этих концепций к особенностям процесса мультиагентного моделирования ИЭС. Автоматизация построения МАС выполняется на основе компьютерной модели ИЭС и знаний, формализованных в виде онтологии.

1 Постановка задачи

При проектировании ИЭС решается комплекс задач с разными содержательными формулировками, и для их решения используются различные методики, специализированное математическое и программное обеспечение [1, 11]. В [12] на примере трубопроводных систем энергетики показано, что в процессе их проектирования требуется интеграция различных подсистем. При построении МАС необходимо объединить составляющие, представленные на рисунке 1. Математическое обеспечение включает математические постановки задач проектирования, математические модели подсистем и элементов ИЭС, методы и алгоритмы. Программное обеспечение включает различные программные компоненты, которые реализуют методики решения задач проектирования ИЭС, математические модели подсистем и элементов ИЭС, методы и алгоритмы, а также сторонние решатели – программные разработки, предназначенные для решения конкретных классов задач.



Рисунок 1 – Составляющие в проектировании интегрированных энергетических систем (ИЭС)

Структура МАС, отражающая особенности построения ИЭС, описывается тремя уровнями (рисунок 2) [6]: уровень централизованной системы; уровень распределённых систем; уровень систем энергопотребления. МАС является неоднородной, и при её построении используются агенты следующих типов:

- агент обычного потребителя;
- агент активного потребителя;

- сетевой агент централизованной системы;
- агенты источников энергии, которые подразделяются на агенты централизованных источников энергии и агенты распределённых источников энергии;
- агенты участков сетей, которые подразделяются на агенты участков магистральных сетей и агенты участков распределительных сетей;
- сетевые агенты распределённых систем.

Иерархическая модель ИЭС отражает структурную конфигурацию, состав оборудования и технические ограничения, которым должны соответствовать параметры спроектированной системы. Компьютерная модель ИЭС содержит объём информации, достаточный для формирования контекста решаемой задачи. Вместе с тем, при автоматизированном построении МАС необходимо использовать знания, которые не зависят от контекста решаемой задачи. Хранение этих знаний предлагается организовать в виде онтологии.

Онтологии всё больше вызывают интерес у специалистов [13, 14] и находят широкое применение при формализации знаний в инженерных системах [15, 16]. В [17] разработанные онтологии направлены на анализ энергетических систем, а в [18] содержат описание основных объектов энергетических сетей и цепочек спроса и предложения на энергию. Онтология используется для интерпретации информации, связанной с рынками электроэнергии [19]. В [20] онтологии рассматриваются как основа для формирования информационных моделей цифровых двойников объектов управления в распределённой энергетике. В [21] предлагается решение для онтологического моделирования децентрализованных данных в интеллектуальных энергетических системах. Фрактальный подход к структурированию знаний в энергетике используется для разработки онтологических пространств [22]. В [23] графически представлены онтологии, отражающие понятия ситуационного управления, включая ситуационный анализ и моделирование, а также онтологию возникающих ситуаций с точки зрения энергетической безопасности. В обзоре [24] обсуждаются вопросы проектирования программного обеспечения под управлением онтологий.

В концепции *MDE* модели предметных областей рассматриваются как информационные ресурсы для автоматического создания программных систем, а предметно-ориентированные языки позволяют создавать детальные описания предметных областей для автоматизации этапов разработки программного обеспечения [7]. В [25] предлагается подход к проектированию программного обеспечения для теплоснабжающих систем на основе *MDE*, используя технологии метапрограммирования и онтологии. В концепции *ODSE* онтологии используются для автоматизации построения сложных программных систем [26].

Концепции *MDE* и *ODSE* применимы для автоматизации построения МАС, предназначенной для решения задач проектирования ИЭС.

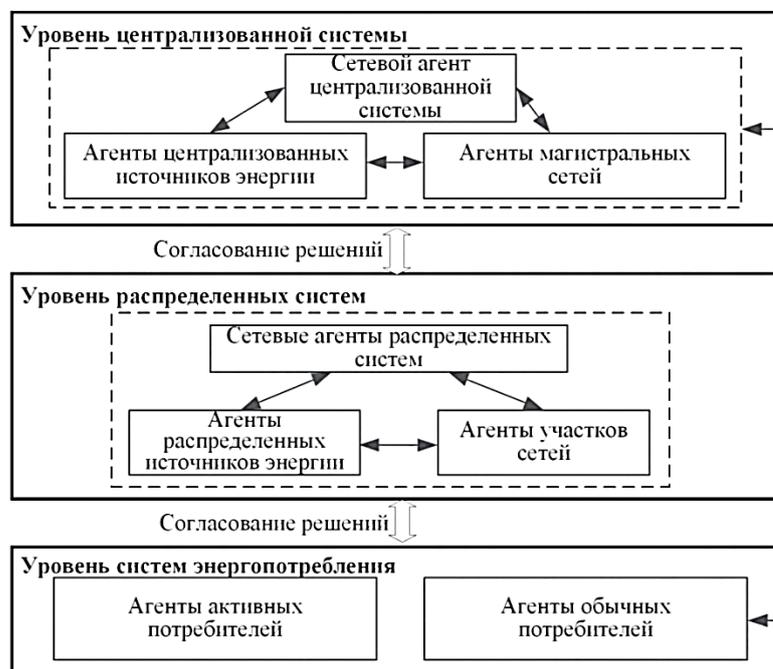


Рисунок 2 – Структура мультиагентной системы

2 Подход к автоматизации построения мультиагентной системы

Разработанный подход к автоматизации построения МАС для проектирования ИЭС с применением онтологии имеет ряд особенностей (см. рисунок 3):

- в основе лежат концепции *MDE* и *ODSE*, которые адаптированы к особенностям построения МАС;
- используемая при автоматизированном построении информация разделена на многократно используемые знания и данные, описывающие контекст решаемой задачи;
- многократно используемые знания хранятся в онтологии;
- данные, описывающие контекст решаемой задачи, извлекаются из модели ИЭС;
- агенты МАС разрабатываются для многократного применения и не зависят от конкретных моделей оборудования;
- настройка агентов выполняется в контексте построения МАС.



Рисунок 3 – Упрощённая схема предлагаемого подхода

Предлагаемая структура онтологии МАС (см. рисунок 4) включает описание: иерархии агентов и их связей с подсистемами ИЭС; прикладных задач и используемых для их решения методов; математических моделей подсистем ИЭС; программных реализаций математических моделей и методов.

При автоматизированном построении МАС используется компьютерная модель ИЭС, которая хранится в следующем виде:

- в реляционной базе данных, позволяющей сохранить описание подсистем и параметров элементов ИЭС;
- в универсальных форматах хранения данных, таких как *JSON* и *XML*.

Разработанный подход включает следующие составляющие:

- архитектуру единой программной платформы;
- методику построения онтологии МАС;
- методику автоматизированного построения МАС при проектировании ИЭС.

Мультиагентное моделирование выполняется на базе единой программной платформы, которая обеспечивает интеграцию всех необходимых для решения задачи проектирования ИЭС составляющих в контексте решения задачи. Архитектура платформы представлена на рисунке 5 и включает следующие элементы:

- компьютерную модель ИЭС;
- МАС, построитель МАС и онтологию МАС;
- библиотеку агентов;

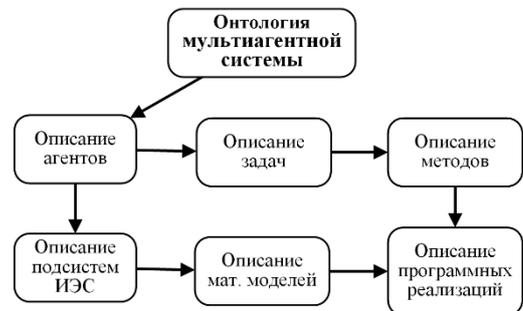


Рисунок 4 – Структура онтологии мультиагентной системы

- библиотеку математических моделей элементов ИЭС, используемых агентами;
- библиотеку решателей, используемых агентами.



Рисунок 5 – Архитектура программной платформы

Построение МАС автоматизировано на основе описания ИЭС, отражающего конфигурацию системы, знаний из онтологии МАС и программных компонентов, организованных в виде библиотек. Построитель МАС состоит из: построителя графа МАС; загрузчика агентов и программных компонентов; компоновщика МАС.

Построение МАС реализуется в результате выполнения трёх этапов.

На первом этапе выполняется построение графа (рисунок 6), отражающего структурную конфигурацию МАС и решаются следующие подзадачи.

- 1) анализ компьютерной модели ИЭС.
- 2) формирование перечня подсистем ИЭС.
- 3) формирование перечня используемого оборудования.
- 4) загрузка описания необходимых агентов из онтологии МАС.
- 5) формирование описания необходимых моделей элементов ИЭС.
- 6) формирование описания используемых методов.
- 7) построение графа, отражающего структурную конфигурацию МАС.

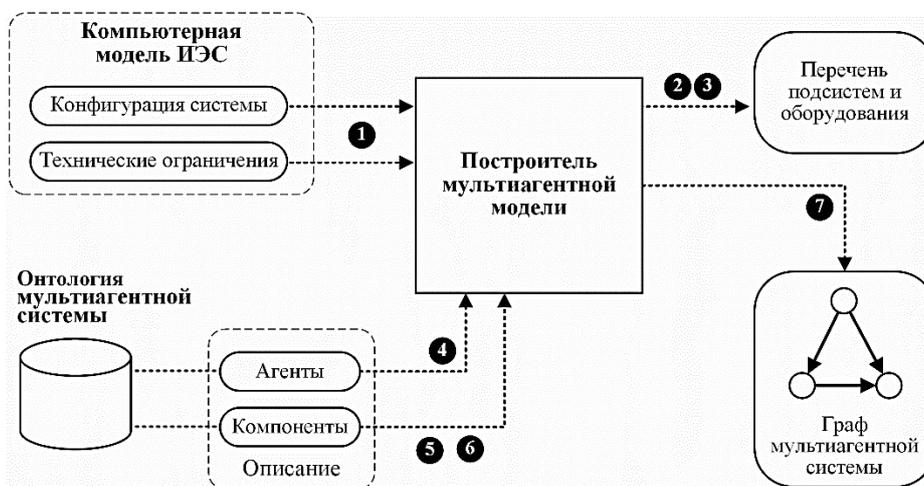


Рисунок 6 – Построение графа мультиагентной системы

На втором этапе выполняется автоматизированное построение МАС при проектировании ИЭС и решаются следующие подзадачи.

- 1) подключение агентов к формируемой МАС.
- 2) подключение программных компонентов, реализующих модели элементов ИЭС.
- 3) подключение программных компонентов, реализующих методы.
- 4) формирование структур данных для организации вычислительного процесса.
- 5) формирование среды, в которой функционируют агенты.

На третьем этапе выполняется автоматизированная настройка агентов на решение задачи моделирования, в ходе которой решаются подзадачи для агентов, которые используют:

- оборудование, устанавливаются связи с необходимыми моделями оборудования.
- методы, устанавливаются связи с необходимыми решателями.

В результате строится МАС, на базе которой решается проектная задача с учётом особенностей конфигурации моделируемой ИЭС, полученной из её компьютерной модели.

3 Методика построения онтологии мультиагентной системы

Построение онтологии включает следующие этапы.

- 1) формальное описание подсистем ИЭС, моделируемых агентами.

Для каждой подсистемы ИЭС формализуется описание отдельных энергетических систем, входящих в состав ИЭС (название, тип, назначение), и подсистем, образующих отдельные энергетические системы (название, тип, оборудование).

- 2) формальное описание агентов и используемых входных и выходных данных.

Для каждого типа агента формализуется описание следующих его характеристик:

- тип системы энергоснабжения;
- подсистема, которую он предназначен моделировать;
- параметры агента;
- характеристики оборудования, образующего моделируемую подсистему;
- входные и выходные данные для решаемой задачи.

Фрагмент онтологии МАС представлен на рисунке 7.

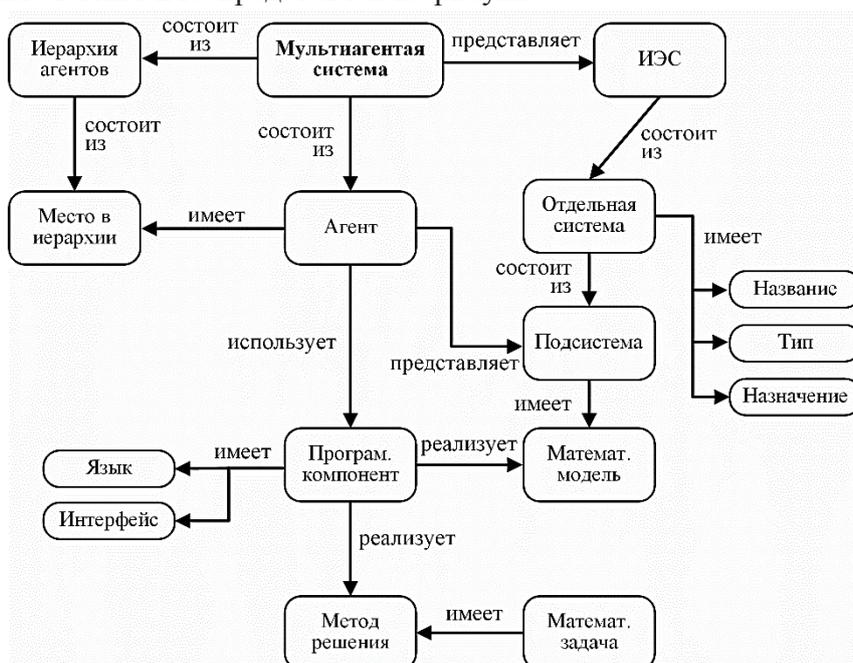


Рисунок 7 – Фрагмент онтологии мультиагентной системы

В таблице 1 представлены основные задачи для типов агентов и приведены некоторые данные, которыми обмениваются агенты.

Таблица 1 - Описание агентов

Типы агентов	Основные задачи	Данные
Агенты обычных потребителей	Собственное энергоснабжение	Нагрузки на электричество, тепло, холод и газ
Агенты активных потребителей	Расчёт собственного энергоснабжения, загрузка своего энергетического оборудования	Цены на энергию, пропускные способности участков сети, мощности источников, нагрузки: электричество, тепло, холод и газ
Агенты источников энергии	Оптимальная загрузка генерирующего оборудования	Цены на энергию, пропускные способности участков сети, мощности оборудования, кап. вложения
Агенты участков сетей	Оптимальная загрузка сетевого оборудования	Пропускные способности и параметры участков сети, капитальные вложения
Сетевые агенты распределённых систем	Рациональное распределение нагрузки между источниками централизованной и распределённой генерации в распределённых системах	Цены на энергию, пропускные способности участков сети, мощности источников, нагрузки активных потребителей, затраты на энергоснабжение
Сетевой агент централизованной системы	Рациональное распределение нагрузки между источниками централизованной и распределённой генерации, и выбор рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределённых источников в ИЭС	Цены на энергию, пропускные способности участков сети, мощности источников, нагрузки обычных и активных потребителей, затраты на энергоснабжение, капитальные вложения

3) Формальное описание связей между агентами в иерархической структуре МАС.

Формализуется описание:

- места в интегрированной системе, которое занимает моделируемая агентом подсистема;
- подсистем и элементов, с которыми связана моделируемая подсистема;
- агентов, моделирующих связанные подсистемы;
- типов сообщений и их структур, пересылаемых между определёнными типами агентов;
- уровней в иерархической МАС;
- принадлежности типа агентов уровням иерархической МАС.

4) Формальное описание используемых программных компонентов, реализующих математические модели, методы и алгоритмы.

Формализуется описание:

- типа внешнего компонента (математическая модель, алгоритм, оптимизатор);
- если тип внешнего компонента – алгоритм или оптимизатор, то для него указывается класс математической задачи и используемый метод решения;
- если тип внешнего компонента – математическая модель, то для него указывается подсистема ИЭС или оборудование, которое он моделирует;
- языка программирования, на котором выполнена реализация;
- интерфейса доступа к внешнему компоненту;
- форматов входных и выходных данных для внешних программных компонентов.

5) Формальное описание связей между агентами и программными компонентами.

Формализуется описание:

- необходимости использования внешних программных компонентов агентом;
- типа используемого внешнего программного компонента;
- названия программного компонента;
- метода доступа к программному компоненту.

Онтология МАС реализуется на базе предметно-ориентированного языка, основанного на языке XML. Необходимость разработки этого языка вызвана тем, что онтология имеет прикладное назначение и предназначена для применения в автоматизации построения МАС.

4 Пример применения

Описанный подход применён при автоматизированном построении МАС для решения задачи проектирования на примере тестовой схемы ИЭС.

На первом этапе выполнено формирование структур данных, необходимых для автоматизированного построения МАС и включающих описание конфигурации ИЭС, её подсистем (систем электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения), оборудования подсистем, агентов, моделей элементов ИЭС и методов. На основе этих структур данных построен граф МАС.

На втором этапе в автоматизированном режиме построена МАС (рисунок 8).

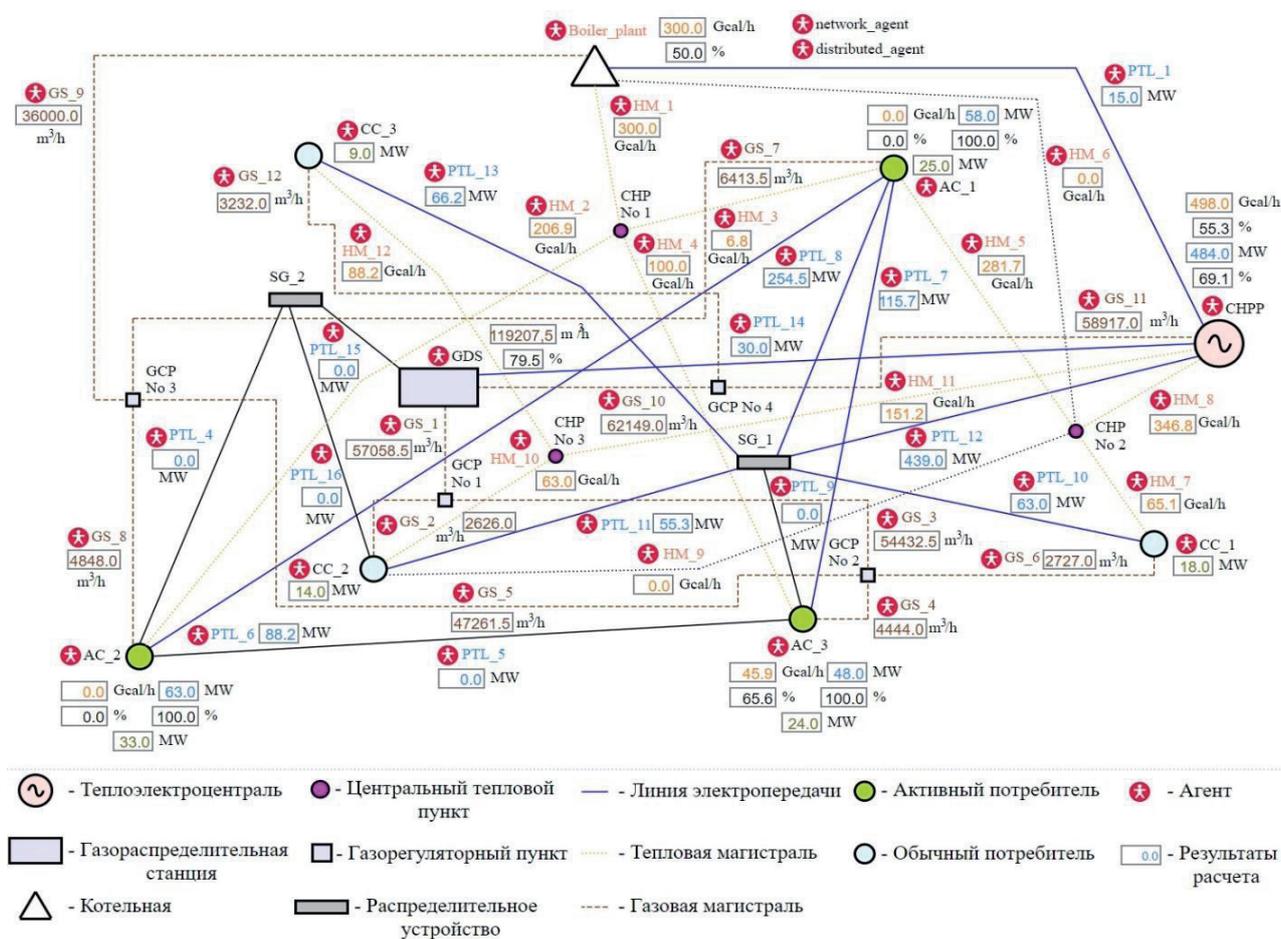


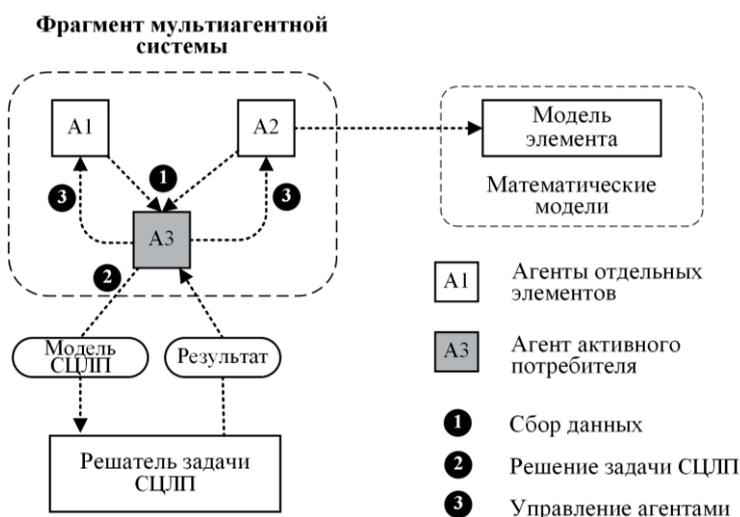
Рисунок 8 – Графическое представление построенной мультиагентной системы

Общее количество агентов 49, из них: 3 агента обычных потребителей; 3 агента активных потребителей; 3 агента централизованных источников энергии; 38 агентов участков сетей, включая 14 линий электропередачи, 12 тепловых магистралей и 12 газовых магистралей; 1 сетевой агент распределённой системы; 1 сетевой агент централизованной системы.

На третьем этапе выполнена автоматизированная настройка подключённых к МАС агентов на использование необходимых моделей оборудования (источников, участков сетей, систем энергопотребления) и решателей оптимизационных задач.

В процессе проведения мультиагентного моделирования выполняется решение задачи проектирования ИЭС путём взаимодействия агентов. При этом в зависимости от полученного агентом сообщения и логики его поведения может потребоваться выполнение оптимизационных расчётов, результаты которых используются для принятия решений. В этом случае выполняется вызов необходимого решателя, соответствующего математическому классу решаемой задачи. Выполнена автоматизированная настройка МАС на использование необходимых моделей оборудования и решателей оптимизационных задач.

Например, на рисунке 9 представлен фрагмент, отражающий схему взаимодействия агентов и использования программных компонентов. Агент А2 вызывает для проведения расчётов программные компоненты, реализующие модели элементов ИЭС. Агент А3, получив необходимую информацию от агентов А1 и А2, решает задачу управления своим энергопотреблением и рациональной загрузкой собственных энергоисточников. В данном случае решается задача смешанного целочисленного линейного программирования (СЦЛП) с использованием решателя.



Заключение

Мультиагентный подход к проектированию ИЭС позволяет найти решение задачи путём взаимодействия множества агентов. Автоматизация построения МАС позволяет устранить трудоёмкие этапы её формирования и настройки на особенности моделируемой ИЭС. В статье предложен подход к автоматизации построения МАС для проектирования ИЭС с применением онтологии, который включает следующие составляющие: архитектуру единой программной платформы; методику построения онтологии МАС; методику автоматизированного построения МАС для проведения вычислений при проектировании ИЭС. С использованием этого подхода выполнено построение МАС для тестовой схемы ИЭС.

Список источников

- [1] **Воропай Н.И., Стенников В.А.** Интегрированные интеллектуальные энергетические системы. *Известия РАН. Энергетика*. 2014. №1. С.64–73.
- [2] **Барахтенко Е.А., Воропай Н.И., Соколов Д.В.** Современное состояние исследований в области управления интегрированными энергетическими системами. *Известия РАН. Энергетика*. 2021, №4, с.4–23. DOI: 10.31857/S0002331021040026.
- [3] **Khan M.W., Wang J., Xiong L., Ma M.** Modelling and optimal management of distributed microgrid using multi-agent systems. *Sustain. Cities. Soc.*, 2018. Vol.41, 154–169. DOI: 10.1016/j.scs.2018.05.018.
- [4] **Li S., Hu W., Cao D., Chen Z., Huang Q., Blaabjerg F. et al.** Physics-model-free heat-electricity energy management of multiple microgrids based on surrogate model-enabled multi-agent deep reinforcement learning. *Applied Energy*, 2023. Vol.346, 121359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121359.

- [5] **Zhang B., Hu W., Ghias A.M.Y.M., Xu X., Chen Z.** Two-timescale autonomous energy management strategy based on multi-agent deep reinforcement learning approach for residential multicarrier energy system. *Applied Energy*, 2023. Vol. 351, 121777. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121777.
- [6] **Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou B.** Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*, 2022. Vol. 309, 118487. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.118487.
- [7] **Silva da A.R.** Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model. *Comput. Lang. Syst. Struct.*, 2015. Vol.43. P.139–155. DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
- [8] **de Araújo Silva E., Valentin E., Carvalho J.R.H., da Silva Barreto R.** A survey of Model Driven Engineering in robotics. *Journal of Computer Languages*, 2021. Vol.62, 101021. DOI: 10.1016/j.cola.2020.101021.
- [9] **Wiebe A.J., Chan C.W.** Ontology driven software engineering. The 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Montreal, QC, Canada, 29 April – 02 May 2012. IEEE. 2012. DOI: 10.1109/CCECE.2012.6334938.
- [10] **Pan J.Z., Staab S., Afmann U., Ebert J., Zhao Y.** Ontology-Driven Software Development, Springer Berlin, Heidelberg. 2013. 338 p. DOI: 10.1007/978-3-642-31226-7.
- [11] **Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Mayorov G.** Principles of Building Digital Twins to Design Integrated Energy Systems. *Computation*, 2022. Vol.10, 222. DOI: 10.3390/computation10120222.
- [12] **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.
- [13] **Коголовский М.Р., Калинин Л.А.** Концептуальное и онтологическое моделирование в информационных системах. *Программирование*. 2009. Т.35. №5. С.3-25. EDN: LMAHLD.
- [14] **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.
- [15] **Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б.** Онтологический подход к разработке системы поддержки принятия решений на нефтегазодобывающем предприятии. *Вестник НГУ, серия «Информационные технологии»*. 2012. Т.10, №1. С.121-129.
- [16] **Ланшин В.** Онтологии в компьютерных системах. Издательство Научный мир, 2020. 224 с.
- [17] **Booshehri M., Emele L., Flugel S., Forster H., Frey J., Frey U. et al.** Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis. *Energy and AI*, 2021. Vol.5. 100074. DOI: 10.1016/j.egyai.2021.100074.
- [18] **Devanand A., Karmakar G., Krdzavac N., Rigo-Mariani R., Eddy Y.S., Karimi, I.A. Kraft M.** OntoPowSys: A Power System Ontology for Cross Domain Interactions in an Eco Industrial Park. *Energy and AI*, 2020. Vol.1. 100008. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100008.
- [19] **Santos G., Pinto T., Vale Z., Praca I., Morais H.** Electricity markets ontology to support MASCEM’s simulations. *International conference on practical applications of agents and multi-agent systems*, Springer, 2016. P.393–404.
- [20] **Непша Ф.С., Андриевский А.А., Красильников М.И.** Онтология как основа для создания цифровых двойников объектов управления интеллектуальной распределённой энергетики. *Автоматизация в промышленности*. 2021. №1. С.27–33. DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04.
- [21] **Wu J., Orlandi F., AlSkaif T., O’Sullivan D., Dev S.** Ontology Modeling for Decentralized Household Energy Systems. 2021 *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Vaasa, Finland, 2021. P.1–6. DOI: 10.1109/SEST50973.2021.9543327.
- [22] **Массель Л.В.** Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения. *Онтология проектирования*. 2016. Т.6, №2(20). С.149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
- [23] **Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И.** Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №1(23). С.66–76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
- [24] **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.
- [25] **Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В.** Применение онтологий при реализации концепции модельно-управляемой разработки программного обеспечения для проектирования теплоснабжающих систем. *Онтология проектирования*. 2014. №4(14). С.54–68.
- [26] **Gonzalez-Perez C.** How Ontologies Can Help in Software Engineering. *Lecture Notes in Computer Science*, 2017. Vol.10223. DOI: 10.1007/978-3-319-60074-1_2.

Сведения об авторах

Баракхтенко Евгений Алексеевич, 1982 г. рождения. Окончил Иркутский государственный технический университет (2005), к.т.н. (2011), учёный секретарь ИСЭМ СО РАН. Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых учёных (2016). Область научных интересов: математические модели и методы управления развитием трубопроводных систем энергетики и интегрированных энергетических систем, цифровое проектирование. Автор и соавтор более 150 научных работ. Author ID (РИНЦ): 670523; Author ID (Scopus): 55229371000; Researcher ID (WoS): Q-7173-2016. barakhtenko@isem.irk.ru. ✉



Соколов Дмитрий Витальевич, 1984 г. рождения. Окончил Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского (2008), к.т.н. (2013), с.н.с. ИСЭМ СО РАН. Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых учёных (2016). В списке научных трудов более 100 работ в области разработки алгоритмов оптимизации трубопроводных систем и автоматизации программирования. Author ID (РИНЦ): 710020; Author ID (Scopus): 57190607698; Researcher ID (WoS): K-6737-2018. sokolov_dv@isem.irk.ru.

Майоров Глеб Сергеевич, 1994 г. рождения. Окончил Иркутский национальный исследовательский технический университет (2018), к.т.н. (2024), н.с. ИСЭМ СО РАН. Область научных интересов: интегрированные энергетические системы и методы для решения задач их проектирования, мультиагентный подход и его применение. В списке научных трудов более 40 работ. Author ID (РИНЦ): 1001072; Author ID (Scopus): 57211071672; ORCID: 0000-0002-7405-1965. mayorovgs@isem.irk.ru.



Поступила в редакцию 20.06.2025, после рецензирования 23.10.2025. Принята к публикации 2.12.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-74-86

Automated construction of a multi-agent system for integrated energy system design

© 2026, E.A. Barakhtenko ✉, D.V. Sokolov, G.S. Mayorov

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract

This article presents an approach to automating the construction of a multi-agent system based on an ontology that describes system agents as well as software components implementing methods, algorithms, and mathematical models of subsystems and individual elements. The proposed approach is based on the concepts of model-driven development and ontology-based software development, adapted to the specific features of multi-agent modeling for integrated energy systems. Within the considered problem, information is divided into reusable knowledge and data describing its context. Software agents are designed for repeated use and remain independent of specific equipment models. During the construction of a multi-agent system, these agents are combined with mathematical models of integrated energy systems and problem solving methods. The article describes the architecture of a unified software platform, a methodology for developing a multi-agent system ontology, and a methodology for the automated construction of a multi-agent system to perform computational analyses in the design of integrated energy systems. The results obtained from applying the proposed approach to the design of an integrated energy system are also presented.

Keywords: ontology, multi-agent system, modeling, automation, integrated energy system, design.

For citation: Barakhtenko EA, Sokolov DV, Mayorov GS. Automated construction of a multi-agent system for integrated energy system design [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 74-86. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-74-86.

Financial Support: The research was supported of Russian Science Foundation (Grant number no. 24-29-00823).

Authors' contribution: Barakhtenko E.A. – conceptualization, methodological foundations of the study; Sokolov D.V. – methodology, research; Mayorov G.S. – data preparation, results analysis.

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

List of figures and table

- Figure 1 – Components of integrated energy systems (IES) design
- Figure 2 – Structure of a multi-agent system
- Figure 3 – Simplified diagram of the proposed approach
- Figure 4 – Structure of the multi-agent system ontology
- Figure 5 – Architecture of the software platform
- Figure 6 – Construction of the multi-agent system graph
- Figure 7 – Fragment of the multi-agent system ontology
- Figure 8 – Graphical representation of the constructed multi-agent system
- Figure 9 – Example of organizing computations during agent interaction
- Table 1 – Description of agents

References

- [1] Voropai NI, Stennikov VA. Integrated smart energy systems [In Russian]. *Izvestiya RAS. Energetika*. 2014; 1: 64–73.
- [2] Barakhtenko EA, Voropai NI, Sokolov DV. Current state of research in the field of integrated energy systems control [In Russian]. *Izvestiya RAS. Energetika*. 2021; 4: 4–23. DOI: 10.31857/S0002331021040026.
- [3] Khan MW, Wang J, Xiong L, Ma M. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multi-agent systems. *Sustain. Cities. Soc.* 2018; 41: 154–169. DOI: 10.1016/j.scs.2018.05.018.
- [4] Li S, Hu W, Cao D, Chen Z, Huang Q, Blaabjerg F. et al. Physics-model-free heat-electricity energy management of multiple microgrids based on surrogate model-enabled multi-agent deep reinforcement learning. *Applied Energy*. 2023; 346: 121359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121359.
- [5] Zhang B, Hu W, Ghias AMYM, Xu X, Chen Z. Two-timescale autonomous energy management strategy based on multi-agent deep reinforcement learning approach for residential multicarrier energy system. *Applied Energy*. 2023; 351: 121777. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121777.
- [6] Stennikov V, Barakhtenko E, Mayorov G, Sokolov D, Zhou B. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*. 2022; 309(118487). DOI:10.1016/j.apenergy.2021.118487.
- [7] Silva da AR. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model. *Comput. Lang. Syst. Struct.* 2015; 43: 139–155. DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
- [8] de Araújo Silva E, Valentin E, Carvalho JRH, da Silva Barreto R. A survey of Model Driven Engineering in robotics. *Journal of Computer Languages*. 2021; 62: 101021. DOI: 10.1016/j.cola.2020.101021.
- [9] Wiebe AJ, Chan CW. Ontology driven software engineering. *Proceedings of the 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Montreal, QC, Canada, 29 April – 02 May 2012*. IEEE. 2012. DOI: 10.1109/CCECE.2012.6334938.
- [10] Pan JZ, Staab S, Afmann U, Ebert J, Zhao Y. *Ontology-Driven Software Development*, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-31226-7.
- [11] Stennikov V, Barakhtenko E, Sokolov D, Mayorov G. Principles of Building Digital Twins to Design Integrated Energy Systems. *Computation*. 2022; 10: 222. DOI: 10.3390/computation10120222.
- [12] 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.
- [13] Kogalovskij MR, Kalinichenko LA. Conceptual and ontological modeling in information systems. *Programming*. 2009; 35(5): 3-25.
- [14] Borgest N.M. Systems and ontological analyses: similarities and differences between the concepts [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(1): 9–28. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28.
- [15] Zagorulko YuA, Zagorulko GB. Ontological approach to development of the decision support system for oil-and-gas production enterprise [In Russian]. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2012; 10(1): 121–129.
- [16] Lapshin V. Ontologies in computer systems [In Russian]. *Publishing house Scientific world*, 2020. 224 p.

- [17] **Booshehri M, Emele L, Flugel S, Forster H, Frey J, Frey U. et al.** Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis. *Energy and AI*. 2021; 5: 100074. DOI: 10.1016/j.egyai.2021.100074.
- [18] **Devanand A, Karmakar G, Krdzavac N, Rigo-Mariani R, Eddy YS, Karimi IA, Kraft M.** OntoPowSys: A Power System Ontology for Cross Domain Interactions in an Eco Industrial Park. *Energy and AI*. 2020; 1: 100008. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100008.
- [19] **Santos G, Pinto T, Vale Z, Praca I, Morais H.** Electricity markets ontology to support MASCEM's simulations. *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, Springer*. 2016. P.393–404.
- [20] **Nepsha FS, Andrievsky AA, Krasilnikov MI.** Ontology as a basis for creating digital twins of control objects in intelligent distributed energy systems [In Russian]. *Automation in industry*. 2021; 1: 27–33. DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04.
- [21] **Wu J, Orlandi F, AISkaif T, O'Sullivan D, Dev S.** Ontology Modeling for Decentralized Household Energy Systems. *2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Vaasa, Finland*. 2021: 1–6. DOI: 10.1109/SEST50973.2021.9543327.
- [22] **Massel LV.** Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(2): 149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
- [23] **Massel LV, Vorozhtsova TN, Pjatkova NI.** Ontology engineering to support strategic decision-making in the energy sector [In Russian]. *Ontology of designing*. 2017; 7(1): 66–76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
- [24] **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.
- [25] **Stennikov VA, Barakhtenko EA, Sokolov DV.** Usage of ontologies in the implementation of the concept of model-driven engineering for the design of heat supply systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2014; 4(14): 54–68.
- [26] **Gonzalez-Perez C.** How Ontologies Can Help in Software Engineering. *Lecture Notes in Computer Science*. 2017; 10223. DOI: 10.1007/978-3-319-60074-1_2.
-

About the authors

Evgeny Alekseevich Barakhtenko (b. 1982) graduated from Irkutsk State Technical University in 2005, PhD in Engineering (2011). Scientific Secretary at the Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Laureate of the Government of the Russian Federation Prize in Science and Technology for Young Scientists (2016). His scientific interests include mathematical models and methods for managing the development of pipeline energy systems and integrated energy systems, as well as digital design. He is the author and a co-author of more than 150 scientific papers. Author ID (RSCI): 670523; Author ID (Scopus): 55229371000; Researcher ID (WoS): Q-7173-2016. barakhtenko@isem.irk.ru. ✉

Dmitry Vitalyevich Sokolov (b. 1984) graduated from Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky (Irkutsk, Russia) in 2008, PhD in Engineering (2013), Senior Researcher at Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Laureate of the Government of the Russian Federation Prize in Science and Technology for Young Scientists (2016). The list of scientific works includes more than 100 works in the field of optimisation algorithms development for pipeline systems and programming automation. Author ID (RSCI): 710020; Author ID (Scopus): 57190607698; Researcher ID (WoS): K-6737-2018. sokolov_dv@isem.irk.ru.

Gleb Sergeevich Mayorov (b. 1994) graduated from Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) in 2018, PhD in Engineering (2024), Researcher at the Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests include integrated energy systems and methods for solving their design problems, as well as multi-agent approach and its application. The list of scientific works includes more than 40 works. Author ID (RSCI): 1001072; Author ID (Scopus): 57211071672; ORCID: 0000-0002-7405-1965. mayorovgs@isem.irk.ru.

Received June 20, 2025. Revised October 22, 2025. Accepted December 2, 2025.

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 001.92

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-87-97

**Точечное исчисление как онтологическая основа представления геометрических объектов в проектировании**

© 2026, А.А. Бездитный

*Мелитопольский государственный университет, Мелитополь, Россия**Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия***Аннотация**

В инженерном проектировании выбор способа представления геометрии во многом определяет эффективность разрабатываемой системы. Традиционные методы – граничные представления, конструктивная твердотельная геометрия и функциональные описания – основные средства автоматизации проектирования, каждый из которых отражает отдельный аспект объекта, поэтому требуется согласование их описаний. Это приводит к избыточности и усложнению процедур преобразования данных, ограничивает возможности моделирования объектов со сложной внутренней структурой, а также снижает универсальность цифровых моделей. В работе рассматривается точечное исчисление как иная концепция представления геометрических объектов. В точечном исчислении все геометрические объекты рассматриваются как упорядоченные множества точек, которые определяются с помощью локальных и глобальных симплексов. Применительно к твердотельному моделированию это позволяет описывать одновременно граничную форму и внутреннее пространство объекта. Граничная модель в этом случае интерпретируется как частный случай такого подхода, что обеспечивает совместимость с существующими системами автоматизации проектирования. Использование точечного исчисления устраняет разделение между геометрией и функциональными свойствами, позволяя моделировать анизотропные структуры, внутренние каналы и вариативные материалы в едином параметрическом пространстве. Применение точечного исчисления для описания проектных объектов позволяет обеспечить целостность цифровых моделей и снизить когнитивную нагрузку при использовании их различных представлений. Перспективы применения подхода связаны с цифровыми двойниками, аддитивным производством и генеративным дизайном, где требуется совмещение гибкости, универсальности и формальной строгости.

Ключевые слова: *точечное исчисление, проектирование, геометрическое моделирование, граничное представление, функциональное представление, конструктивная твердотельная геометрия.*

Цитирование: *Бездитный А.А. Точечное исчисление как онтологическая основа представления геометрических объектов в проектировании. Онтология проектирования. 2026. Т.16, №1(59). С.87-97. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-87-97.*

Финансирование: *Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-21-00003, <https://rscf.ru/project/25-21-00003/>.*

Конфликт интересов: *автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

Введение

Формирование современных методов представления геометрии объектов связано с развитием систем автоматизированного проектирования (САПР) во второй половине XX века. Граничные модели (*Boundary representation, B-rep*) стали удобным средством описания сложных форм, опираясь на представление объекта через его поверхность [1, 2]. Булевы конструкции в конструктивной твердотельной геометрии (*Constructive Solid Geometry, CSG*) обеспечили компактный способ построения моделей из элементарных примитивов, что ока-

залось удобным для автоматизации ряда операций. Для функциональных представлений (*Function Representation, F-rep*) используется универсальный математический аппарат, позволяющий описывать не только форму, но и физико-математические свойства объектов [3]. Ни один из подходов не стал универсальным и в практических системах часто используется в комбинации с другими, что указывает на концептуальную неполноту названных методов.

В одной САПР приходится поддерживать несколько представлений одновременно [4, 5]: граничное – для визуализации и контроля; конструктивную твердотельную геометрию – для построения сложных форм; функциональное – для анализа физических свойств. Переход между этими представлениями сопровождается преобразованиями, которые могут не всегда точно отражать исходный объект и приводить к потерям информации. Это означает, что один и тот же объект существует в САПР в нескольких несогласованных описаниях, что противоречит требованию целостности проектного представления.

В современном проектировании всё чаще на первый план выходят задачи, где объект должен быть не только геометрически правильным, но и функционально насыщенным.

Цифровые двойники (ЦД). Для ЦД объекта требуется модель, которая одновременно описывает геометрию, материалы, внутреннюю структуру и поведение в условиях эксплуатации. Традиционные методы представляют эти свойства разрозненно, и онтологически объект проектирования разделён на несколько несвязанных моделей, описывающих форму, свойства и поведение, что повышает риск ошибок при их последующем сопряжении.

Аддитивные технологии. Проектирование для 3D-печати включает выполнение требований к внутренней структуре объекта: пористость, решётчатые заполнения, переменная толщина стенок. Методы граничного представления и *CSG* плохо подходят для описания таких объектов, так как они оперируют в основном замкнутыми оболочками. *F-rep* позволяет описывать сложные внутренние структуры, но в практике САПР остаётся трудным и малопонятным пользователям.

Генеративный дизайн и оптимизация. Генеративные системы формируют новые формы на основе алгоритмов оптимизации или бионического копирования. Полученные результаты требуют адаптации, что приводит к расслоению проектного представления: модель существует как вычислительный результат, как геометрическая оболочка и как объект для анализа, но не как единая сущность.

Можно отметить отсутствие в современном проектировании универсального языка, который позволил бы описывать объект целостно – его форму, структуру и функции. Точечное исчисление (ТИ) можно рассматривать как один из способов преодоления обозначенных ограничений: объект задаётся не через поверхность или комбинацию примитивов, а через упорядоченное множество точек, объединённых в симплексы. Каждая точка может содержать информацию не только о геометрическом положении, но и о параметрах внутренней структуры, материальных свойствах и функциональных характеристиках.

Единство представления. В ТИ граница и внутреннее пространство описываются в рамках одного и того же параметрического аппарата. Граничная модель возникает как частный случай – через выделение подмножества параметров, удовлетворяющих условиям границы: поверхность является двумерным сечением трёхмерной области параметров, которая встроена в общее описание объекта.

Интеграция параметров. В ТИ каждая вычисленная точка модели может нести локальные данные – например, об анизотропии, пористости, ориентации волокон или других физических свойствах. Объект в ТИ является не только геометрическим, но и функциональным: локальные свойства закрепляются за текущими точками параметрического пространства.

Совместимость и эволюция. Поскольку в ТИ существует возможность выхода на *B-rep* при условии изменения значений параметров, появляется возможность плавного перехода: существующие модели можно включать в новую САПР без перестройки. Это делает ТИ средством эволюционного расширения модели проектирования.

Цель работы – показать, что использование ТИ позволяет преодолеть ограничения традиционных методов, обеспечивает целостность цифровых моделей и позволяет сформировать новый уровень моделирования объектов в проектировании.

1 Традиционные представления геометрии в проектировании

B-rep является основой большинства современных САПР. Объект описывается через поверхность, которая задаётся в виде совокупности граней, рёбер и вершин. Такой подход удобен для визуализации и геометрических операций: он обеспечивает отображение сложных форм и позволяет проводить пересечения, объединения и другие операции с оболочками. Однако у *B-rep* есть ограничения [1]. Во-первых, в *B-rep* отсутствует информация о внутренней структуре объекта. Во-вторых, любая ошибка в топологии разрушает целостность модели, что приводит к сбоям в вычислительных процедурах.

CSG допускает значительные вариации базовых примитивов, производящих операций и их описаний. Булевы методы моделирования, применяемые в *CSG*, строятся на комбинировании элементарных примитивов при помощи логических операций объединения, пересечения и разности. Этот подход удобен для автоматизации конструкторских процедур: сложные формы можно собрать из относительно простых блоков. Вместе с тем, *CSG* накладывает ограничения на вариативность формы. В общем случае *CSG* не позволяет получить единственное описание геометрии объекта. Для объектов с плавными очертаниями требуется чрезмерное усложнение конструкций. Кроме того, результирующая модель существует не как самостоятельная сущность, а как дерево операций: объект задаётся процедурой построения и не обладает описанием, объединяющим границу и внутреннюю структуру.

F-rep основаны на задании объекта через функцию $F(x,y,z)$, которая определяет принадлежность точки пространству модели [3, 6]. Этот подход универсален: он позволяет описывать не только форму, но и внутренние параметры объекта. *F-rep* используется в задачах анализа и для построения объектов со сложной структурой. Тем не менее, *F-rep* остаётся малопрактичным для применения в САПР. Это связано с интерпретацией и управлением моделью: пользователю сложно работать с функцией, а вычислительные процедуры требуют значительных ресурсов. *F-rep* формирует абстрактный уровень описания, плохо связанный с инженерной практикой. Объект задаётся через неравенство $F(x,y,z) \geq 0$, что является математически строгим и универсальным описанием, однако конструктором оно плохо интерпретируется. Там, где в *B-rep* есть наглядная грань, а в *CSG* – геометрический примитив, в *F-rep* есть формула, которую нужно анализировать и контролировать. Описание даже простых тел требует нетривиальных выражений, которых, при проектировании реальных объектов, часто приходится комбинировать десятки или сотни. Это превращает модель в громоздкое аналитическое выражение, которое трудно изменять и отлаживать. Для создания сложных геометрических объектов (с отверстиями, решётчатыми структурами или переменной толщиной) требуется накладывать последовательные операции: пересечения функций, ограничения областей, *R*-функций [7]. Каждая такая операция увеличивает сложность итоговой формулы.

Итоговое сравнение. Рассмотренные подходы представляют разные уровни описания объекта, но не являются универсальными: *B-rep* ограничивается оболочкой; *CSG* оперирует деревом операций; *F-rep* задаёт объект функционально и остаётся оторванным от инженерной практики. В результате объект существует в разных представлениях, которые плохо согласованы друг с другом. Это затрудняет объединение моделей, усложняет поддержку ЦД и снижает прозрачность проектных решений.

2 Концептуальная основа представления объекта в точечном исчислении

В ТИ используется набор базовых сущностей и отношений, которые позволяют обеспечить целостность представления объекта [8]:

- *точка* – минимальный элемент, обладающий координатами и атрибутами (геометрическими, материальными, функциональными);
- *параметр* – переменная, управляющая положением и характеристиками точек в симплексе;

- *симплекс* – локальная конструктивная структура, объединяющая точки в иерархии размерностей (отрезок, треугольник, тетраэдр);
- *функция* – аналитическое выражение, задающее распределение точек, их свойства или их изменения;
- *маска* – логическое условие, определяющее принадлежность точки множеству и обеспечивающее выполнение операций объединения, пересечения и разности.

Структурные отношения в ТИ. Вложенность понимается как иерархическое наращивание размерности (отрезок → поверхность → объём), при котором каждая новая модель формируется на основе симплексов большей размерности, а все точки определяются в глобальных координатах. Параметризация фиксирует зависимость координат и свойств точек от выбранной системы параметров и обеспечивает переносимость описания между задачами. Маска задаёт допустимые области параметрического пространства, позволяет формировать внутренние структуры и выполнять логические операции, не разрушая схему объекта. На уровне универсализации это означает, что представление проектируемого объекта опирается на точку и симплекс, как носители формы и структуры, а операции проектных процессов выражаются через параметризацию и маскирование, как язык построения, редактирования и оптимизации. Этим объясняется роль ТИ как универсального концептуального уровня, связывающего геометрическое моделирование [9], анализ и производство. Обобщённое сравнение подходов к геометрическому моделированию приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики подходов к представлению геометрии в проектировании

Подход	Базовые сущности	Структурные отношения	Уровень универсализации	Ограничения
<i>B-rep</i>	Вершины, рёбра, грани	Топологическая связность	Только оболочка объекта	Нет информации о внутренней структуре; зависимость от корректности топологии
<i>CSG</i>	Примитивы (куб, сфера, цилиндр), дерево операций	Булевы связи (\wedge , \vee , \neg)	Конструктивное дерево	Ограниченная выразительность для плавных форм; модель существует как процедура
<i>F-rep</i>	Глобальная функция $F(x,y,z)$	Логические комбинации функций, неравенства	Универсальное описание формы и свойств	Сложность формул и вычислений, слабая интерпретируемость
ТИ	Точки, симплексы, параметры, функции, маски (условия)	Вложенность размерностей, параметризация, маскирование	Единый принцип описания: граница и внутреннее пространство, геометрия и свойства	Необходимость параметризации и новых интерфейсов, рост числа точек при высокой детализации

В прикладной геометрии описание геометрических объектов через множества точек получило развитие в виде аппарата аффинных инвариантов и параметрических методов описания кривых и поверхностей [10]. Предложены способы параметрического описания кривых и поверхностей [8, 9], алгоритмы построения аффинно-инвариантных моделей [10, 11], методы аппроксимации [12] и геометрической визуализации [13]. Современное развитие ТИ связано с переходом от описания поверхностей к моделированию трёхмерных тел, включая объекты с внутренней структурой и переменными параметрами [14]. ТИ можно рассматривать как параметрическую систему, где каждая точка описывается векторным уравнением, включающим базовые точки симплекса и набор управляющих функций. Форма объекта задаётся конструктивно через опорные точки и параметры, что обеспечивает читаемость и понятность для пользователя [15]. ТИ даёт возможность в одном и том же формализме описывать:

- границы (как частные случаи);
- внутренние структуры (через распределение точек);
- анизотропные свойства (через использование различных параметров в уравнениях);
- вариативные формы и объекты с текущим сечением;
- многосвязные конструкции и самопересекающиеся поверхности проявляются как локальное уплотнение точек, которое, при необходимости, можно устранить.

В результате проектировщик работает с единой конструктивной схемой объекта.

Совместимость со средствами САПР обеспечивается тем, что из модели ТИ однозначно извлекается граничное представление. Это даёт возможность подключать ТИ к системам моделирования без перестройки программных ядер – достаточно выполнить преобразования на уровне форматов и интерфейсов. ТИ можно внедрять постепенно: от поддержки отдельных операций (например, моделирование внутренних каналов [16]) до построения целостных проектных платформ.

ТИ имеет ряд ограничений, которые важно учитывать при его внедрении в проектную практику.

- Построение модели в ТИ требует выбора опорных точек и функций параметров. Для простых объектов это выполняется легко, но для сложных конструкций параметризация может стать нетривиальной задачей. Ошибочный выбор приводит к усложнению уравнений или избыточности описания.
- ТИ во многом сохраняет аналитический характер. Для пользователей, привыкших мыслить телами и их оболочками, работа с симплексами и параметрическими функциями может быть менее интуитивной, чем в *B-rep* или *CSG*. Это требует обучения пользователей и разработки специальных интерфейсов.
- При высокой детализации или сложной внутренней структуре количество точек растёт, что повышает вычислительные затраты на визуализацию и анализ. Необходимы оптимизационные алгоритмы и иерархические структуры данных.
- ТИ не интегрировано в используемые САПР. Это снижает возможность его массового применения и требует разработки программных средств, обеспечивающих совместимость с существующими стандартами.
- В ТИ самопересечение не разрушает модель, но в инженерной практике такие случаи могут вызывать сложности при переходе к другим форматам (например, при экспорте в другие САПР). Это требует дополнительных инструментов контроля.

Таким образом, ТИ не решает все проблемы, присущие традиционным методам описания геометрических моделей, а для практического применения необходима дальнейшая разработка инструментов параметризации, оптимизации и пользовательских интерфейсов.

3 Совместимость с САПР и применение

В традиционных САПР *B-rep* является доминирующим форматом, обеспечивая хранение и обработку моделей. Вместо традиционной булевой логики, где требуется вычисление пересечений поверхностей, в ТИ операции объединения, пересечения и вычитания выражаются через параметрические маски [17]. Это позволяет выполнять булевы операции без перестройки топологической структуры, что позволяет снизить вычислительные затраты [18, 19], упростить алгоритмы и повысить устойчивость систем при работе со сложными многосвязными объектами.

Объект в ТИ описывается через параметрическое уравнение, каждая точка определяется набором параметров (u, v, w, \dots) , принадлежащих некоторой области $\Omega \subset \mathbb{R}^3$. Булевы операции в ТИ сводятся к работе не с поверхностями, а с областями параметров, определяющими трёх-параметрическое множество точек.

- *Объединение тел* задаётся как объединение областей допустимых параметров. Если тело 1 существует при $(u, v, w) \in \Omega 1$, а тело 2 при $(u, v, w) \in \Omega 2$, то их объединение соответствует области $\Omega = \Omega 1 \cup \Omega 2$.
- *Пересечение тел* аналогично определяется как $\Omega = \Omega 1 \cap \Omega 2$.
- *Разность тел* формулируется как $\Omega = \Omega 1 \setminus \Omega 2$.

Таким образом, вместо перестройки топологической структуры используется маска области параметров, которая выступает фильтром: она исключает или включает точки, исходя из заданных правил. Например, если объект задаётся параметрами $(u, v, w) \in [0, 1]$, то разность двух тел может быть реализована введением дополнительного условия вида $f(u, v, w) < 0$. Это условие и есть маска: оно отсеивает часть точек и формирует новое тело. Преимущество подхода в том, что все операции выполняются в аналитической форме, без пересчёта поверхностей и без риска разрушения топологии.

Для создания простых геометрических объектов с различными конфигурациями вырезов, отверстий и полостей в ТИ существует возможность получения их аналитического описания на основе геометрической схемы [17]. Наличие библиотеки типовых уравнений позволяет сократить время проектирования. Таким образом, формируется «каталог прототипов», который позволяет проектировщику быстро переходить от простых геометрических схем к сложным телам с внутренней структурой, не теряя универсальности и целостности описания.

В ТИ возможно комбинирование объектов на основе геометрических схем – структур, задающих взаимосвязи между симплексами и параметрами. Такой способ объединения тел в одном или нескольких симплексах позволяет строить сложные объекты без дерева операций. Для САПР это открывает перспективу упрощения представления сложных моделей: вместо громоздких иерархий можно работать с компактными геометрическими схемами.

Преимуществом ТИ является возможность внедрять его поэтапно и использовать как дополнительный инструмент для моделирования специфических объектов. Постепенно такие модули могут становиться частью общей архитектуры САПР. В перспективе возможны гибридные модели, где часть конструкции описывается средствами *B-rep*, а часть – средствами ТИ, при этом согласование выполняется автоматически. Такая структура фиксирует способ порождения объекта, а не только его итоговую форму. Это делает структуру построения, зависимости параметров и результаты преобразований явно прослеживаемыми, что важно в условиях интеграции проектирования, анализа и производства.

В ТИ внутренние характеристики могут вводиться так же, как и граничные. Это открывает возможность моделирования:

- анизотропных материалов;
- объектов с полостями и каналами, включая их разветвлённые структуры;
- решётчатых и ячеистых структур, востребованных в аддитивных технологиях;
- оболочек переменной толщины, которые трудно описывать в *B-rep* без усложнения топологии.

В качестве примеров можно привести:

- канал с переменным сечением описывается единым уравнением с текущим сечением, где профиль изменяется непрерывно вдоль направляющей [16];
- анизотропный материал (локальные параметры точек могут включать вектор направления волокон или коэффициенты анизотропии, т.е. геометрия и материал описываются в единой модели);
- ячеистая структура (формулируется как регулярная параметрическая функция).

К перспективным направлениям применения ТИ можно отнести:

- ЦД: согласованное описание внешних и внутренних характеристик.
- Аддитивное производство: оптимизация заполнения с учётом прочности и веса.
- Биомедицинские приложения: моделирование сосудистых и органических структур.
- Генеративный дизайн: автоматическая генерация форм, включая внутренние параметры.

4 Построение тел в точечном исчислении

Базовым объектом в ТИ является отрезок, который задаётся комбинацией двух точек симплекса. Если точки заданы как A и B , то любая точка отрезка (см. рисунок 1) определяется уравнением (далее ис-



Рисунок 1— Отрезок прямой в точечном исчислении

пользуются сокращения $\bar{t} = (1-t)$, $\bar{v} = (1-v)$, $\bar{w} = (1-w)$, $t, v, w \in [0,1]$:

$$M = At + B\bar{t}. \quad (1)$$

Одномерное тело (рисунок 2а) формируется простым линейным параметрическим законом.

В описании двумерного тела (плоскости) появляется второй параметр v , задающий линейную комбинацию трёх точек (см. рисунок 2б):

$$M = (At + B\bar{t})v + C\bar{v}. \quad (2)$$

В ТИ термин «тело» применяется обобщённо и охватывает объекты разных размерностей. Это позволяет говорить об «одномерных телах» (отрезок), «двумерных телах» (плоскость, поверхность), «трёхмерных телах» (тетраэдр, объёмная модель) и формирует единую основу для их описания.

В описании тетраэдра (или объёмной примитивной формы) добавляется параметр w , что даёт трёхмерное множество точек (см. рисунок 2в).

$$M = [(At + B\bar{t})v + C\bar{v}]w + D\bar{w}. \quad (3)$$

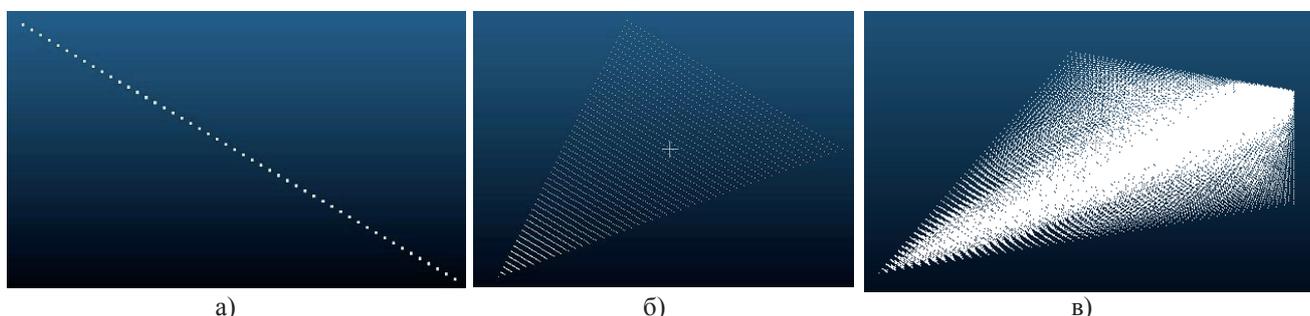


Рисунок 2 – Визуализация: а) отрезка прямой; б) плоскости; в) тела тетраэдра

Описание произвольного сложного тела осуществляется на основе нескольких симплексов, управляющих функций и параметрических масок. Тело описывается единым аналитическим выражением, где ТИ – универсальный механизм перехода от простых геометрических элементов к сложным телам.

5 Управление внутренней структурой тел в точечном исчислении

В ТИ управление внутренней структурой встроено в модель, где каждая точка может содержать как геометрическую, так и дополнительную информацию. Благодаря этому существует несколько способов управления внутренней структурой модели.

- *Параметры симплексов* определяют область, в которой формируется множество точек. Варьируя диапазоны параметров, можно исключать или включать отдельные зоны, формируя полости, отверстия или локальные заполнения.
- *Управляющие функции* вводят зависимость координат точек или их характеристик от дополнительных переменных. Таким образом, можно задавать переменную толщину оболочек, радиус профиля канала, форму локальной деформации и др.
- *Маски параметров* отсеивают часть точек и формирует новое тело.
- *Дополнительные параметры точек*, где каждая точка может быть расширена атрибутами, которые описывают физические или функциональные свойства: плотность материала, направление волокон, коэффициенты анизотропии и др.

Эти способы управления позволяют моделировать объекты от простых оболочек с переменной толщиной до многослойных структур, решётчатых заполнений и анизотропных тел. В ТИ такие объекты создаются не как комбинации нескольких моделей, а формируются внутри одной конструктивной схемы.

Ниже приведены обобщённые конструктивные принципы ТИ, позволяющие формировать как граничные, так и объёмные структуры в едином параметрическом пространстве.

- Используя маски параметров, можно формировать регулярные и нерегулярные сетки внутри тел, задавая логическую функцию для области параметров. Визуализация показывает компактность описания и наглядность формирования структуры.
- Каждая точка множества может содержать дополнительные атрибуты. Это позволяет моделировать материалы с изменяющимися свойствами, включая композиты и бионические структуры.
- Кинематические построения задаются через изменение параметров и управляющих функций в конструктивной схеме.
- Кроме элементарных функций можно использовать более сложные, включая экспоненциальные, логарифмические или фрактальные зависимости.

Управление поведением текущей точки заключается во введении функции вместо параметра. Если вместо линейного параметра в (1) ввести функцию $f(t)$, то форма и внутреннее распределение в моделируемом объекте изменятся:

$$M = Af(t) + B(1 - f(t)).$$

Если $f(t) = t$, то получается равномерное заполнение; если $f(t) = t^2$, точки уплотняются ближе к B ; если $f(t) = \sin(\pi t/2)$, заполняемость становится нелинейной.

Аналогично для поверхностей и тел: заменой параметров t, v, w на функции $f(t), g(v), h(w)$ можно задавать анизотропию и пустоты. Например:

$$M = [(Af(t) + B(1 - f(t)))g(v) + C(1 - g(v))]h(w) + D(1 - h(w)), \text{ где } f(t) = t, g(v) = v^2, h(w) = \sin(\pi w/2).$$

В ТИ управление внутренней структурой – это продолжение уравнений, которыми задаются базовые тела. При помощи этого приёма можно описать:

- пустоты (ограничение параметров);
- анизотропию (разные законы по разным симплексам);
- периодичность (тригонометрические функции);
- фрактальность или иерархию (рекурсивные функции).

Приведённые примеры отражают главную особенность ТИ: возможность в рамках единого аналитического аппарата описывать разнообразные и сложные формы, в которых геометрические и функциональные характеристики объекта определяются совместно.

Заключение

Применение ТИ позволяет создать новый уровень описания проектных объектов. В отличие от методов, где объект существует как оболочка, процедура или аналитическая функция, в ТИ он задаётся как упорядоченное множество точек и локальных симплексов. Такой способ обеспечивает геометрическое представление и согласованное описание внутренних свойств, анизотропии и функциональных характеристик объекта.

В ТИ в качестве первичных сущностей используются точка, симплекс, параметр, функция и параметрическая маска, которые составляют минимально достаточный набор для описания объекта как целого. Отношения вложенности, параметризации и маскирования фиксируют универсальные механизмы построения, благодаря которым устраняется фрагментация объекта. ТИ выполняет роль моста между существующими подходами. Граничное представление, конструктивная твердотельная геометрия и функциональное описание могут быть интерпретированы как частные случаи в рамках единого языка симплексов и параметров.

Практическая перспектива ТИ – в способности использования в ЦД, аддитивном производстве, генеративном дизайне и моделировании метаматериалов, где требуется согласованное описание внешней формы, внутренней структуры и функциональных свойств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] *Shen G.* Analysis of boundary representation model rectification. *Computer-Aided Design*, 33(5), 359–371, 2001. DOI: 10.1145/376957.376975.
- [2] *Raghothama S., Shapiro V.* Consistent updates in dual representation systems. *Computer-Aided Design*, 32(8–9), 463–477, 2000. DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00036-1.
- [3] *Pasko A., Adzhiev V., Sourin A., Savchenko V.* Function representation in geometric modeling: Concepts, implementation and applications. *The Visual Computer*, 1995. 11(8): 429–446. DOI: 10.1007/BF02464333.
- [4] *Liu Z., Zhang J., Zhang X.* Construction collision detection for site entities based on 4-D space-time model. *Qinghua Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2010. Vol.50, No.6. P.820–825. EDN: OCILYP.
- [5] *Zou G., Feng H., Xu F.* A robust direct modeling method for quadric free-form models based on geometry–topology inconsistency tracking. *Engineering with Computers*. 2022. Vol.38, No.4. P.3815–3830. DOI: 10.1007/s00366-021-01416-5.
- [6] *Shapiro V.* Solid modeling. In: Handbook of Computer Aided Geometric Design. *Elsevier*, 2002. P.651–681.
- [7] *Rvachev V.L., Rvachev V.A.* R-functions in boundary value problems in Mechanics. *Applied Mechanics Reviews*, 1995. Vol.48, no 4. P.151–188.
- [8] *Балюба И.Г., Найдыш В.М.* Точечное исчисление. Мелитополь: МГПУ им. Б. Хмельницкого, 2015. 236 с.
- [9] *Голованов Н.Н.* Геометрическое моделирование. М.: ДМК Пресс, 2024. 408 с.
- [10] *Балюба И.Г., Конопацкий Е.В., Бумага А.И.* Точечное исчисление. Макеевка: ДОННАСА, 2020. 244 с.
- [11] *Балюба И.Г., Конопацкий Е.В.* Точечное исчисление. Историческая справка и основополагающие определения / Труды 8-й Международной научной конференции «Физико-техническая информатика», 9–13 ноября 2020 г. Н. Новгород: ННГАСУ, 2020. Ч. 2. С.321–327.
- [12] *Конопацкий Е.В.* Аппроксимация геометрических объектов с помощью дуг кривых, проходящих через наперёд заданные точки. *Информационные технологии*. 2019. Т.25, №1. С.46–52. DOI 10.17587/it.25.46-51.
- [13] *Конопацкий Е.В., Бездитный А.А.* Проблема визуализации твердотельных моделей в виде трёхпараметрического множества точек. *Научная визуализация*. 2022. Т.14, №2. С.49–61. DOI: 10.26583/sv.14.2.05.
- [14] *Бездитный А.А.* Геометрическая теория точечного твердотельного моделирования. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2025. Т.22, № 1. С.15–24. DOI: 10.14489/vkit.2025.01.pp.015-024.
- [15] *Бездитный А.А.* Особенности твердотельного моделирования в точечном исчислении. *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон»*. 2022. №32. С.947–955. DOI: 10.20948/graphicon-2022-947-955.
- [16] *Конопацкий Е.В., Бездитный А.А.* Геометрическое моделирование каналовых поверхностей в точечном исчислении. *Проблемы машиноведения: Материалы VI Международной научно-технической конференции*, Омск, 22–23 марта 2022 года. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С.252–259. DOI: 10.25206/978-5-8149-3453-6-2022-252-259.
- [17] *Бездитный А.А.* Реализация теоретико-множественной операции вычитания в точечном исчислении. *Научная визуализация*. 2025. Т.17, №2. С.97–109. DOI: 10.26583/sv.17.2.07.
- [18] *Конопацкий Е.В.* Геометрические основы параллельных вычислений в системах компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования. *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон"*. 2022. №32. С.816–825. DOI: 10.20948/graphicon-2022-816-825.
- [19] *Конопацкий Е.В., Ротков С.И., Лагунова М.В., Безсолюнов М.В.* Подход к твердотельному моделированию геометрических объектов в точечном исчислении. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.24–33. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33.

Сведения об авторе

Бездитный Андрей Александрович, 1985 г. рождения. Окончил Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского в 2007 г., к.т.н. (2013). Доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий им. профессора В.М. Найдыша Мелитопольского государственного университета. ORCID: 0000-0003-0528-9731. Author ID (РИНЦ): 866637; Author ID (Scopus): 57211268631; Researcher ID: D-7558-2019. bezdytniy@gmail.com



Поступила в редакцию 26.09.2025, после рецензирования 8.12.2025. Принята к публикации 25.12.2025.



Point calculus as an ontological basis for representing geometric objects in design

© 2026, A.A. Bezditnyi

Melitopol State University, Melitopol, Russia

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

In engineering design, the selection of an appropriate method for representing geometry largely determines the effectiveness of the system being developed. Traditional methods—boundary representations, structural solid geometry, and functional descriptions—remain the principal means of design automation; however, each of these methods captures only a specific aspect of an object, which requires the alignment of their descriptions. This leads to redundancy and increased complexity of data transformation procedures, limits the ability to model objects with complex internal structures, and reduces the versatility of digital models. This paper proposes to consider point calculus as an alternative concept for representing geometric objects. Within the point calculus framework, all geometric objects are considered as ordered sets of points defined through local and global simplices. In the context of solid modeling, this enables the simultaneous description of both the boundary shape and the internal volume of an object. Under this interpretation, boundary representation becomes a special case of the proposed approach, thereby ensuring compatibility with existing computer-aided design systems. The use of point calculus eliminates the separation between geometry and functional properties, making it possible to model anisotropic structures, internal channels, and variable materials within a unified parametric space. Applying point calculus to the representation of design objects supports the integrity of digital models and reduces cognitive load when working with their multiple representations. The proposed approach is particularly promising for applications in digital twins, additive manufacturing, and generative design, where the integration of flexibility, universality, and formal rigor is required.

Keywords: *point calculus, design, geometric modeling, boundary representation, functional representation, constructive solid geometry.*

For citation: *Bezditnyi A.A. Point calculus as an ontological basis for representing geometric objects in design [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(1): 87-97. DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-1-87-97.*

Financial Support: the research was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project No. 25-21-00003, <https://rscf.ru/project/25-21-00003/>.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Line segment in point calculus

Figure 2 – Visualization a) line segment; b) plane; c) tetrahedron

Table 1 – Comparative characteristics of approaches to geometric representation in design

References

- [1] *Shen G.* Analysis of boundary representation model rectification. *Computer-Aided Design*, 2001; 33(5): 359–371. DOI: 10.1145/376957.376975.
- [2] *Raghothama S, Shapiro V.* Consistent updates in dual representation systems. *Computer-Aided Design*, 2000; 32(8–9): 463–477. DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00036-1.
- [3] *Pasko A, Adzhiev V, Sourin A, Savchenko V.* Function representation in geometric modeling: Concepts, implementation and applications. *The Visual Computer*, 1995. 11(8): 429-446. DOI: 10.1007/BF02464333.
- [4] *Liu Z, Zhang J, Zhang X.* Construction collision detection for site entities based on 4-D space-time model. *Qinghua Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2010; 50(6): 820–825. EDN: OCILYP.

-
- [5] **Zou G., Feng H., Xu F.** A robust direct modeling method for quadric free-form models based on geometry–topology inconsistency tracking. *Engineering with Computers*. 2022; 38(4): 3815–3830. DOI: 10.1007/s00366-021-01416-5.
- [6] **Shapiro V.** Solid modeling. In: Handbook of Computer Aided Geometric Design. Elsevier, 2002. P.651-681.
- [7] **Rvachev VL, Rvachev VA.** R-functions in boundary value problems in Mechanics. *Applied Mechanics Reviews*, 1995; 48(4): 151-188.
- [8] **Balyuba IG, Naidysh VM.** Point calculus [In Russian]. Melitopol: Bohdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, 2015. 236 p.
- [9] **Golovanov NN.** Geometric modeling [In Russian]. Moscow: DMK Press, 2024. 408 p.
- [10] **Balyuba IG, Konopatsky EV, Bumaga AI.** Point calculus. [In Russian]. Makeevka: DonNACEA, 2020. 244 p.
- [11] **Balyuba IG, Konopatsky EV.** Point calculus. Historical overview and fundamental definitions [In Russian]. *Proceedings of the 8th International Scientific Conference “Physical and Technical Informatics”*, November 9–13, 2020, Nizhny Novgorod: NNGASU, 2020; 2: 321–327.
- [12] **Konopatskiy EV.** Approximation of geometric objects using curve arcs passing through prescribed points [In Russian]. *Information Technologies*, 2019; 25(1): 46–52. DOI: 10.17587/it.25.46-51.
- [13] **Konopatskiy EV, Bezditnyi AA.** The problem of visualization of solid models as a three-parameter set of points [In Russian]. *Scientific Visualization*, 2022; 14(2): 49–61.
- [14] **Bezditnyi AA.** Geometric theory of point-based solid modeling [In Russian]. *Herald of Computer and Information Technologies*, 2025; 22(1): 15–24.
- [15] **Bezditnyi AA.** Features of solid modeling in point calculus [In Russian]. *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision “GraphiCon”*, 2022; 32: 947–955. DOI: 10.20948/graphicon-2022-947-955.
- [16] **Konopatskiy EV, Bezditnyi AA.** Geometric modeling of channel surfaces in point calculus [In Russian]. In: *Problems of Mechanical Engineering: Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference*, Omsk, March 22–23, 2022. Omsk: Omsk State Technical University, 2022. P.252–259.
- [17] **Bezditnyi AA.** Implementation of set-theoretic subtraction operation in point calculus [In Russian]. *Scientific Visualization*, 2025; 17(2): 97–109.
- [18] **Konopatskiy EV.** Geometric Foundations of Parallel Computing in Computer Modeling and Computer-Aided Design Systems [In Russian]. *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision “GraphiCon”*, 2022; 32: 816–825. DOI: 10.20948/graphicon-2022-816-825.
- [19] **Konopatskiy EV, Rotkov SI, Lagunova MV, Bezsolnov MV.** An approach to solid modeling of geometric objects in point calculus [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2025; 15(1): 24–33. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33.
-

About the author

Andrey Alexandrovich Bezditnyi (b. 1985) graduated from V.I. Vernadsky Taurida National University (2007). Candidate of Technical Sciences (PhD, 2013). Associate Professor at the Department of Applied Mathematics and Information Technologies named after Professor V.M. Naidysh, Melitopol State University. ORCID: 0000-0003-0528-9731. RSCI (eLIBRARY.ru) Author ID: 866637; Author ID (Scopus): 57211268631; Researcher ID: D-7558-2019. bezdytniy@gmail.com.

Received September 26, 2025. Revised December 8, 2025. Accepted December 25, 2025.



Преобразование чертёжно-конструкторской документации в трёхмерную каркасную модель

© 2026, С.А. Роменский ✉, С.И. Ротков

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ),
Нижегород, Россия

Аннотация

Статья посвящена решению актуальной проблемы автоматизированного преобразования двухмерных технических чертежей в трёхмерные каркасные модели. Существующие решения преимущественно обеспечивают одностороннее преобразование трёхмерных моделей в двухмерные чертежи. В работе описаны: алгоритм автоматизированной обработки проекционных видов, основанный на использовании ограничивающих прямоугольников для выделения проекционных видов и проекционных векторов для восстановления линий проекционных связей; алгоритм формирования каркасной модели на основе анализа связей между точками облака и проекций рёбер на проекционные виды, учитывающий различные конфигурации несущих линий (прямые, эллипсы) и расширяющий класс моделируемых тел до объектов, ограниченных плоскостями и поверхностями второго порядка (эллипсоиды, эллиптические цилиндры, конусы). Полученные результаты позволяют на порядок сократить время построения трёхмерной модели по двухмерным чертежам объектов различного назначения.

Ключевые слова: обратная задача, начертательная геометрия, проекционные виды, точечная модель, каркасная модель, трёхмерная модель, проекционные связи, технический чертёж.

Цитирование: Роменский С.А., Ротков С.И. Преобразование чертёжно-конструкторской документации в трёхмерную каркасную модель. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.98-110. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-98-110.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 25-21-00003 «Новая концепция твёрдотельного моделирования геометрических объектов в точечном исчислении».

Вклад авторов: Роменский С.А. – разработка структуры статьи, подготовка примеров; Ротков С.И. – постановка задачи, подбор источников.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Обеспечение сохранности и доступности информации об объекте проектирования или производства важно для информационной поддержки жизненного цикла изделия, которая реализуется через интегрированные системы для машиностроительного [1, 2] и для строительного [3] комплексов.

Современные системы геометрии и графики, используемые на различных этапах поддержки жизненного цикла изделия, должны функционировать в двухмерном (2D) и трёхмерном (3D) пространствах измерений, обеспечивая взаимно однозначную информационную связь (3D↔2D). Однако большинство существующих систем предоставляют лишь одностороннюю связь 3D→2D. Это лишает конструктора возможности использовать методы, основанные на техническом чертеже, который содержит всю необходимую информацию, соответствует государственным стандартам и создаётся в электронном виде.

В современных системах автоматизированного проектирования (САПР) возможности формирования геометрических моделей (ГМ) трёхмерных объектов сводятся к четырём ба-

зовым операциям: трём кинематическим (линейное перемещение, вращение, движение по заданной траектории) и построению модели через сечения. В основе этих функциональных операторов лежит каркасно-кинематический метод [4], в котором используются двухмерные данные – плоские контуры, что ограничивает гибкость работы с объёмными формами.

В [5] основное внимание уделено формообразующим операциям (выдавливание, вращение), которые могут служить базой для параметрического описания примитивов. В [6] исследуется реализация булевой операции вычитания, что полезно для создания внутренних полостей и сложных вырезов в построенных моделях. В [7] предлагается общий подход к аналитическому описанию тел как трёхпараметрических множеств точек. Представленный в этих работах математический аппарат может быть использован на этапах параметрического представления примитивов, модификации геометрии и оптимизации вычислений, однако для автоматического построения 3D-модели по проекциям потребуются дополнительные алгоритмы обратного проецирования, сегментации и подгонки параметров.

В [8] представлен автоматизированный метод для реконструкции трёхмерных псевдокаркасных моделей из двухмерных проекционных изображений. Предложенный алгоритм включает обработку двухмерных векторных данных, маркировку вершин и рёбер, а также создание трёхмерных рёбер, что позволяет получить топологическое представление модели. Метод ориентирован на многогранники и не поддерживает криволинейные объекты.

В [9] представлен автоматизированный метод для извлечения полных сетей характерных кривых из трёхмерных точечных моделей поверхностей. Данный метод применим к трёхмерным точечным моделям, полученным с помощью 3D-сканера.

В [10] предлагается метод реконструкции трёхмерных объектов по одному изображению криволинейных поверхностях, используя данные силуэта и многоуровневые карты высот. Метод позволяет создавать трёхмерные модели с высоким разрешением для широкого спектра объектов. Данный подход ограничен симметричностью объекта относительно плоскости изображения.

Работа [11] посвящена автоматизированному созданию пространственных цифровых моделей из плоских чертежей с использованием аналитического R-функционального геометрического моделирования, которое обеспечивает переход от непрерывного представления функций к дискретно-непрерывному компьютерному аналогу.

В [12] предлагается генеративная модель, способная работать с последовательностями формообразующих операций САПР, таких как выдавливание, вращение, булевы операции для кодирования и генерации последовательностей формообразующих операций [13].

В [14-17] предлагается подход к автоматической генерации технических чертежей с использованием нейронных сетей. Модели обучают на большом наборе данных операций в САПР, включающем такие параметры, как размерность, геометрические ограничения и булевы операции, что позволяет создавать реалистичные эскизы, которые могут быть использованы для параметрического моделирования. Ключевая особенность подхода – возможность восстановления твёрдотельных моделей из зашумлённых трёхмерных сканов через генерацию промежуточных эскизов.

Рассмотренные методы либо ограничивают класс моделируемых тел (например, многогранниками), либо имеют ограниченную автоматизацию (с необходимостью ручной корректировки модели), либо сильно зависят от качества входных данных.

1 Постановка задачи

Обратная задача начертательной геометрии (НГ) представляет собой процесс создания трёхмерной ГМ тела на основе заданного чертежа. Под ГМ понимается математическое опи-

сание формы объекта, а также совокупность данных, представляющих эту форму в памяти компьютера и являющуюся электронной моделью изделия (ЭМИ, см. ГОСТ 2.052-2021).

Известно несколько методов конструирования 3D ГМ из плоского чертежа:

- метод обобщённого вращения плоского контура вокруг заданной оси;
- метод обобщённого сдвига контура вдоль заданного вектора;
- метод синтеза 3D модели по заданным проекциям тела (по многовидовому чертежу);
- метод теоретико-множественных операций (ТМО).

Первые три метода реализуют каркасно-кинематический способ генерации данных о пространственном объекте [4]. Они ориентированы на воссоздание формы объекта путём преобразования его двухмерных представлений.

Алгоритм создания 3D-модели по 2D изображению включает следующие части [18].

- Анализ изображения и подготовка его к синтезу модели: распознавание элементов чертежа, их оцифровку, предварительную обработку для устранения ошибок и противоречий.
- Синтез вершин пространственной модели: определение 3D-координат ключевых точек (вершин) объекта на основе их проекций на различных видах.
- Создание каркасной модели: соединение синтезированных вершин рёбрами для формирования каркаса, проверка его на соответствие исходным проекциям и геометрическим свойствам реального объекта.
- Создание граничной модели: на основе каркаса формируются поверхности (грани), которые ограничивают тело, и проверяется их корректность.
- Создание конструктивной модели тела, которую можно использовать в ТМО.

Объектом исследования являются двухмерные и трёхмерные ГМ объектов класса «Деталь».

Предметом исследования являются алгоритмы преобразования двухмерных ГМ, заданных на поле многовидового технического чертежа, в трёхмерные каркасные модели.

2 Основные понятия

Считается, что тело или его модель конечно и ограничено гладкими поверхностями, которые могут не иметь аналитического описания. Во всех системах геометрии и графики предполагается работа в 3D пространстве, в то время как на экране дисплея имеются физически *две координаты*.

Любой отрезок прямой или кривой, являющийся общей частью границы двух поверхностей, является ребром каркасной модели. Если при переходе через ребро внешняя нормаль к поверхности тела как вектор-функция координат $n(x,y,z)=(n_x(x,y,z),n_y(x,y,z),n_z(x,y,z))$ имеет разрыв, то такое ребро называют конструктивным ребром каркаса; ребро называют неконструктивным, если при переходе через него нормаль изменяется непрерывно. Общие точки нескольких рёбер задают вершины каркаса. Любая вершина является общей граничной точкой нескольких частей поверхности тела. Под каркасной моделью пространственного геометрического тела понимается совокупность множества вершин и множества рёбер.

Чертёж объекта является совокупностью проекционных изображений [19], каждое из которых задаётся в своей, местной, системе координат и располагается на поле носителя в единой системе координат чертежа. Конструктивные рёбра каркаса и рёбра очерка криволинейных поверхностей проецируются в отрезки некоторых линий на картинной плоскости, которые могут накладываться друг на друга или пересекаться; линейные рёбра (отрезки прямых), параллельные вектору проецирования, вырождаются в точку. Вершины каркаса проецируются в точки. При проецировании инцидентность вершины и ребра, а, следовательно, и смежность вершин, не нарушаются, но проекции вершин могут также накладываться друг на друга. Из этого следует, что двухмерная модель проекции отличается от трёхмерной каркасной модели размерностью пространства, в котором заданы координаты точек-вершин и параметры несущих линий рёбер, и смысловым наполнением понятий «вершина» и «ребро». Под

вершиной проекции понимается точка, заданная своими координатами на картинной плоскости. Под ребром проекции понимается отрезок прямой или кривой линии на этой плоскости (геометрический смысл), соединяющий две вершины проекции (топологический смысл).

Математическая модель проекции: $PR = \{P, C, F\}$, где

$P = \{P_i = \{X_i, Y_i\} \in R^2, i=1..M_p\}$ – множество вершин проекции;

$C = \{C_j = (X_j(t), Y_j(t), Z_j(t)) \in R^2, T_{0j} \leq t \leq T_{1j}, j=1..M_c\}$ – множество несущих линий;

$F = \{F_k = (P_{1k}, P_{2k}, C_k), P_{1k}, P_{2k} \in P, C_k \in C, k=1..M_f\}$ – множество рёбер проекции.

Задаётся класс тел (каркасная модель которых может быть синтезирована разрабатываемым алгоритмом):

- пусть тело ограничено частями плоскостей и криволинейных поверхностей второго порядка (эллипсоидов, эллиптических цилиндров и эллиптических конусов);
- пусть несущими линиями рёбер каркасной модели являются прямые и эллипсы, плоскости которых произвольно ориентированы в пространстве.

При прямолинейном ортогональном проецировании такого тела несущими линиями на плоскости проекции будут также прямые и эллипсы произвольной ориентации. Таким образом, определив класс моделируемых тел, выявлен класс исходных данных задачи: ребрами каждой проекции могут быть отрезки прямых и эллиптические дуги.

В соответствии с [19] чертёж объекта может содержать произвольное количество видов, расположенных на одном или на нескольких листах. Для формирования каркасной модели объекта принципиально важно привести все виды к единой системе координат. Одним из ключевых блоков программной реализации алгоритма синтеза является установление и проверка проекционных связей между видами [18], поскольку именно после этого этапа формируется массив 3D-координат модели.

Любая проекция трёхмерной модели на плоскость может быть представлена в виде графа $G(V, R)$, где V – множество вершин, заданных своими координатами, а R – множество рёбер (линий первого или второго порядка), соединяющих эти вершины. Структурно чертёж также может быть представлен в виде графа $D(F)$, где F – отдельные виды или фрагменты изображений объекта, каждый из которых изначально задан в своей локальной системе координат, связанной с общей системой координат чертежа.

3 Информационная модель задачи

Модель проекций (исходные данные).

Координаты вершин проекций на чертеже: $P_i = (X_i, Y_i)$, $i=1..M_p$.

Уравнения несущих линий второго порядка (эллипсов):

$$EL_j: A_{11j}(X-X_{cj})^2 + 2A_{12j}(X-X_{cj})(Y-Y_{cj}) + A_{22j}(Y-Y_{cj})^2 = 1 \text{ или}$$

$$X = a_j \cos \Phi_j \cos t - b_j \sin \Phi_j \sin t + X_{cj}, Y = a_j \sin \Phi_j \cos t + b_j \cos \Phi_j \sin t + Y_{cj}, j=1..M_{el}.$$

Параметры рёбер проекций:

$R_k = (N_{p1 k}, N_{p2 k}, N_{el k})$, $1 \leq N_{p1 k}, N_{p2 k} \leq M_p$, $0 \leq N_{el k} \leq M_{el}$, $1 \leq k \leq M_r$, где $N_{p1 k}$, $N_{p2 k}$ – номера вершин, инцидентных ребру, $N_{el k}$ – номер несущей линии (0 – прямая).

Модель каркаса (выходные данные).

Координаты вершин каркаса: $V_i = (X_i, Y_i, Z_i)$, $i=1..N_v$.

Уравнения несущих линий второго порядка (эллипсов):

L_j : уравнение плоскости и уравнение поверхности второго порядка (эллипсоида, эллиптического цилиндра или эллиптического конуса) или параметрически:

$X = X_j(t)$, $Y = Y_j(t)$, $Z = Z_j(t)$, где $X_j(t)$, $Y_j(t)$, $Z_j(t)$, – линейные комбинации функций $\{1, \sin t, \cos t\}$, коэффициенты которых связаны между собой, или в векторном виде:

$r_j(t_1, t_2) = r_{c_j} + t_1 r_{1j} + t_2 r_{2j}$, $t_1 + t_2 = 1$, где r_{c_j} – радиус-вектор центра эллипса, r_{1j} и r_{2j} – векторы полуосей эллипса, $j=1 \dots N_l$.

Параметры рёбер каркаса:

$E_k = (N_{v1 k}, N_{v2 k}, N_{1 k})$, $1 \leq N_{v1 k}, N_{v2 k} \leq M_p$, $0 \leq N_{1 k} \leq N_l$, $1 \leq k \leq N_e$, где $N_{v1 k}$, $N_{v2 k}$ – номера вершин, инцидентных ребру, $N_{1 k}$ – номер несущей линии (0 – прямая).

Уравнения несущих линий первого порядка (прямых) легко получить исходя из координат, инцидентных ребру вершин, и эти уравнения не включены в модели каркаса и проекций явно, а все рёбра-отрезки имеют одинаковый номер несущей линии (равный 0).

4 Обработка проекционных видов

Применение стандартных подходов к поиску компонент связности не позволяет получить результат, так как отдельные элементы (например, отверстия внутри тела) могут быть не связаны с внешней геометрией и должны выделяться в отдельные компоненты.

Для работы с геометро-графической информацией для каждой плоской кривой или отрезка можно выделить ограничивающую область – прямоугольник, внутри которого помещается данный элемент. Для вертикальных и горизонтальных отрезков такой прямоугольник вырождается в отрезок. Для каждой компоненты связности (объединения связанных элементов) запоминается и динамически расширяется ограничивающий прямоугольник. Проверка принадлежности объекта к компоненте связности осуществляется по принципу пересечения ограничивающих прямоугольников: если ограничивающий прямоугольник объекта и ограничивающий прямоугольник компоненты связности имеют общую площадь, или общие вершины, или их стороны пересекаются, то объект считается частью данной компоненты. При добавлении нового объекта ограничивающий прямоугольник компоненты переопределяется (см. пример на рисунке 1).

Использование ограничивающих прямоугольников выделенных проекционных видов в сочетании с [19] позволяет восстанавливать проекционные связи даже в случае их частичного нарушения [20]. Однако данный подход оказывается неэффективным, если геометро-графическая информация распределена по нескольким листам или когда ограничивающие прямоугольники видов имеют форму квадрата.

При выделении каждого проекционного вида формируются два проекционных вектора координат точек – один с проекциями элементов вида на ось Ox чертежа, другой – на ось Oy . При добавлении очередного элемента к виду на соответствующие оси проецируются две или более его характерных точек (например, концы отрезка). На рисунке 2 показаны исходные проекционные виды и сформированные для них проекционные векторы. При невозможности восстановления проекционных связей между видами только с помощью ограничивающих прямоугольников полученные для каждого выделенного вида оба проекционных вектора сортируются и приводятся к общей точке отсчёта (например, к левому нижнему углу вида). После сортировки проводится сравнение этих векторов различных проекционных видов. Если проекционные векторы совпадают (т.е. разница всех их компонент меньше заранее определённого малого значения ϵ), то вычисляется вектор сдвига.

Для восстановления проекционных связей за главный вид принимается, как правило, левое верхнее проекционное изображение. Далее находятся виды, у которых совпадают проекционные векторы с векторами главного вида, и, в соответствии с [19], они располагаются в

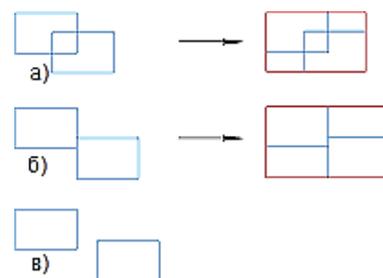


Рисунок 1 - Различные случаи расположения ограничивающих прямоугольников: а) и б) объект принадлежит компоненте и её ограничивающий прямоугольник обновляется (показан справа красным), в) объект не относится к проверяемой компоненте

едином двумерном пространстве. После этого определяются координаты точки начала отсчёта эпюра Монжа: x -координата как середина между видом слева и главным видом; y -координата как середина между видом спереди и видом сверху. На рисунке 3 представлены полученные векторы сдвига и найденная точка начала координат эпюра Монжа.

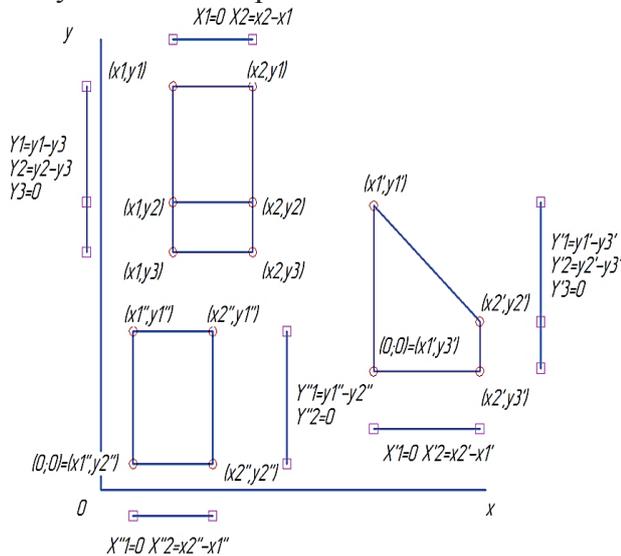


Рисунок 2 - Исходные проекционные виды и сформированные проекционные векторы

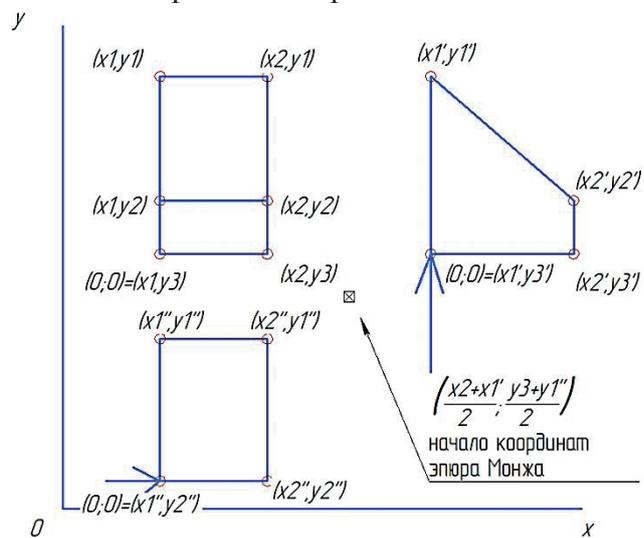


Рисунок 3 - Полученные в ходе алгоритма векторы сдвига и найденная точка начала координат эпюра Монжа

Таким образом, подход, сочетающий анализ ограничивающих прямоугольников и проекционных векторов, позволяет устанавливать пространственные связи между различными проекционными видами чертежа, подготавливая данные для синтеза трёхмерной модели.

5 Формирование точечной модели

На этапе реконструкции трёхмерной модели из двумерных проекций создание точечной модели (облака точек) позволяет преобразовать информацию о соответствующих точках на нескольких двумерных изображениях в их трёхмерные координаты. Центральное место в этом преобразовании занимает метод триангуляции, основанный на принципе пересечения лучей, проходящих из центров проекций через соответствующие точки на различных изображениях. Основные этапы алгоритма [18].

- 1) *Определение соответствующих точек.* Этот процесс включает извлечение координат проекций точки на соответствующих плоскостях.
- 2) *Вычисление лучей проекции.* Эти лучи представляют собой прямые линии в трёхмерном пространстве, которые теоретически должны пересекаться в истинной 3D координате исходной точки.
- 3) *Пересечение лучей и минимизация ошибок.* Вследствие ошибок в исходных данных лучи могут не сходиться в одной точке. В таких случаях для нахождения наиболее вероятной трёхмерной координаты используется метод наименьших квадратов.
- 4) *Восстановление трёхмерных координат.* На основе точки пересечения лучей вычисляются точные трёхмерные координаты каждой реконструируемой точки. Этот результат является основой для последующего построения полной 3D модели объекта.

В результате последовательного применения этих шагов к выделенным на предыдущем шаге проекционным изображениям формируется облако точек – дискретный набор трёхмерных координат, представляющий собой цифровую аппроксимацию поверхности исходного объекта. Это облако точек служит входными данными для дальнейших этапов реконструкции – созданию каркасных, поверхностных или твердотельных моделей объекта.

6 Формирование каркасной модели

Каркасная модель представляет собой совокупность вершин и рёбер, которые определяют основные геометрические очертания и структуру объекта. Алгоритм определения рёбер и формирования каркасной модели включает следующие шаги [18].

1) проекция точки на изображения.

Для каждой точки, входящей в сформированное облако точек, выполняется обратная операция — вычисляются её проекции на все доступные исходные проекционные изображения (например, фронтальную, горизонтальную и профильную проекции).

2) анализ матриц смежности.

На каждом проекционном изображении существует матрица смежности, которая отражает визуальные связи между проекциями точек. Если две проекции точек соединены линией или ребром на данном изображении, это указывает на потенциальную связь между соответствующими 3D точками. При наличии ребра между точками на проекции соответствующий элемент матрицы смежности равен 1, иначе – 0.

3) определение рёбер.

Проводится проверка: является ли потенциальное ребро между двумя 3D точками ($V1$ и $V2$) частью искомой каркасной модели. Для этого определяется наличие соответствующего ребра между их 2D проекциями ($VF1$ и $VF2$ на фронтальной, $VH1$ и $VH2$ на горизонтальной, $VP1$ и $VP2$ на профильной проекциях) на всех изображениях (рисунок 4).

Ребро в каркасной модели между двумя точками считается существующим, если на всех изображениях существует ребро между проекциями этих точек или проекции точек совпадают. Если на какой-либо из проекций точки совпали, то может быть восстановлено лишь ребро-отрезок.

Если проекции не совпали, то выделяются все рёбра, по которым смежны данные вершины: WFi , $i=1 \dots Nf$ для $VF1$ и $VF2$, WHj , $j=1 \dots NH$ для $VH1$ и $VH2$, WPk , $k=1 \dots NP$ для $VP1$ и $VP2$.

Рассматриваются все возможные тройки рёбер WFi , WHj , WPk . Если эти три ребра являются образами некоторого ребра каркасной модели, то несущие линии этих рёбер – это проекции пространственной прямой или эллипса. Возможны четыре принципиально различных конфигурации типов несущих линий для выбранных рёбер.

Если анализ показывает, что WFi , WHj , WPk могут являться проекциями некоторого ребра каркаса, то это ребро добавляется к модели и перебор троек рёбер продолжается. На основе проверенных связей формируется каркасная модель, которая состоит из вершин (точек облака) и рёбер (связей между точками).

Анализ рёбер на соответствие линии в 3D.

- 1) Если все три проекции ребра являются отрезками прямых, то ребро в пространстве, соединяющее вершины $V1$ и $V2$ является отрезком прямой.
- 2) Если одно из трёх рёбер – это дуга эллипса, а два оставшихся представляют собой отрезки прямых, то для каждого прямого ребра определяется проецирующую плоскость в трёхмерном пространстве, перпендикулярная его проекции. Искомое ребро каркаса, проекции которого совпадают с этими прямыми, должно принадлежать обеим таким плоскостям. Если эти плоскости пересекаются, то ребро лежит на их линии пересечения и не может быть эллиптической дугой на третьей проекции. Если же плоскости совпадают (параллельны проекционной плоскости третьего, эллиптического ребра), то потенциальное ребро каркаса находится на пересечении этих плоскостей с эллиптическим цилиндром, который имеет ось, перпендикулярную плоскостям, и

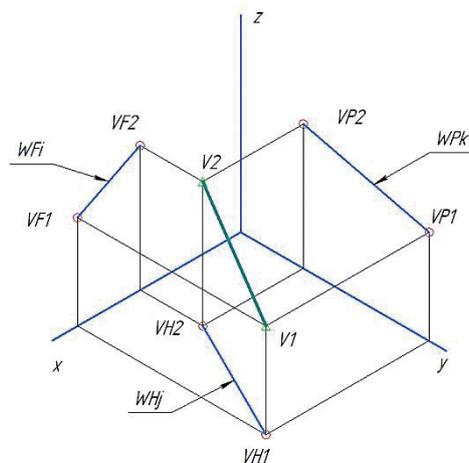


Рисунок 4 - Формирование ребра между вершинами $V1$ и $V2$

направляющую, соответствующую эллипсу. Эти плоскости не могут быть параллельны, так как у них уже есть две общие точки – вершины V1 и V2.

- 3) Если два ребра представляют собой дуги, а одно является отрезком, то ребро принадлежит каркасной модели, если:
 - эллипсы, на которых лежат дуги, имеют один и тот же центр и одинаковый размер вдоль оси, где их проекции соприкасаются (например, XF и XH, YF и YP, YH и XP).
 - В этом случае два построенных на них эллиптических цилиндра (с осями, перпендикулярными плоскостям изображений) пересекутся в трёхмерном пространстве, порождая при этом две эллиптические кривые;
 - плоскость одного эллипса из предыдущего пункта совпадает с проецирующей плоскостью для ребра-отрезка на третьей проекции.
- 4) Если три ребра, соединяющие вершины V1 и V2, представляют собой дуги, то формирование трёхмерной эллиптической дуги возможно, если:
 - для каждой пары из тройки несущих эллипсов обязательны выполнение условий идентичности координат центров и соразмерности габаритов по соответствующим осям;
 - все три эллиптических цилиндра сходятся в одной общей эллиптической кривой в пространстве, которая формирует линию ребра каркаса.

Таким образом, на основе проверенных связей, выявленных на всех проекционных изображениях, формируется окончательная каркасная модель. Она состоит из вершин, взятых из облака точек, и рёбер, установленных в результате анализа проекций.

7 Примеры

Сравнивается время построения трёхмерной модели путём ручного и автоматизированного построения трёхмерной каркасной модели. На создание простой трёхмерной модели (см. рисунок 5) тратится от 2 до 5 минут. Программная реализация позволила получить результат через 0.5-3 секунды после запуска процесса чтения двумерной информации.

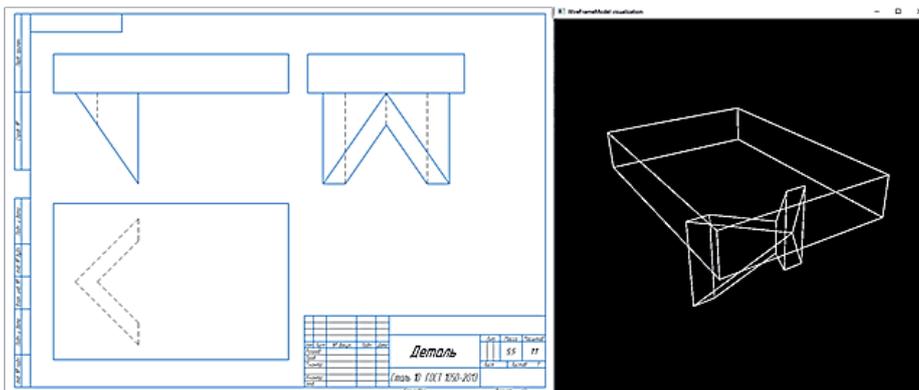


Рисунок 5 – Пример построения трёхмерной модели по двумерному чертежу

из которых затрачивается до нескольких минут; реализованный программный комплекс тратит на создание каркасной модели меньше минуты [21].

Заключение

Представлен поэтапный алгоритм автоматизированного преобразования двухмерной чертёжно-конструкторской документации в трёхмерную каркасную модель.

На рисунке 6 приведены чертеж изделия класса «деталь» и трёхмерные модели, полученные реализованным программным комплексом. В среднем для проектирования подобной детали необходимо совершить нескольких десятков формообразующих операций, на каждую

Представленный подход вносит вклад в формализацию обратной задачи НГ и алгоритмизацию её решений.

Список источников

- [1] *Shangina E.* The Introduction of CALS-Technologies in Russia // *Proceedings of the International Scientific Conference "FarEastCon" (ISCFEC 2020)*, Vladivostok, 01–04 октября 2019 года. Atlantis Press: Atlantis Press, 2020. DOI: 10.2991/aebmr.k.200312.173.
- [2] *Колчин А.Ф., Овсянников М.В., Стрекалов А.Ф., Сумароков С.В.* Управление жизненным циклом продукции. М.: Анахарсис, 2002. 304 с.
- [3] *Рыбин Е.Н., Амбарян С.К., Аносов В.В. и др.* BIM-технологии. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019. Т.9, № 1(28). С.98-105.
- [4] *Осипов В.А., Осипова Л.И.* Теоретические основы каркасно-кинематического метода направляющей линии. *Изв. ВУЗов. Серия "Авиационная техника"*. 1980, №4. С.48-52.
- [5] *Бездитный А.А.* Особенности твердотельного моделирования в точечном исчислении. *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон»*. 2022. №32. С.947-955.
- [6] *Бездитный А.А.* Реализация теоретико-множественной операции вычитания в точечном исчислении. *Научная визуализация*. 2025. Т.17, №2. С.97–109. DOI: 10.26583/sv.17.2.07.
- [7] *Конопацкий Е.В., Ротков С.И., Лагунова М.В., Безольнов М.В.* Подход к твердотельному моделированию геометрических объектов в точечном исчислении. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.24-33. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33.
- [8] *Furferi R., Governi L., Palai M., Volpe Y.* From 2D orthographic views to 3D pseudo-wireframe: An automatic procedure. *International Journal of Computer Applications* 2010; 975: 8887. DOI: 10.5120/918-1296.
- [9] *Lu Z., Guo J., Xiao J., Wang Y., Zhang X., Yan D-M.* Extracting cycle-aware feature curve networks from 3D models. *Computer Aided Design* 2021; 131: 102949. DOI: 10.1016/j.cad.2020.102949.
- [10] *Вяткин С.И., Долговесов Б.С.* Метод реконструкции 3D-объектов по данным одного ракурса изображения. *Автометрия*. 2023. Т.59, №5. С.47-55. DOI: 10.15372/AUT20230505.
- [11] *Толок А.В., Толок Н.Б.* Проекционный принцип построения функционально-воксельных моделей. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №.4(58). С.523-534. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-523-534
- [12] *Wu R., Xiao C., Zheng C.* DeepCAD: A deep generative network for computer-aided design models. In: *Proceedings of the IEEE/CVF int. conf. on computer vision*. ICCV, 2021, p.6772–82. DOI: 10.48550/arXiv.2105.09492.
- [13] *Yifan Qie, Nabil Anwer.* Invariance Class based Surface Reconstruction using CNN Transfer Learning. *Computer-Aided Design and Applications*. 2023; 1204-1220. DOI: 10.14733/cadaps.2023.1204-1220.
- [14] *Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I.* Attention is All you Need. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017. Vol.30. 15 p. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.
- [15] *Jayaraman P.K., Lambourne J.G., Desai N., Willis K.D., Sanghi A., Morris N.J.* SolidGen: An autoregressive model for direct B-rep synthesis. 2022, arXiv Preprint: 2203.13944. DOI: 10.48550/arXiv.2203.13944.
- [16] *Lambourne J.G., Willis K.D., Jayaraman P.K., Sanghi A., Meltzer P., Shayani H.* BRepNet: A topological message passing system for solid models. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2021, p.12773–82. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01258.
- [17] *Willis K.D., Jayaraman P.K., Lambourne J.G., Chu H., Pu Y.* Engineering sketch generation for computer-aided design. In: *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2021, p.2105–14. DOI: 10.48550/arXiv.2104.09621.
- [18] *Роменский С.А., Ротков С.И.* Формирование трёхмерной каркасной модели в проблеме преобразования чертёжно-конструкторской документации на бумажном носителе в электронную модель объекта. *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон"*. 2020. №30. С.67-82. DOI: 10.51130/graphicon-2020-1-67-82.
- [19] ГОСТ 2.305-2008 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Изображения - виды, разрезы, сечения (с Поправкой)». Дата введения 2009-07-01.
- [20] *Жилина Н.Д., Мошкова Т.В., Роменский С.А.* [и др.]. Распознавание компонент связности в задаче восстановления трёхмерной модели по проекционным изображениям. *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон"*. 2019. №29. С.185-187. DOI: 10.30987/graphicon-2019-1-185-187.
- [21] *Vasin D., Gromov V., Rotkov S., Romensky S.* The Automated Technology for Converting Drawing and Design Paper-Based Documentation into Electronic 3D Model of an Object. *Proceedings of ITNT 2020 - 6th IEEE Inter-*

Сведения об авторах



Роменский Сергей Александрович, 1990 г. рождения. Окончил нижегородский государственный университет (ННГУ) им. Н.И. Лобачевского в 2014 г. Старший преподаватель кафедры инженерной графики и информационного моделирования ННГАСУ. Author ID (РИНЦ): 857519; Author ID (Scopus): 57214225915; ORCID ID: 0000-0002-2528-1561. romensky@nngasu.ru. ✉.



Ротков Сергей Игоревич, 1947 г. рождения. Окончил ННГУ им. Н.И. Лобачевского в 1970 г., к.т.н. (1981), д.т.н. (2000). Профессор кафедры инженерной графики и информационного моделирования ННГАСУ. В списке научных трудов более 200 работ. Author ID (РИНЦ): 422792; Author ID (Scopus): 55533401900; ORCID ID: 0000-0003-2530-3297. rotkovs@mail.ru.

Поступила в редакцию 11.09.2025, после рецензирования 12.02.2026. Принята к публикации 19.02.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-98-110

Algorithms of reconstruction of 3d wireframe model from drawings

© 2026, S.A. Romenskiy ✉, S.I. Rotkov

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

This article describes the issue of automated conversion of two-dimensional technical drawings into three-dimensional wireframe models, a key aspect in the context of digitalization and the transition to paperless technologies in mechanical engineering and construction. Despite significant advances in computer-aided design systems, existing solutions primarily provide a one-way link from three-dimensional models to two-dimensional drawings, while reconstructing three-dimensional models from two-dimensional projections remains a complex inverse problem of descriptive geometry. This paper describes an algorithm for automated processing of projection views, focused on reconstructing topological and metric relationships, based on the use of bounding rectangles to select projection views and projection vectors to reconstruct projection relationship lines. An algorithm for generating a wireframe model is presented based on an analysis of connections between cloud points and edge projections onto projection views. This algorithm accounts for various configurations of supporting lines (lines, ellipses) and expands the class of modeled bodies to objects bounded by planes and quadratic surfaces (ellipsoids, elliptical cylinders, cones). The obtained results allow for a 30-100-fold reduction in design time for objects of various purposes. Experimental implementation demonstrated that a model that takes 40 minutes to construct manually can be automatically reconstructed in 33 seconds.

Keywords: *reverse task of descriptive geometry, projection views, point model, wireframe model, reconstruction of three-dimensional models, CALS technologies, projection links.*

For citation: *Romenskiy SA, Rotkov SI. Algorithms of reconstruction of 3d wireframe model from drawings [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 98-110. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-98-110.*

Financial Support: This work was supported by Russian Science Foundation (project № 25-21-00003 «A new concept of geometric objects solid-state modeling in the point calculus»).

Authors' contributions: *Romenskiy SA.* - development of article structure, preparation of examples, editing of article; *Rotkov SI.* - problem statement, editing of article and selection of sources

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

List of figures

Figure 1 – Various cases of the location of the bounding rectangles when determining the belonging of an object to a connectivity component

Figure 2 – Initial projection views and generated projection vectors.

Figure 3 – The shift vectors obtained during the algorithm and the found point of the origin of the Monge epure.

Figure 4 – Formation of an edge between vertices V1 and V2.

Figure 5 – A simple 3D model, built manually in about 5 minutes, restored automatically in about 3 seconds.

Figure 6 – Drawing of the “Zvezdka” part (a), visualization of the three-dimensional model in the CAD system named Kompas 3D (b) and visualization of the three-dimensional model obtained using the described algorithm (c)

References

- [1] **Shangina E.** The Introduction of CALS-Technologies [In Russian]. *Proceedings of the International Scientific Conference "FarEastCon" (ISCFEC 2020)*, Vladivostok, October,01-04, year of 2019. Atlantis Press: Atlantis Press, 2020. DOI: 10.2991/aebmr.k.200312.173.
- [2] **Kolchin AF, Ovsyannikov MV, Strekalov AF, Sumarokov SV.** Product life cycle management [In Russian]. Moscow: Anaharsis, 2002. 304 p.
- [3] **Rybin EN, Ambaryan SK, Anosov VV, [and other].** BIM-technology [In Russian]. *University News. Investments. Construction. Real Estate.* 2019; 9(1): 98-105.
- [4] **Osipov VA, Osipova LI.** Theoretical foundations of the frame-kinematic method of the guide line [In Russian]. *News of Higher Education Institutions. Series "Aviation Technology".* 1980; 4: 48-52.
- [5] **Bezditnyi AA.** Features of solid modeling in point calculus / *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "Graphicon".* 2022; 32: 947-955.
- [6] **Bezditnyi AA.** Implementation of the Set-Theoretic Subtraction Operation in Point Calculus (2025). [In Russian] *Scientific Visualization* 17.2: 97-109. DOI: 10.26583/sv.17.2.07.
- [7] **Konopatskiy EV, Rotkov SI, Lagunova MV, Bezsolnov MV.** An approach to solid modeling of geometric objects in point calculus [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2025; 15(1): 24-33. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33.
- [8] **Furferi R, Governi L, Palai M, Volpe Y.** From 2D orthographic views to 3D pseudo-wireframe: An automatic procedure. *International Journal of Computer Applications* 2010; 975: 8887. DOI: 10.5120/918-1296.
- [9] **Lu Z, Guo J, Xiao J, Wang Y, Zhang X, Yan D-M.** Extracting cycle-aware feature curve networks from 3D models. *Computer Aided Design* 2021; 131: 102949. DOI: 10.1016/j.cad.2020.102949.
- [10] **Vyatkin, S. I.** Method for reconstructing 3D objects based on data from one image angle / S. I. Vyatkin, B. S. Dolgovesov [In Russian]. *Avtometriya.* 2023; 59(5): 47-55. DOI: 10.15372/AUT20230505.
- [11] **Tolok AV, Tolok NB.** Projection principle for constructing functional voxel models [In Russian]. *Ontology of designing.* 2025; 15(4): 523-534. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-523-534.
- [12] **Wu R, Xiao C, Zheng C.** Deepcad: A deep generative network for computer-aided design models. In: *Proceedings of the IEEE/CVF int. conf. on computer vision.* ICCV, 2021, p.6772–82. DOI: 10.48550/arXiv.2105.09492.
- [13] **Yifan Qie, Nabil Anwer.** Invariance Class based Surface Reconstruction using CNN Transfer Learning | 1204-1220 | doi: 10.14733/cadaps.2023.1204-1220
- [14] **Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N Gomez, Łukasz Kaiser, and Illia Polosukhin.** 2017. Attention is All you Need. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 30. DOI:10.48550/arXiv.1706.03762
- [15] **Jayaraman PK, Lambourne JG, Desai N, Willis KD, Sanghi A, Morris NJ.** SolidGen: An autoregressive model for direct B-rep synthesis. 2022, arXiv Preprint: 2203.13944. DOI:10.48550/arXiv.2203.13944
- [16] **Lambourne JG, Willis KD, Jayaraman PK, Sanghi A, Meltzer P, Shayani H.** BRepNet: A topological message passing system for solid models. In: *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition.* 2021, p. 12773–82. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01258.
- [17] **Willis KD, Jayaraman PK, Lambourne JG, Chu H, Pu Y.** Engineering sketch generation for computer-aided design. In: *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition.* 2021, p. 2105–14. DOI: 10.48550/arXiv.2104.09621.
- [18] **Romensky SA, Rotkov SI.** Formation of a three-dimensional wireframe model in the problem of converting paper drawing and design documentation into an electronic model of an object [In Russian]. *Proceedings of the Interna-*

- tional Conference on Computer Graphics and Vision "Graphicon". 2020; 30: 67-82. DOI: 10.51130/graphicon-2020-1-67-82.*
- [19] GOST 2.305-2008 "Unified system of design documentation (ESKD). Images - views, sections, sections (with Amendment)" [In Russian]. <https://docs.cntd.ru/document/1200069435>.
- [20] **Zhilina ND, Moshkova TV, Romensky SA.** et al. Recognition of connectivity components in the problem of restoring a three-dimensional model from projection images [In Russian]. *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "Grafikon"*. 2019; 29: 185–187. DOI: 10.30987/graphicon-2019-1-185-187.
- [21] **Vasin D, Gromov V, Rotkov S, Romensky S.** The Automated Technology for Converting Drawing and Design Paper-Based Documentation into Electronic 3D Model of an Object. *Proceedings of ITNT 2020 - 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology* : 6, Virtual, Samara, 26–29 мая 2020 года. – Virtual, Samara, 2020. P. 9253284. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253284.
-

About the authors

Sergey Alexandrovich Romensky, (b. 1990). Graduated from Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod in 2014. Senior Lecturer, Department of Engineering Graphics and Information Modeling, NNGASU. Author ID (RSCI): 857519; Author ID (Scopus): 57214225915; ORCID ID: 0000-0002-2528-1561. romensky@nngasu.ru. ✉.

Sergey Igorevich Rotkov, (b. 1947). Graduated from Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod in 1970, PhD (1981), DSc (2000). Professor, Department of Engineering Graphics and Information Modeling, NNGASU. The list of scientific publications includes more than 200 works. Author ID (RSCI): 422792; Author ID (Scopus): 55533401900; ORCID ID: 0000-0003-2530-3297. rotkovs@mail.ru.

Received September 11, 2025. Revised February 12, 2026. Accepted February 19, 2026

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.02

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-111-124



Формирование решений при выборе энергетических установок для обеспечения энергоэффективности территории

© 2026, Х. Арсола-Руис¹, Л.Э. Гарсия-Марреро², М.А. Полухович³✉, В.Р. Мухонго⁴, Ю.В. Логвинова³

¹ Технологический университет Гаваны «Хосе Антонио Эчеверриа», Гавана, Куба

² Университет Салерно, Фишиано, Италия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет Катавала Бвила, Бенгела, Ангола

Аннотация

Исследование посвящено разработке подхода к обеспечению энергоэффективности территории. Предметом исследования является моделирование процесса выбора типа и долевого соотношения энергетических установок для различных географических районов территории. Задачи исследования заключались в анализе критериев размещения энергетических установок, в алгоритмизации принятия решения и определении проектных вариантов размещения солнечных и ветряных электростанций. Представлена математическая модель поиска решений для удовлетворения потребителей энергии требуемой мощностью на заданной территории. Оптимальное решение по выбору энергетических установок осуществляется с использованием расстояния Чебышева. Определены критерии эффективности, позволяющие сформулировать требования к проектным решениям при проектировании системы энергоснабжения. Установлен набор данных, который корректируется лицом, принимающим решение, для достижения компромисса между показателями энергоэффективности. Разработан алгоритм поиска оптимального решения при выборе энергетических установок с учётом введённых ограничений. Сформирован комплекс критериев рационального использования возобновляемых ресурсов территории с выбором типа и количества энергетических установок (солнечные панели, ветрогенераторы или их гибридные варианты). Представлены результаты моделирования использования возобновляемых источников энергии в различных зонах территории с учётом различных факторов (интенсивность солнечного излучения, скорость ветра и др.).

Ключевые слова: принятие решений, энергоэффективность территории, ветрогенератор, солнечная панель, возобновляемый ресурс.

Цитирование: Арсола-Руис Х., Гарсия-Марреро Л.Э., Полухович М.А., Мухонго В.Р., Логвинова Ю.В. Формирование решений при выборе энергетических установок для обеспечения энергоэффективности территории. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.111-124. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-111-124.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2025-673 от 20.08.2025.

Вклад авторов: Арсола-Руис Х. – разработка концепции исследования; Гарсия-Марреро Л.Э. – построение математических моделей; Полухович М.А. – обзор релевантных работ; Мухонго В.Р. – моделирование задачи оптимального выбора энергетических объектов; Логвинова Ю.В. – обработка полученных результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Промышленное развитие способствует увеличению энергоёмкости сырьевых отраслей в связи с экстремальными климатическими условиями и огромной территорией ряда государств [1]. Поэтому актуальна проблема обеспечения потребителей устойчивым электропитанием [2]. Это обусловлено изношенностью элементов электроэнергетических комплексов и воздействием экстремальных климатических условий, приводящих к перебоям в передаче электроэнергии [3, 4]. Истощение запасов невозобновляемых природных ресурсов приводит к необходимости применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ): солнечный свет, потоки воды и воздуха, геотермальное тепло [5, 6]. Широко распространено применение ветроэнергетических и фотоэлектрических установок в связи с их относительной простотой эксплуатации и возможностью повсеместного использования [7, 8], но существует проблема формирования решения по их рациональному размещению на территории [9].

Постоянное электроснабжение объектов территории вне зависимости от состояния традиционной электроэнергетической системы и с целью снижения ущерба окружающей среде при использовании ископаемых ресурсов может обеспечиваться гибридной системой ВИЭ, представляющей собой комбинацию совместно работающих источников энергии. В таких системах обычно используют ВИЭ (солнечные панели, ветрогенераторы) и резервные источники (дизель-генераторы, аккумуляторы), что позволяет снизить зависимость от традиционного топлива, уменьшить затраты и обеспечить непрерывное энергоснабжение.

Системы принятия решений включают большое количество подсистем [10]. Оптимизационные задачи становятся большими, а процесс формирования решения – затратным даже для суперкомпьютеров [11]. Декомпозиция систем вызвана тем, что анализ всех элементов и взаимодействий между ними перегружает процесс обработки информации [12].

Решения по выбору и размещению энергетических установок (ЭУ) должны учитывать характеристики территории, климатические условия, потребность промышленных производств и населения в электроэнергии. При этом необходимо отметить слабую структурированность данных характеристик [13].

Целью исследования является разработка подхода к формированию решений при выборе ЭУ для удовлетворения территориальных потребностей.

1 Критерии размещения энергетических установок

Задача функционального зонирования территории с учётом размещения ЭУ включена в стратегию территориального развития (ТР), которая направлена на формирование промышленной, сельскохозяйственной и сервисной отраслей [14], включая сети дорог, водоснабжения, связи, энергоснабжения, водораспределения и т.п. для каждого из районов, составляющих территорию, а также с учётом потребностей близлежащих территорий. На рисунке 1 представлен набор компонентов системы ТР. ТР касается всех секторов экономики и должно корректироваться в каждом временном разрезе (годовом, квартальном, ежемесячном и оперативном), а также при декомпозиции по функциям производственной деятельности [15]. Схема согласования секторов происходит для каждой зоны, как показано на рисунке 2.

В перечень мероприятий ТР входит планирование расположения энергетических сетей по всей территории. Планирование учитывает наличие ресурсов и энергетические потребности, определяемые программами экономического и социального развития территории. При выборе ЭУ, в т.ч. для производства энергии с использованием различных ресурсов для удовлетворения спроса, необходима разбивка по зонам, видам источников энергии и целям.

Изучение характеристик территории позволяет определить потребности в энергии, которые необходимо удовлетворить в течение различных временных периодов [16]. Этот анализ

направлен на выявление связей, называемых координационными переменными, между изучаемой и более крупной энергетическими системами.



Рисунок 1 – Набор компонентов системы территориального развития

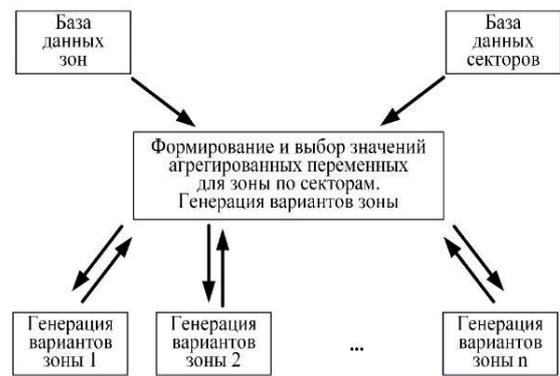


Рисунок 2 – Схема согласования секторов для каждой зоны

В данном исследовании координационными переменными являются следующие:

- максимальная мощность, необходимая для всей территории и для каждой её зоны;
- потенциал доступных на местном уровне ВИЭ.

Например, размещение ВИЭ на территории Республики Куба зависит от ряда факторов.

1. Распределение скорости ветра по территории. Во время сухого сезона, длящегося с ноября по апрель, средняя скорость ветра равна 7,5 м/с, во время влажного сезона – 6,2 м/с. Влияние оказывает орография местности, например, присутствует эффект ускорения ветра в прибрежных зонах.

2. Направление ветра. Преобладающее направление пассатов – северо-восточное с вероятностью 60-70%. Муссоны, наблюдаемые с июля по октябрь, имеют направление южно-западное с вероятностью 20-30%.

3. Экстремальные погодные явления. На территории Кубы возможно возникновение урагана.

С учётом указанных факторов может осуществляться выбор типа турбины ветрогенератора (ВГ) в зависимости от средней скорости ветра, замена ВГ на солнечные панели (СП) при средней скорости ветра меньше 4 м/с (состояние атмосферы, приближенное к штилю) или больше 25 м/с (состояние атмосферы, приближенное к штормовым условиям).

Предусмотрена коррекция коэффициентов на основе метеорологических условий рассматриваемого участка территории:

$$\alpha(t) = \begin{cases} k_1, & \text{сухой сезон (ноябрь-апрель),} \\ k_2, & \text{влажный сезон (май-октябрь),} \end{cases}$$

где $\alpha(t)$ – весовой коэффициент, отражающий долю СП в общем количестве ВИЭ при удовлетворении ограничения $\alpha(t) = 1 - \beta(t)$, где $\beta(t)$ – весовой коэффициент, отражающий долю ВГ в общем количестве ВИЭ.

2 Концептуальная математическая модель выбора энергетических установок

Для формирования решения по выбору ЭУ необходимо построить математические модели, описывающие мощность, генерируемую ВИЭ (СП и ВГ).

Причинами применения СП на территории Кубы являются: равномерное распределение солнечной энергии в течение дня; минимальные требования к инфраструктуре при установке и эксплуатации; низкие эксплуатационные расходы, в т.ч. из-за отсутствия подвижных частей; высокий срок эксплуатации (более 25 лет).

Причинами применения ВГ на территории Кубы являются: возможность генерации больших объёмов энергии; возможность эксплуатации в тёмное время суток; возможность эксплуатации в широком диапазоне погодных условий; возможность создания крупных ветропарков.

Удельная мощность ветрового потока $E_{ВГуд.}$ со средней скоростью v через единичную площадь определяются по формуле [17]: $E_{ВГуд.} = 0,5 \cdot \rho \cdot v^3$, где ρ – плотность воздуха, равная $1,225 \text{ кг/м}^3$; v – средняя скорость потока ветра, м/с.

Для СП известно, что каждое повышение температуры поверхности солнечного модуля на 1°C по сравнению со стандартной температурой, равной 25°C , приводит к снижению его коэффициента полезного действия (КПД) на $0,5\%$ [18].

Влияние температуры на эффективность СП можно проанализировать с помощью следующего выражения [19]: $\eta_{СП_0} = \eta_{СП^*} (1 - \beta^* \cdot (T_{СП} - T^*))$, где $\eta_{СП_0}$ – КПД СП при температуре окружающей среды; $\eta_{СП^*}$ – КПД СП для рассматриваемой модели; β^* – коэффициент температуры для эффективности ячейки (обычно $0,004 \dots 0,005^\circ\text{C}$); $T_{СП}$ – температура поверхности СП; T^* – эталонная температура (25°C).

Мощность, генерируемая СП, может быть выражена в следующем виде: $E_{СП}(x, y, t) = G(x, y, t) \cdot A_{СП} \cdot \eta_{СП}$, где G – интенсивность солнечного излучения на заданном участке территории, Вт/м^2 ; $A_{СП}$ – общая площадь СП на рассматриваемом участке территории, м^2 ; $\eta_{СП}$ – КПД СП; x и y – географические координаты территории; t – время.

КПД СП, кроме температуры, зависит от облачности: $\eta_{СП} = f_{СП} \cdot \eta_{СП_0}$, где $f_{СП}$ – коэффициент, показывающий долю КПД от исходного значения в зависимости от облачности (C). Установлены следующие значения $f_{СП}$ [20, 21]: если $C \leq 50\%$, то $f_{СП} = 1$; если $50 < C \leq 70\%$, то $f_{СП} = 0,5$; если $70 < C \leq 90\%$, то $f_{СП} = 0,3$; если $90 < C \leq 100\%$, то $f_{СП} = 0,1$.

Мощность, генерируемая ВГ, может быть выражена в следующем виде: $E_{ВГ}(x, y, t) = 0,5 \cdot \rho \cdot v(x, y, t)^3 \cdot \eta_{ВГ} \cdot A_{ВГ} \cdot k$, где $\eta_{ВГ}$ – КПД ВГ; $A_{ВГ}$ – общая площадь роторов ВГ на рассматриваемом участке территории, м^2 ; k – $0,998^1$ (корректировка на климатический тренд). КПД ВГ зависит от скорости ветра: $\eta_{ВГ} = f_{ВГ} \cdot \eta_{ВГ_0}$, где $f_{ВГ}$ – коэффициент, показывающий долю КПД от исходного значения в зависимости от значения скорости ветра (v , м/с).

Установлены следующие значения $f_{ВГ}$ [22]: если $v \geq 4$, то $f_{ВГ} = 1$; если $3 \leq v < 4$, то $f_{ВГ} = 0,5$; если $2 \leq v < 3$, то $f_{ВГ} = 0,3$; если $v < 2$, то $f_{ВГ} = 0,1$.

Площадь ротора ВГ с горизонтальной осью вращения: $A_{ВГ} = \frac{\pi D^2}{4}$, где D – диаметр ветроколеса, м.

Модель для выбора оптимальной системы ВИЭ может быть представлена в следующем виде: $E_{ВИЭ}(x, y, z) = \alpha \cdot E_{СП}(x, y, t) + \beta \cdot E_{ВГ}(x, y, t)$, где $\alpha, \beta \in [0, 1]$ – весовые коэффициенты (зависят от приоритетов системы электроснабжения); z – критерии эффективности.

Функция полезности задаётся расстоянием Чебышева как разность значений рассчитанных показателей мощности, генерируемой ВИЭ, и нормированных идеальных значений, то есть требуется минимизировать расстояние Чебышева до желаемых показателей:

$$E_{ВИЭ} = \min_{x \in X} \max_{i=1, \dots, n} \left[\left| E_{СП_i} - E_{СП_i}^* \right|, \left| E_{ВГ_i} - E_{ВГ_i}^* \right| \right], \quad (1)$$

где X – множество возможных решений; n – количество вариаций $E_{СП}$, $E_{ВГ}$; $E_{СП} = (E_{СП1}, E_{СП2}, \dots, E_{СПn})$, $E_{ВГ} = (E_{ВГ1}, E_{ВГ2}, \dots, E_{ВГn})$ – вариации мощностей, генерируемых солнечной и ветровой подсистемами системы ВИЭ для удовлетворения потребностей объектов, соответственно; $E_{СП}^*$, $E_{ВГ}^*$ – требуемые мощности, генерируемые солнечной и ветровой подсистемами системы ВИЭ для удовлетворения потребностей объектов, соответственно. Задача сводится к

¹ По данным *NASA GISS* (<https://www.giss.nasa.gov/>) наблюдается снижение средней скорости ветра на $0,2\%$ в год за 1980 – 2020 гг. Соответственно, необходима корректировка математической модели путём введения коэффициента для учёта данного тренда.

поиску таких значений $E_{СП}$, $E_{ВГ}$, при которых наибольшее отклонение по любой вариации минимально.

Критерий решения для оптимального размещения ВИЭ представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} \text{Выбор солнечной панели, если } C < 0,5; \\ \text{Выбор ветрогенератора, если } v > 4; \\ \text{Гибридная система, иначе.} \end{cases}$$

3 Пример для Республики Куба

Электроэнергетическая система представляет собой комбинацию подсистем теплоэлектростанций и ВИЭ. Периодически возникает необходимость восполнения дефицита электроэнергии путём использования ВИЭ. Перебором вариантов формируется оптимальное решение по использованию в подсистеме ВИЭ того или иного вида ВИЭ или её гибридного варианта. Гибридные подсистемы, хотя и обеспечивают более стабильное энергоснабжение, требуют больших начальных инвестиций и более сложного технического обслуживания. Выбор между СП, ВГ или гибридной системой зависит от ряда факторов. Куба расположена в тропическом климатическом поясе, где высокий уровень солнечного излучения сохраняется в течение всего года, что обуславливает выбор в пользу СП как эффективного источника энергии. При этом остров подвержен пассатным ветрам, что создаёт хорошие условия для использования ВГ. Распределение ветровых ресурсов может быть неравномерным по территории острова. Территория Республики Куба условно поделена на четыре зоны (рисунок 3). Для анализа территории с целью выбора наиболее подходящего ВИЭ используется пространственно-временная сетка с разрешением 10×10 км, временной шаг – 3 часа.

Для моделирования задачи выбрано по одной ячейке в каждой зоне (ячейки с чёрной заливкой на рисунках 4, 5). Метеорологическими параметрами каждой ячейки являются: интенсивность солнечного излучения (G , Вт/м²); скорость ветра (v , м/с); облачность (C , %); температура воздуха (T , °С). Необходимые параметры для ячейки получены при помощи инструмента для визуализации прогнозов погоды «Windy» - <https://www.windy.com/> (рисунки 4-5, таблица 1).

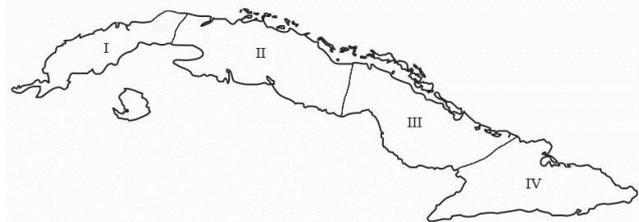


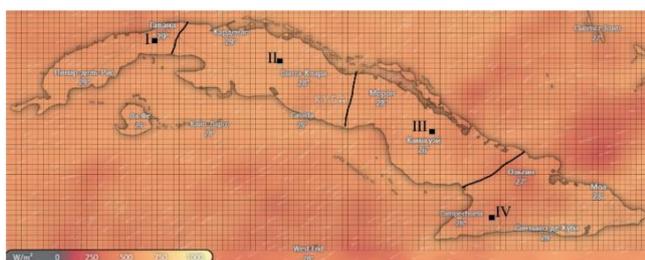
Рисунок 3 – Схема деления Республики Куба на зоны

Схема алгоритма формирования решений при выборе ЭУ представлена на рисунке 6.

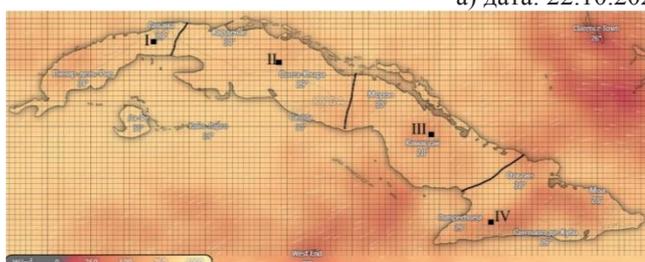
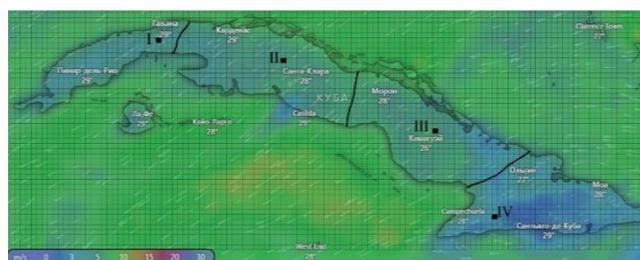
Рассмотрены условия задачи, когда для отмеченных ячеек в зонах требуется, чтобы мощность электроэнергии, генерируемой ВИЭ, составляла 80 кВт. Пусть $E_{СП}^*$ и $E_{ВГ}^*$ равны 80 кВт, а в связи с погодными условиями может отсутствовать один из рассматриваемых ресурсов. В качестве примера приведён расчёт $E_{СП}$ и $E_{ВГ}$ для ячейки зоны I, которая характеризуется следующими метеорологическими параметрами: интенсивность солнечного излучения 520 Вт/м²; средняя скорость ветра 4,8 м/с; облачность 15 %.

На основе приведённых данных произведён расчёт мощностей, генерируемых подсистемами ВИЭ для ячейки зоны I по вышеприведённым формулам на 22.10.2025 в 11:00:

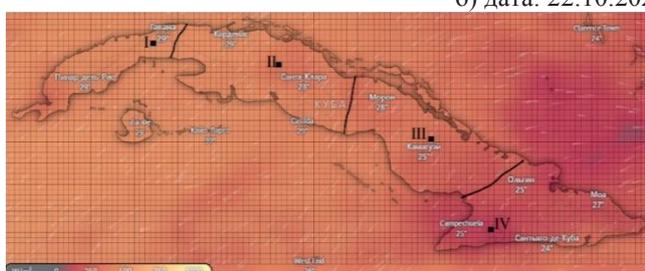
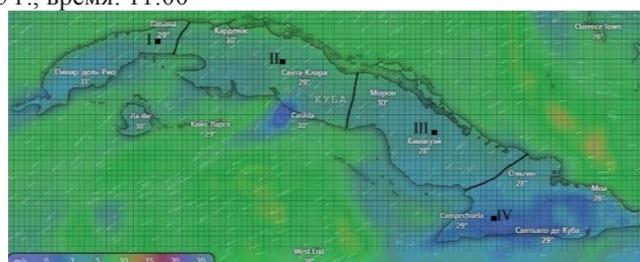
$$\begin{aligned} \eta_{СП} &= 1 \cdot 0,2 \cdot (1 - 0,005 \cdot (29 - 25)) = 0,196; \quad \eta_{ВГ} = 1 \cdot 0,3 = 0,3; \\ E_{СП} &= 650 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot 1000 \text{ м}^2 \cdot 0,196 = 101,9 \text{ кВт}; \\ E_{ВГ} &= 0,5 \cdot 1,225 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot (4,8 \text{ м} / \text{с})^3 \cdot 0,3 \cdot 1500 \text{ м}^2 = 30,5 \text{ кВт}. \end{aligned}$$



а) дата: 22.10.2025 г., время: 11:00



б) дата: 22.10.2025 г., время: 14:00



в) дата: 22.10.2025 г., время: 17:00

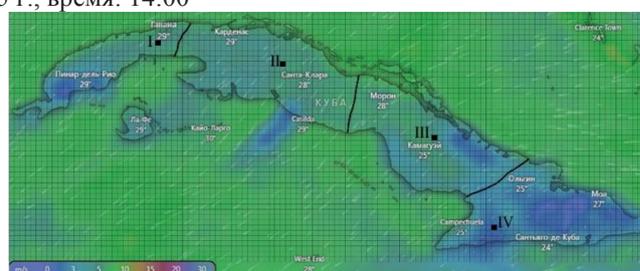


Рисунок 4 – Отображение распределения интенсивности солнечного излучения и температуры окружающего воздуха на территории Кубы с интервалом времени 3 часа

Рисунок 5 – Отображение распределения скорости ветра и температуры окружающего воздуха на территории Кубы с интервалом времени 3 часа

Таблица 1 – Метеорологические параметры ячеек, полученные при помощи портала «Windy»

Но- мер зоны	22.10.2025 11:00				22.10.2025 14:00				22.10.2025 17:00			
	G, Вт/м ²	T, °C	v, м/с	C, %	G, Вт/м ²	T, °C	v, м/с	C, %	G, Вт/м ²	T, °C	v, м/с	C, %
I	520	29	4,8	15	800	29	5,1	2	500	29	4,8	2
II	600	28	4,8	28	740	28	5	32	270	28	5	45
III	570	26	5,1	76	650	26	4	99	270	26	4	56
IV	490	28	3	53	520	28	1,8	97	100	28	1,5	80

Результаты расчёта для всех ячеек приведены в таблице 2.

Для подбора оптимальных значений α и β на основе минимизации расстояния Чебышева (1) написан скрипт в *Matlab* (см. рисунок 7). Результаты расчётов с применением скрипта для выбранных ячеек рассматриваемых зон приведены в таблице 3.

На основе полученных результатов построена карта с распределением подсистем ВИЭ на территории Кубы в разные временные периоды (рисунок 8).

В ячейке зоны IV наиболее предпочтительным ВИЭ для восполнения дефицита энергии являются СП во все рассмотренные временные периоды. В ячейках остальных зон предпочтение отдаётся либо гибридным системам, либо одному из доступных видов ЭУ.

Анализ полученных результатов показал, что использование одного вида ВИЭ при наблюдаемых метеорологических условиях может не обеспечить требуемую мощность.

В таких случаях целесообразно использовать мощность ВИЭ, размещённых в соседних ячейках, где в этот же период времени могут наблюдаться метеорологические условия, способствующие генерации большей мощности ВИЭ.

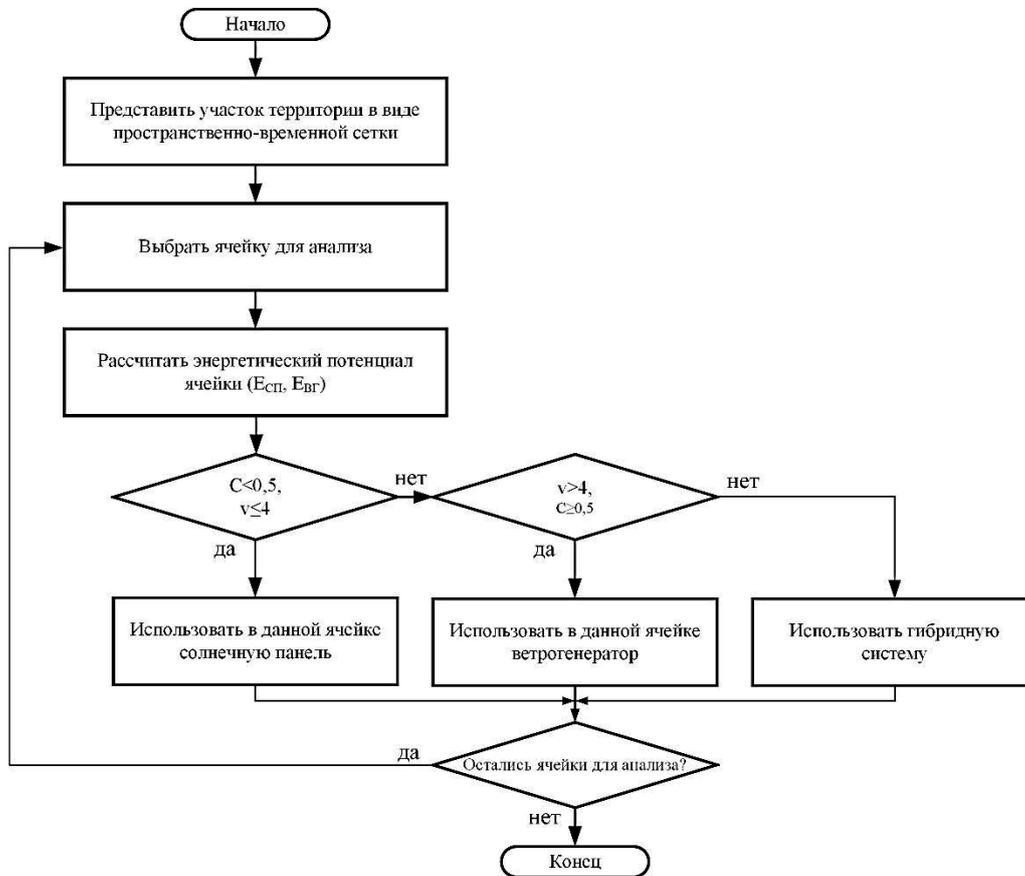


Рисунок 6 – Схема алгоритма формирования решений при выборе энергетических установок

Таблица 2 – Результаты расчёта мощностей, генерируемых солнечной и ветровой подсистемами электроэнергетической системы

Номер зоны	$f_{СП}$	$\eta_{СП}$	$E_{СП}, кВт$	$f_{ВГ}$	$\eta_{ВГ}$	$E_{ВГ}, кВт$
22.10.2025 11:00						
I	1	0,196	101,9	1	0,3	30,5
II	1	0,197	118,2	1	0,3	30,5
III	0,3	0,0597	34,0	1	0,3	36,6
IV	0,5	0,0985	48,3	0,5	0,15	3,7
22.10.2025 14:00						
I	1	0,196	156,8	1	0,3	36,6
II	1	0,197	145,8	1	0,3	34,5
III	0,1	0,0199	12,9	1	0,3	17,6
IV	0,1	0,0197	10,2	0,1	0,03	0,2
22.10.2025 17:00						
I	1	0,196	98,0	1	0,3	30,5
II	1	0,197	53,2	1	0,3	34,5
III	0,5	0,0995	26,9	1	0,3	17,6
IV	0,3	0,0591	5,9	0,1	0,03	0,1

```

>> % Исходные данные
E_target = 80;           % Требуемая мощность ВИЭ
Esp_star = 80;          % Требуемая мощность СП
Evh_star = 80;          % Требуемая мощность ВГ
Esp = 101.9;            % Существующая мощность СП
Evh = 30.5;             % Существующая мощность ВГ
C = 0.15;               % Облачность
v = 4.8;               % Скорость ветра

% Инициализация оптимальных значений
optimal_alpha = NaN;
optimal_beta = NaN;
best_error = Inf;      % Хранит минимальное найденное отклонение

% Проверка специальных случаев
if C < 0.5 && v <= 4
    % Используется только ЕСП
    E = Esp;
    optimal_alpha = 1;      % Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕСП
    optimal_beta = 0;
    disp('Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕСП');
elseif v > 4 && C >= 0.5
    % Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕВГ
    E = Evh;
    optimal_alpha = 0;      % Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕВГ
    optimal_beta = 1;
    disp('Весь вклад в требуемую мощность ВИЭ вносит ЕВГ');
else
    % Подбираем оптимальное сочетание для достижения значения E_target
    alpha_range = linspace(0, 1, 1000); % Возможные значения альфа

    % Рассматриваем возможные значения альфа
    for i = 1:length(alpha_range)
        alpha = alpha_range(i);
        beta = 1 - alpha;      % Так как поставлено условие « $\alpha + \beta = 1$ »
        E_current = alpha * Esp + beta * Evh;

        % Оцениваем отклонение от цели
        error = abs(E_current - E_target);

        % Выбираем наилучшее решение
        if error < best_error
            best_error = error;
            optimal_alpha = alpha;
            optimal_beta = beta;
            E = E_current;
        end
    end
end

% Выводим результат
fprintf('Оптимальные коэффициенты:\n');
fprintf('Альфа ( $\alpha$ ): %.4f\n', optimal_alpha);
fprintf('Бета ( $\beta$ ): %.4f\n', optimal_beta);
fprintf('Итоговая мощность: %.4f\n', E);

```

Рисунок 7 – Скрипт для подбора оптимальных значений α и β (Matlab)

Для детальной проработки оптимального решения необходимо учитывать следующее: стоимость установки и обслуживания каждого типа ВИЭ; доступность ресурсов (солнечной энергии и ветра) в разных регионах Кубы; текущую энергетическую инфраструктуру и потребности в энергии.

Выбор только одного вида ВИЭ по сравнению с использованием гибридной системы обусловлен рядом преимуществ:

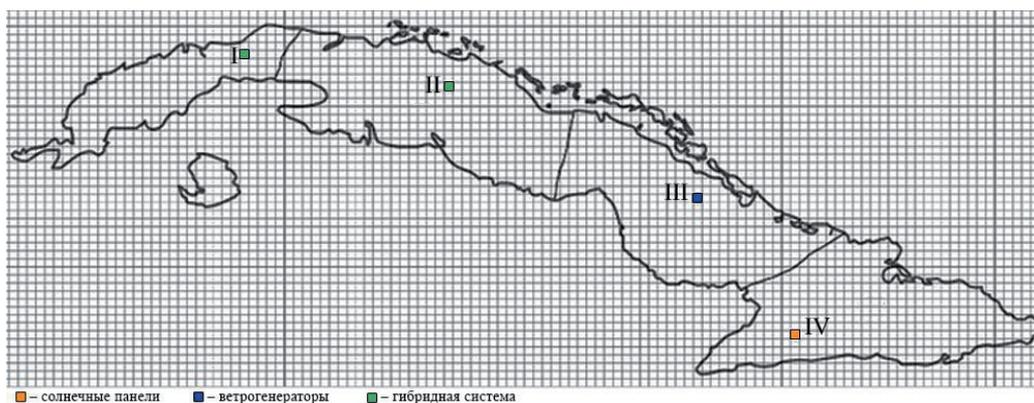
- внедрение одной технологии может быть менее капиталоемким на начальном этапе;
- стоимость закупки и обслуживания одного вида ЭУ может быть ниже в зависимости от выбранного региона и условий эксплуатации;
- ЭУ на основе одного типа энергии могут быть проще в обслуживании;
- для ремонта и обслуживания гибридных систем требуются специалисты широкого профиля;
- в разных регионах территории может быть предпочтительно использование определенных типов ВИЭ;
- выбор одной технологии может зависеть от специфики энергопотребления в различных частях острова.

Начав с одного вида ВИЭ, можно поэтапно наращивать мощности, прежде чем переходить к более сложным гибридным системам. Это позволяет гибко подходить к распределению ресурсов и корректировать стратегию развития энергетики в зависимости от полученных результатов. Гибридные подсистемы, обеспечивая стабильное энергообеспечение, зависят от корректной работы всех компонентов. Отказ одного из источников энергии в гибридной подсистеме может потребовать сложных решений для поддержания работы системы в целом.

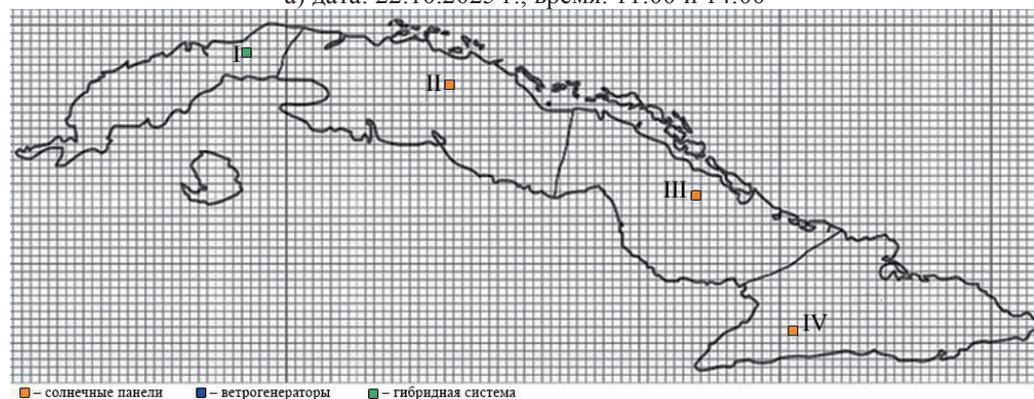
Таблица 3 – Результаты формирования решения при выборе энергетических установок

Номер зоны	α	β	$E_{ВИЭ}$, кВт	Рекомендуемая подсистема ВИЭ
22.10.2025 11:00				
I	0,69	0,31	80,03	Гибридная
II	0,56	0,44	80,01	Гибридная
III	0	1	36,60	Ветрогенераторы
IV	1	0	48,30	Солнечные панели
22.10.2025 14:00				
I	0,36	0,64	80,04	Гибридная
II	0,41	0,59	79,96	Гибридная
III	0	1	17,60	Ветрогенераторы
IV	1	0	10,20	Солнечные панели
22.10.2025 17:00				
I	0,73	0,27	80,03	Гибридная
II	1	0	53,20	Солнечные панели
III	1	0	26,90	Солнечные панели
IV	1	0	5,90	Солнечные панели

В долгосрочной перспективе гибридные системы могут обеспечить более устойчивое и надёжное энергообеспечение, особенно в условиях изменчивости погодных условий. Поэтому после анализа эффективности отдельных систем можно рассмотреть возможность их комбинирования для создания более устойчивой энергетической инфраструктуры.



а) дата: 22.10.2025 г., время: 11:00 и 14:00



б) дата: 22.10.2025 г., время: 17:00

Рисунок 8 – Распределение подсистем ВИЭ на территории Кубы

Заключение

В работе рассмотрены критерии размещения ВИЭ, предложен алгоритм формирования решений при выборе ЭУ, сформулированы проектные предложения по размещению солнечных и ветряных электростанций.

Представленный подход позволяет обоснованно подойти к выбору ЭУ, использующих возобновляемые ресурсы (солнечную энергию и/или ветер), и размещать на местности для повышения ресурсной эффективности территории с учётом удовлетворения территориальных потребностей.

Список источников

- [1] **Соколов М.М.** Как добиться снижения энергоёмкости экономики в России. *Геоэкономика энергетики*. 2022. №4. С.124-151. DOI: 10.48137/26870703_2022_20_4_124.
- [2] **Терентьева А.С., Гайворонская М.С.** Перспективы энергоснабжения регионов России в условиях реализации климатической политики и энергоперехода. *Экономические и социальные проблемы России*. 2025. №1(61). С.65-80. DOI: 10.31249/espr/2025.01.04.
- [3] **Сендеров С., Рабчук В.** Энергетическая безопасность сегодня и основные методики ее обеспечения. *Энергетическая политика*. 2022. №11(177). С.56-69. DOI: 10.46920/2409-5516_2022_11177_56.
- [4] **Булганина Д.А., Семёнова Ю.Е.** Проблема функционирования энергетического комплекса России в условиях экономической турбулентности. *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. 2022. №8(66). С.11-17. DOI: 10.47581/2022/IE-08/Bulganina.01.
- [5] **Атаев М.Г., Мухамметназаров А.С., Эсенов М.П.** Переход к возобновляемым источникам энергии. *Научный журнал «CETERIS PARIBUS»*. 2024. №10. С.26-28.
- [6] **Любимова Н.Г., Флакман А.С.** Последствия использования возобновляемых источников энергии. *Вестник ГУУ*. 2024. №3. С.95-101. DOI: 10.26425/1816-4277-2024-3-95-101.
- [7] **Байдаров Д.Ю., Григорьев А.С., Лосев О.Г., Сафронова Н.Н., Тутнов И.А.** Перспектива практического применения энергетических установок и комплексов энергоснабжения малой мощности. *Надежность и качество сложных систем*. 2024. №4(48). С.130-139. DOI: 10.21685/2307-4205-2024-4-15.
- [8] **Дзюба А.П., Соловьева И.А., Семиколенов А.В.** Перспективы внедрения активных энергетических комплексов в промышленность России. *Journal of new economy*. 2022. №2. С.80-101. DOI: 10.29141/2658-5081-2022-23-2-5.
- [9] **Воронин С.М., Эвиев В.А., Салаев Б.К., Юдаев И.В.** Энергетика Республики Калмыкия. Состояние и перспективы. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2024. №5(77). С.325-336. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-37.
- [10] **Самойленко В.С., Федотова А.Ю.** Архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. №8(146). С.87. DOI: 10.60797/IRJ.2024.146.10.
- [11] **Дятчина А.В., Олейникова С.А., Недикова Т.Н.** Разработка проблемно-ориентированной системы для решения оптимизационной задачи управления потоком поступающих заявок. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2023. №4. С.37-43. DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.4.005.
- [12] **de Weck O., Roos D., Magee C.** *Engineering Systems*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2011. <https://mitpress.mit.edu/9780262529945/engineering-systems/>.
- [13] **Родзин С.И., Боженик А.В., Кравченко Ю.А., Родзина О.Н.** Методы нечеткого многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации при чрезвычайных ситуациях. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2023. №2(232). С.186-200. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-186-200.
- [14] **Jebaselvi G.D.A., Paramasivam S.** Analysis on renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. №28. P.625-634. DOI: 10.1016/J.RSER.2013.07.033.
- [15] **Maheri A.** Multi-objective design optimisation of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties. *Renewable Energy*. 2014. №6(66). P.650-661. DOI: 10.1016/j.renene.2014.01.009.
- [16] **Ribeiro V., Arzola-Ruiz J., Garcia-Marrero L.E., Oliva-Merencio D.** Modelado matemático para la selección óptima de instalaciones energéticas y su esquema de solución. *Ingeniería Mecánica*. 2018. Vol. 22. №1. P.23-31.
- [17] **Квитко А.В., Хицкова А.О.** Характеристики ветра, особенности расчёта ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики. *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2014. №97. С.359-374.

- [18] **Davis M.W., Fanney A.H., Dougherty B.P.** Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2001. №123(3). P.200–210.
- [19] **Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б.** Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счёт снижения температуры поверхности. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. №2. С.489-499.
- [20] **Кубова Р.М., Кубова К.В., Павленко А.А.** Оценка влияния статистических характеристик облачности на инсоляцию фотобатарей. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2014. №5(8). С.136-143.
- [21] **Усков А.Е., Буторина Е.О., Беспалов Е.Г.** Потенциал, особенности работы и экономическая эффективность солнечных фотоэлектрических станций. *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2014. №98. С. 342-352.
- [22] **Адилбеков Е.К.** Режим ветра и оценка ветроэнергетического потенциала на территории учебного центра Военного института Сухопутных войск Республики Казахстан. *Гидрометеорология и экология*. 2019. №1(92). С.34-43.

Сведения об авторах



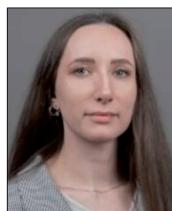
Арсола-Руис Хосе. Окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого в 1971 г., к.т.н. (1982). Профессор кафедры машиностроения факультета машиностроения Технологического университета Гаваны «Хосе Антонио Эчеверриа» (CUJAE). В списке научных трудов более 200 работ в области анализа и синтеза инженерных систем. Author ID (Scopus): 57194702773; ORCID ID: 0000-0002-4101-878X; josearzolaruiz1945@gmail.com.

Гарсия-Марреро Луис Энрике. Окончил Институт технологий и прикладных наук Технологического университета Гаваны «Хосе Антонио Эчеверриа» (CUJAE) в 2016 г., Университет Ольгины в 2020 г. В настоящее время обучается в аспирантуре по направлению «Электротехника» в Парижском университете *CY Cergy* и изучает производство фотоэлектрической энергии в Университете Салерно. В списке научных трудов более 20 работ, посвящённых структурированию данных, алгоритмам, методам оптимизации, машинному обучению и системам возобновляемых источников энергии. Author ID (Scopus): 57226878489; ORCID: 0000-0001-6710-4072; lgarciamarrero@unisa.it.



Полюхович Максим Алексеевич. Окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ) в 2018 г., к.т.н. (2023). Доцент Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института СПбПУ. В списке научных трудов более 60 работ в области обеспечения безопасности электроснабжения, системного моделирования, создания систем поддержки принятия решений. Author ID (РИНЦ): 1048304; Author ID (Scopus): 57212553296, ORCID: 0000-0003-2722-5552; Researcher ID (WoS): AAE-1582-2019. polyuhovich_ma@spbstu.ru. ✉

Валенте Рибейро Мухонго. Окончил Астраханский государственный технический университет в 1994 г., к.т.н. (2019). Профессор кафедры механики Политехнического института Университета Катавала Бвила (UKB). Научные труды посвящены анализу и синтезу технических систем, возобновляемой энергетике. ORCID: 0000-0001-8729-6884; varmuhongo@yahoo.com.br.



Логвинова Юлия Валерьевна. Окончила СПбПУ в 2016, к.т.н. (2025). Старший преподаватель Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института СПбПУ. В списке научных трудов более 20 работ в области безопасности труда и оценки профессиональных рисков, моделирования сложных систем. Author ID (РИНЦ): 1026812; Author ID (Scopus): 57210916868; ORCID: 0000-0002-8392-1790; Researcher ID (WoS): F-9934-2019. logvinova_yuv@spbstu.ru.

Поступила в редакцию 28.06.2025, после рецензирования 28.10.2025. Принята к публикации 1.12.2025.



Formation of solutions for selecting energy installations for ensuring territorial energy efficiency

© 2026, J. Arzola-Ruiz¹, L.E. Garcia-Marrero², M.A. Polyukhovich³✉, V.R. Muhongo⁴, Yu.V. Logvinova³

¹ Technological University of Havana «José Antonio Echeverría» (CUJAE), Havana, Cuba

² University of Salerno, Fisciano, Italy

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

⁴ Katyavala Bwila University, Benguela, Angola

Abstract

The study is devoted to the development of an approach to ensuring the energy efficiency of a territory. The subject of the study is the modeling of the process of selecting the type and proportional composition of energy installations for various geographical areas within a territory. The research tasks included the analysis of criteria for the placement of energy installations, the algorithmization of decision-making, and the identification of design options for the deployment of solar and wind power plants. A mathematical model for searching solutions to meet energy consumers with the required capacity in a given territory is presented. The optimal solution for selecting energy installations is obtained using the Chebyshev distance. Efficiency criteria are defined that make it possible to formulate requirements for design solutions in the planning of an energy supply system. A dataset is identified and adjusted by the decision-maker to achieve a compromise between energy efficiency indicators. An algorithm for finding the optimal solution for the selection of energy installations under the imposed restrictions is developed. A set of criteria for the rational use of the territory's renewable resources is formed, enabling the selection of the type and number of energy installations (solar panels, wind turbines, or their hybrid configurations). The results of modeling the use of renewable energy sources in different territorial, taking into account various factors (solar radiation intensity, wind speed, etc.), are presented.

Keywords: decision-making, territorial energy efficiency, wind turbine, solar panel, renewable resource.

For citation: Arzola-Ruiz J, Garcia-Marrero LE, Polyukhovich MA, Muhongo VR, Logvinova YuV. Formation of solutions for selecting energy installations for ensuring territorial energy efficiency [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 111-124. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-111-124.

Financial Support: This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement № 075-15-2025-673 dated August 20, 2025).

Authors' contributions: Arzola-Ruiz J. – development of the research concepts; Garcia-Marrero LE. – development of mathematical models; Polyukhovich MA. – review of relevant studies; Muhongo VR. – modeling of the optimal selection problem for energy facilities; Logvinova YuV. – processing and analysis of the obtained results.

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

List of figures and tables

Figure 1 - Set of components of the territorial development system

Figure 2 - Sector coordination scheme for each zone

Figure 3 - Zoning scheme of the Republic of Cuba

Figure 4 - Spatial distribution of solar radiation intensity and ambient air temperature over the territory of Cuba with a 3-hour time interval

Figure 5 - Spatial distribution of wind speed and ambient air temperature over the territory of Cuba with a 3-hour time interval

Figure 6 - Algorithmic scheme for forming solutions in the selection of energy installations

Figure 7 - Script for selecting optimal values of α and β (Matlab)

Figure 8 - Distribution of renewable energy subsystems over the territory of Cuba

Table 1 - Meteorological parameters of grid obtained using the «Windy» portal

Table 2 - Results of calculating the capacities generated by the solar and the wind subsystem of the electric power system

Table 3 - Results of solution formation for the selection of energy installations

References

- [1] **Sokolov MM.** How to achieve a reduction in the energy intensity of the economy in Russia [In Russian]. *Geoeconomics of energy*. 2022; 4: 124-151. DOI: 10.48137/26870703_2022_20_4_124.
- [2] **Terentyeva AS, Gaivoronskaya MS.** Prospects for energy supply to Russian regions in the context of implementing climate policy and energy transition [In Russian]. *ESPR*. 2025; 1(61): 65-80. DOI:10.31249/espr/2025.01.04.
- [3] **Senderov S, Rabchuk V.** Energy security today and the main methods of its provision [In Russian]. *EP*. 2022; 11(177): 56-69. DOI: 10.46920/2409-5516_2022_11177_56.
- [4] **Bulganina DA, Semenova YuE.** The problem of functioning of the energy complex of Russia in conditions of economic turbulence [In Russian]. *Innovative economy: prospects for development and improvement*. 2022; 8(66): 11-17. DOI: 10.47581/2022/IE-08/Bulganina.01.
- [5] **Atayev MG, Mukhammetnazarov AS, Esenov MP.** Transition to renewable energy sources. [In Russian] *Scientific journal «CETERIS PARIBUS»*. 2024; 10: 26-28.
- [6] **Lyubimova NG, Flaksman AS.** Consequences of using renewable energy sources [In Russian]. *Bulletin of the State University of Management*. 2024; 3: 95-101. DOI:10.26425/1816-4277-2024-3-95-101.
- [7] **Baydarov DYU, Grigoriev AS, Losev OG, Safronova NN, Tutnov IA.** Prospects for the practical application of power plants and low-power energy supply complexes [In Russian]. *NiKSS*. 2024; 4(48): 130-139. DOI:10.21685/2307-4205-2024-4-15.
- [8] **Dzyuba AP, Solovieva IA, Semikolenov AV.** Prospects for the implementation of active energy complexes in Russian industry [In Russian]. *Journal of new economy*. 2022; 2: 80-101. DOI: 10.29141/2658-5081-2022-23-2-5.
- [9] **Voronin SM, Eviev VA, Salaev BK, Yudaev IV.** Power engineering of the Republic of Kalmykia. Status and prospects [In Russian]. *Izvestia NV AUK*. 2024; 5(77): 325-336. DOI:10.32786/2071-9485-2024-05-37.
- [10] **Samoylenko VS, Fedotova AYU.** Architecture of an intelligent decision support system [In Russian]. *MNIZH*. 2024; 8(146): 87. DOI:10.60797/IRJ.2024.146.10.
- [11] **Dyatchina AV, Oleynikova SA, Nedikova TN.** Development of a problem-oriented system for solving the optimization problem of managing the flow of incoming applications [In Russian]. *VSTU Bulletin*. 2023; 4: 37-43. DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.4.005.
- [12] **de Weck O, Roos D, Magee C.** Engineering Systems. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2011.
- [13] **Rodzin SI, Bozhenyuk AV, Kravchenko YuA, Rodzina ON.** Methods of fuzzy multi-criteria group decision making for evacuation problems in emergency situations [In Russian]. *Bulletin of SFedU. Technical sciences*. 2023; 2(232): 186-200. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-186-200.
- [14] **Jebaselvi GDA, Paramasivam S.** Analysis on renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 28: 625-634. DOI: 10.1016/J.RSER.2013.07.033.
- [15] **Maheri A.** Multi-objective design optimisation of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties. *Renewable Energy*. 2014; 6(66): 650-661. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2014.01.009.
- [16] **Ribeiro V, Arzola-Ruiz J, Garcia-Marrero LE, Oliva-Merencio D.** Mathematical modeling for the optimal selection of energy facilities and its solution scheme [In Spanish]. *Mechanical Engineering*. 2018; 22(1): 23-31.
- [17] **Kvitko AV, Khitskova AO.** Wind characteristics, features of resource calculation and economic efficiency of wind energy [In Russian]. *Scientific journal of KubSAU*. 2014; 97: 359-374.
- [18] **Davis MW, Fannery AH, Dougherty BP.** Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2001; 123(3): 200-210.
- [19] **Kirpichnikova IM, Makhsumov IB.** Improving the energy efficiency of solar modules by reducing the surface temperature [In Russian]. *Tula State University Bulletin. Technical Sciences*. 2020; 2: 489-499.
- [20] **Kubova RM, Kubova KV, Pavlenko AA.** Assessing the impact of cloud statistical characteristics on photovoltaic panel insolation. [In Russian] *Educational Resources and Technologies*. 2014; 5(8): 136-143.
- [21] **Uskov AE, Butorina EO, Bepalov EG.** Potential, operational features, and economic efficiency of solar photovoltaic power plants [In Russian]. *Scientific Journal of KubSAU*. 2014; 98: 342-352.
- [22] **Adilbekov EK.** Wind regime and assessment of wind energy potential on the territory of the training center of the Military institute of the Ground forces of the Republic of Kazakhstan [In Russian]. *Hydrometeorology and Ecology*. 2019; 1(92): 34-43.

About the authors

José Arzola-Ruiz graduated from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia) in 1971, PhD in Engineering (1982). He is a Professor of the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, José Antonio Echeverría Technological University of Havana (CUJAE). He is the author and a co-author of more than 200 publications in the field of analysis and synthesis of engineering systems. Author ID (Scopus): 57194702773; ORCID: 0000-0002-4101-878X; josearzolaruiz1945@gmail.com.

Luis Enrique Garcia-Marrero graduated from the Institute of Technology and Applied Sciences of the José Antonio Echeverría Technological University of Havana (Havana, Cuba) in 2016 and from the University of Holguín (Holguín, Cuba) in 2020. He is currently a PhD student in Electrical engineering at the CY Cergy Paris University (Cergy-Pontoise, France) and conducting research on photovoltaic energy generation at the University of Salerno (Fisciano, Italy). His list of publications includes more than 20 works devoted to data structuring, algorithms, optimization methods, machine learning, and renewable energy systems. Author ID (Scopus): 57226878489; ORCID: 0000-0001-6710-4072; lgarciamarrero@unisa.it.

Maxim Alekseevich Polyukhovich graduated from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia) in 2018, PhD in Engineering (2023). He is an Associate professor at the Higher School of Technosphere Safety, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. He is the author and a co-author of more than 60 publications in the field of power supply safety, system modeling, and decision support system development. Author ID (РИИЦ): 1048304; Author ID (Scopus): 57212553296, ORCID: 0000-0003-2722-5552; Researcher ID (WoS): AAE-1582-2019. polyuhovich_ma@spbstu.ru. ✉

Valente Ribeiro Muhongo graduated from Astrakhan State Technical University in 1994, PhD in Engineering (2019). He is a Professor of the Department of Mechanics, Polytechnic Institute, Katyavala Bwila University. His scientific works are devoted to the analysis and synthesis of technical systems and renewable energy. ORCID: 0000-0001-8729-6884; <https://www.researchgate.net/profile/Valente-Muhongo>. varmuhongo@yahoo.com.br.

Yulia Valeryevna Logvinova graduated from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia) in 2016, PhD in Engineering (2025). She is a Senior lecturer at the Higher School of Technosphere Safety, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. She is the author and a co-author of more than 20 publications in the field of occupational safety and professional risk assessment, as well as complex system modeling. Author ID (РИИЦ): 1026812; Author ID (Scopus): 57210916868; ORCID: 0000-0002-8392-1790; Researcher ID (WoS): F-9934-2019. logvinova_yuv@spbstu.ru.

Received June 28, 2025. Revised October 28, 2025. Accepted December 1, 2025.



Повышение достоверности ответов диалоговой модели с использованием формальных грамматик и теории категорий

© 2026, В.В. Антонов¹, Л.Е. Родионова¹✉, Е.В. Пальчевский², В.А.Суворова¹

¹Уфимский университет науки и технологий (УУНУТ), Уфа, Россия

²МИРЭА - Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия

Аннотация

Работа посвящена повышению достоверности ответов диалоговой модели для задач, требующих высокой точности. Предложен гибридный подход, сочетающий дообучение модели на специализированных данных с интеграцией формальных грамматик Хомского в процесс обработки запроса. Предложена архитектура, объединяющая формальный синтаксический контроль с генеративными возможностями дообученной модели ГигаЧат 2.0. В процесс обработки запроса включён модуль, реализующий предварительный анализ и фильтрацию запросов на основе контекстно-свободных грамматик Хомского. Для согласования работы генеративной модели с выявленной синтаксической структурой предложен двухуровневый механизм контроля. На входе синтаксически-обогащённый запрос направляет процесс на структурные паттерны запроса. На выходе модуль проверки осуществляет выбор и коррекцию ответа на основе формальных критериев. Для повышения объяснимости и формального анализа потоков данных использована теория категорий, где запросы, промежуточные представления и ответы моделируются как морфизмы и объекты категории. Для улучшения логической связности и учёта контекста предложено геометрическое представление семантики в пространстве Минковского, метрика которого позволяет разделять инвариантное значение слова и его контекстуально-временную динамику. Экспериментальная оценка на специализированном наборе из 500 фактологических и структурированных запросов показала, что предложенный метод снижает уровень генерации вымышленных утверждений на 22% по сравнению с базовой моделью ГигаЧат 2.0. Показано, что совместное использование формальных грамматик, категориального формализма и геометрической модели семантики позволяет повысить достоверность ответов в предметно-ориентированных диалогах.

Ключевые слова: достоверность ответов, диалоговая модель, трансформер, формальные грамматики Хомского, теория категорий, пространство Минковского, семантическое пространство.

Цитирование: Антонов В.В., Родионова Л.Е., Пальчевский Е.В., Суворова В.А. Повышение достоверности ответов диалоговой модели с использованием формальных грамматик и теории категорий. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.125-138. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-125-138.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания высшим учебным заведениям № FRRR-2026-0006.

Вклад авторов: Антонов В.В. – разработка структуры статьи и подбор источников; Родионова Л.Е. – подготовка примеров; Пальчевский Е.В. – разработка диалоговой модели; Суворова В.А. – верификация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Современный этап развития науки о данных характеризуется прогрессом в области обработки естественного языка (ЕЯ), ключевым элементом которого стали большие языковые модели (БЯМ) на основе трансформеров (<https://giga.chat/>, <https://deepseek.com.ru/>, <https://openai.com/> и др.) [1]. Российская модель ГигаЧат 2.0 (<https://giga.chat/>) оптимизирована

на для работы с русскоязычным контентом и предоставляет возможности для её дообучения, что обусловило её выбор в качестве базовой.

Основой развития трансформеров стало применение механизмов внимания, позволивших учитывать зависимости между словами и конструкциями текста. Благодаря этому удалось обеспечить «понимание» контекста и повысить точность моделей при выполнении сложных задач обработки ЕЯ. Примером является *Funnel-Transformer* [2], который показал превосходство над другими моделями в ряде задач, требующих анализа семантики текста. Особенностью данной модели является способность вначале сформировать обобщённое высокоуровневое представление контекста, а затем, при детальном анализе, извлекать необходимые подробности из первичного представления.

Распространение получили подходы, основанные на предобучении БЯМ, такие как *BERT*, *GPT* и др. Модели обучаются на больших объёмах неразмеченных данных, усваивая общие закономерности языка, и затем применяются для решения специфических задач. Это позволяет многократно использовать знания, заложенные в предобученных моделях, для адаптации их к прикладным задачам. Недостатком современных БЯМ является склонность к «галлюцинациям» – генерации правдоподобной, но фактически неверной (вымышленной) информации [1, 3]. В образовательных, экспертных и прикладных сценариях цена ошибки высока. Известные подходы к устранению проблемы требуют огромных затрат на разметку и не гарантируют достижения цели [4].

Методы повышения достоверности БЯМ можно разделить на классы с разным балансом между точностью, контролируемостью и вычислительной эффективностью.

- Тонкая настройка с использованием обучения с подкреплением на основе человеческих оценок (*RLHF*) – стандартный подход для моделей типа ГигаЧат [2, 4, 5].
- Генерация, дополненная поиском (*RAG*) – подход, при котором модели дополняют процесс генерации текста поиском информации во внешних базах знаний [5].
- Нейро-символьные гибриды - интеграция нейросетей с формальными системами [6, 7].
- Геометрические модели семантики - использование неевклидовых пространств (гиперболических, сферических) для представления иерархий и аналогий [8].
- Применение теории категорий в машинном обучении - категориальный подход используется для формализации архитектур, например, с применением математического аппарата к сложным структурам в [8].

Для диалоговых систем, основанных на БЯМ, необходимо обеспечить предсказуемость, контролируемость и достоверность генеративных компонент в условиях открытых предметных областей. Подходы к проектированию систем обработки ЕЯ, основанные на обучении на данных, не обеспечивают необходимый уровень формальной гарантии корректности. Существует потребность в методологиях проектирования, сочетающих гибкость нейросетевых моделей с детерминизмом формальных методов.

Настоящая работа направлена на разработку гибридного метода, который дополняет возможности генеративной трансформер-архитектуры (ГигаЧат 2.0) формальными механизмами контроля. В качестве таких механизмов предлагается использовать:

- формальные грамматики Хомского для синтаксического анализа и фильтрации входных запросов и выходных ответов;
- аппарат теории категорий для формализации процесса обработки данных и анализа потоков информации;
- геометрическую модель семантики на основе пространства Минковского для улучшения учёта контекста и логической связности.

1 Теоретические основы архитектуры трансформеров

Трансформеры представляют собой архитектурный паттерн для нейронных сетей, основанный на механизме самовнимания [9].

1.1 Общие положения

Базовый механизм внимания представляет собой следующее: для входной последовательности в виде матрицы векторные представления (слов, предложений, изображений и др.) X вычисляются три матрицы: запросов $Q = X * W_Q$, ключей $K = X * W_K$ и значений $V = X * W_V$, где W_Q, W_K и W_V – обучаемые матрицы параметров (весов), выполняющие роль линейных проекций. Веса внимания рассчитываются по формуле (1) скалярного произведения с последующим применением функции *Softmax* [9]:

$$Attention(Q, K, V) = V \cdot \text{Softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right), \tag{1}$$

где d_k – размерность ключей, W_Q, W_K и W_V – обучаемые матрицы параметров (весов), выполняющие роль линейных проекций; масштабирующий множитель $\frac{1}{\sqrt{d_k}}$ стабилизирует градиенты.



Рисунок 1 – Схема архитектуры гибридной системы с внешним контролем

Архитектура трансформера включает энкодер и декодер. Для задач генерации текста, включая диалоговые системы, наибольшее распространение получили авторегрессионные модели на основе декодера (например, семейство *GPT* [5]).

Такие модели, предобученные на корпусах текстов, научились генерировать связные, грамматически правильные и контекстуально уместные ответы. Категориальная модель системы с внешним контролем (см. рисунок 1) оперирует четырьмя ключевыми объектами: Q (исходный запрос), Q' (запрос, обогащённый синтаксическими аннотациями), A (черновой ответ генеративной модели) и A' (финальный верифицированный ответ).

Модуль постобработки представлен в модели морфизмом $f_3: A \rightarrow A'$. Такой подход позволяет сохранить наглядность категориального описания, фокусируясь только на входных и выходных состояниях системы.

Funnel-Transformer можно представить в виде двух частей: первая из них начинается с большого количества узлов, которое постепенно уменьшается, достигая самой узкой точки, после чего последующие слои вновь увеличивают количество узлов (см. рисунок 2): сначала происходит глобальное сжатие информации, затем добавляется локальная детализация. Эта архитектура обеспечивает баланс между скоростью обработки и точностью результата.

Для моделирования процесса преобразования данных применяется аппарат теории категорий [10, 11]. В данном подходе теория категорий служит для формального описания преобразований между различными представлениями данных, где основное внимание уде-

ляется морфизмам. В контексте обработки данных трансформером процесс перехода от исходных данных к подготовленным объектам формализуется через категорию C , объектами которой являются:

- K_1 – входные компоненты (слова, фразы, предложения);
- K_2 – правила формальных грамматик Хомского;
- K_3 – результаты преобработки.

Преобразования между этими объектами задаются морфизмами:

- $f_1: K_1 \rightarrow K_2$ – применение грамматических правил к входным данным;

- $f_2: K_2 \rightarrow K_3$ – преобразование синтаксических структур в векторные представления;
- $f_3 = f_2 \circ f_1: K_1 \rightarrow K_3$ – композиция преобразований морфизмов, удовлетворяющих условию коммутативности.

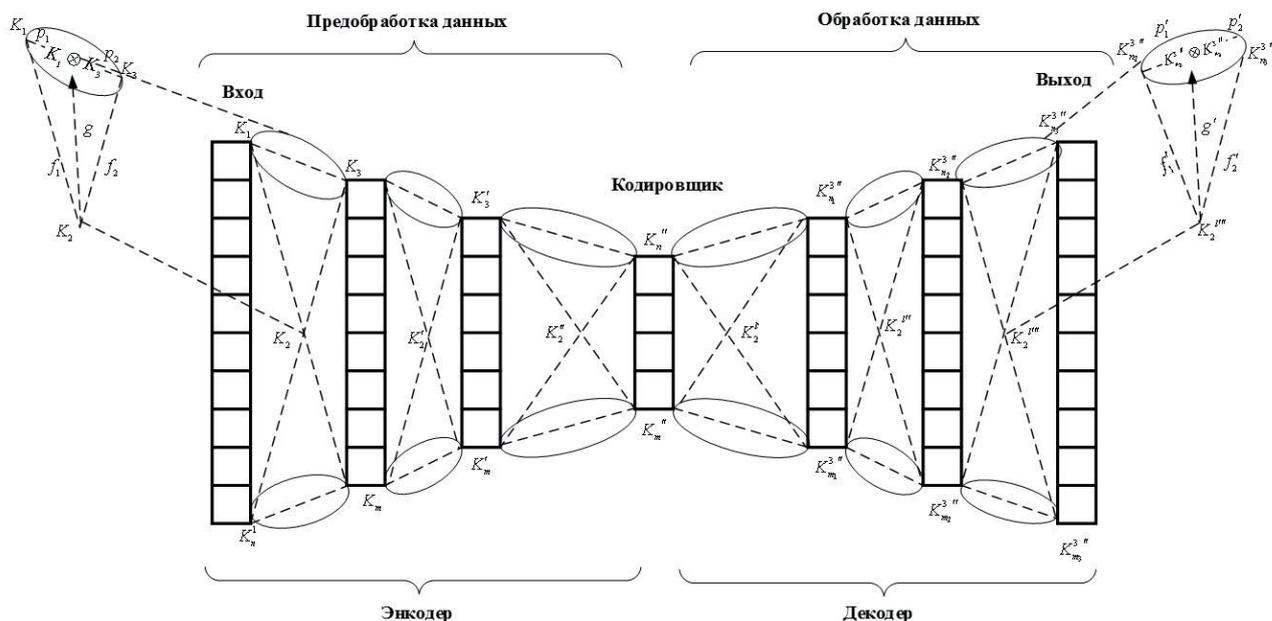


Рисунок 2 – Структура модели Funnel-Transformer

Данный процесс может быть представлен последовательностью коммутативных диаграмм, приведённых на рисунке 2. Процесс предобработки может быть описан через декартово произведение $K_1 \times K_2$, представляющее все возможные пары «входной компонент – грамматическое правило». Морфизм $g: K_1 \times K_2 \rightarrow K_3$, являющийся результатом процесса предобработки, обеспечивает переход к конечному представлению данных. Такой формализм позволяет:

- единообразно описывать этапы обработки данных;
- анализировать свойства композиции преобразований;
- выявлять инварианты архитектуры обработки.

В итоге переходы от одной диаграммы к следующей можно выражать через новую категорию C , включающую множество объектов $O = \{K_1, K_2, K_3\}$. Множество взаимодействий между этими категориями, внутри которых расположены информационные объекты, представимо коммутативным треугольником по категории и отдельным подкатегориям.

Категория K_2 образует класс объектов с заданным отношением для любых пар (K_2, K_1) и (K_2, K_3) , отношения которых определены множеством морфизмов (связи между элементами объектов): $\{f_1, f_2, p_1, p_2\}$. Процессы предобработки данных по правилам K_2 рассматриваются как взаимосвязанные процессы между входными компонентами K_1 и результатом предобработки данных K_3 . Объект, являющийся результатом такого взаимодействия, представляется декартовым произведением $g: K_2 \rightarrow K_1 \otimes K_3$, где \otimes – декартово произведение, g – единственный морфизм, связывающий результаты с процессом предобработки данных.

Процесс предобработки данных первого слоя нейронной сети соответствует отношениям, формализованным в виде морфизмов. Данные отношения обладают свойствами: результат взаимодействия информационных объектов может быть представлен декартовым произведением $K_1 \otimes K_3$ с морфизмами $p_1: K_1 \otimes K_3 \rightarrow K_1$ и $p_2: K_1 \otimes K_3 \rightarrow K_3$ такими, что для любого объекта K_2 с морфизмами $f_1: K_2 \rightarrow K_1$ и $f_2: K_2 \rightarrow K_3$ существует единственный морфизм $g: K_2 \rightarrow K_1 \otimes K_3$, при котором выделяется диаграмма в форме коммутативного треугольника.

Таким образом, обработка запроса формализована в терминах теории категорий, где объекты – ключевые представления данных в системе, морфизмы – преобразования между объектами, коммутативные диаграммы позволяют наглядно отследить соответствие между альтернативными путями обработки.

1.2 Физико-математический подход к обработке текстов

Физико-математический подход основывается на введении геометрических характеристик для анализа текстовых данных. Одним из центральных понятий здесь является про-

странство Минковского, где каждое слово или предложение представлено точкой в четырёхмерном пространстве.

Использование пространственно-временной размерности Минковского позволяет выстраивать пространственную конфигурацию, в которой каждая точка представляет собой событие, связанное с определённым входным компонентом (или результатом его предобработки). Такой подход обеспечивает построение набора данных на основе описания категориальных связей. Выстраивание пространственной конфигурации по Минковскому позволяет получить параллельное соотношение всех модулей и правил с использованием результатов предобработки в любой момент времени в виде набора данных, а выстраивание отношений с другими конусами позволяет определить новые правила, которые необходимы для предобработки следующих входных компонентов [12]. В таком пространстве каждому событию можно сопоставить точку, пространственные координаты которой описывают место, где событие произошло, а временная координата – временный компонент, когда оно случилось:

$K_1 = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$ – входные компоненты, представляющие множество вариантов запросов (текст, картинки, звуки, чертежи, алфавит и т.п.);

$K_2 = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_l\}$ – множество правил по формальным грамматикам Хомского;

$K_3 = \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_m\}$ – множество вариантов ответов.

Здесь n, l, m – мощности соответствующих множеств.

При анализе моделей обработки ЕЯ целесообразно классифицировать их по классам задач (классификация текста, анализ семантического сходства, машинный перевод, обработка разговорного языка) для решения которых они предназначены [13, 14].

Обучение представлений подразумевает извлечение и преобразование дискретных или сложных объектов, например, слов, предложений, изображений, в числовые векторные представления фиксированной размерности, которые могут быть перенастроены под различные задачи. Это свидетельствует о том, что модель может адаптироваться к требованиям конкретной предметной области. В результате снижается потребность в обширных размеченных данных для каждой задачи, поскольку базовые репрезентации уже содержат ключевые аспекты языка и его использования. Модели становятся более универсальными, способными решать сложные задачи с высокой степенью точности, опираясь на предшествующий опыт.

1.3 Семиотические аспекты обработки текста

ЕЯ задачи могут быть представлены семиотической системой связи [15, 16], которая представляет собой совокупность элементов, позволяющих передавать и интерпретировать информацию посредством символов, изображений, звуков, жестов и других знаковых форматов. В семиотических системах представлен обширный контекст, и результаты запросов могут быть разными, но сохранять основной смысл. При обратном запросе оригинальный текст не получится [17].

Семантическое пространство представляется формулой $S=(W, V)$, где: S – семантическое пространство, W – словарь, V – векторное пространство, в котором каждому слову сопоставляется вектор, отражающий его смысловые характеристики. Каждое слово w представляется точкой в пространстве Минковского с координатами (x, y, z, t) , где: x, y, z – пространственные координаты, зависящие от семантического смысла слова, t – временная координата, отражающая эпоху или контекст использования слова [12]. Пространство Минковского представляет собой четырёхмерное псевдоевклидово пространство-время, где метрика задаётся как: $ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$, где dx, dy, dz – разности пространственных координат (семантических измерений), dt – разность временной координаты (временного аспекта).

В контексте семантического пространства координаты x, y, z представляют семантическую близость слов (например, синонимия, родственные отношения, тематическая принадлежность) и зависят от семантических признаков. Чем ближе точки, тем более близкими по смыслу считаются слова, координата t отражает исторический контекст или временной период, в течение которого слово употреблялось или приобрело популярность. Большое значение t может означать, что слово старое или давно вышло из активного употребления.

Пусть имеется два слова w_1 и w_2 с координатами: $w_1=(x_1,y_1,z_1,t_1)$ и $w_2=(x_2,y_2,z_2,t_2)$. Интервал между ними составит: $ds^2(w_1,w_2)=(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2-(t_2-t_1)^2$. Пространственные координаты кодируют инвариантные семантические признаки слова, временная координата является мерой его контекстуальной, диахронической или прагматической модификации. Особенностью метрики является её способность различать два типа семантических отношений:

- Смысловая близость (положительный ds^2) достигается, когда совпадение по инвариантным семантическим признакам $(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2$ перевешивает контекстуально-временной разрыв $(t_2-t_1)^2$. Это соответствует случаю, когда слова являются синонимами или принадлежат одному семантическому полю.
- Смысловой разрыв или сдвиг (отрицательный ds^2) возникает, когда различия в контексте, эпохе или прагматике использования $(t_2-t_1)^2$ становятся настолько значимыми, что преобладают над формальной семантической схожестью.

Метрика Минковского расширяет модель семантического пространства, вводя в него конфликтующее измерение. Это позволяет более адекватно отражать сложность и нелинейность семантических связей в ЕЯ.

Пусть дано семантическое пространство S , представленное как векторное пространство над полем вещественных чисел. Вводится метрика, аналогичная метрике Минковского, и применяется к векторам слов. Тогда расстояние между двумя словами w_1 и w_2 определяется следующим образом [9]:

$$d(w_1, w_2)^2 = t_{w_1} w_1^T A^{-1} t_{w_2} w_2 - s_{w_1}^T B s_{w_2} ,$$

где t_w – представляет временную компоненту слова w , S_w – пространственный компонент (семантический вектор), A и B – положительно определённые матрицы, характеризующие влияние временной и пространственной компонент соответственно.

На рисунке 3 представлена структура объектов с правилами поиска и запроса для конкретного языка. Ответ осуществляется на языке запроса с возможностью перевода по лингвистическим правилам на другой язык [6, 18].

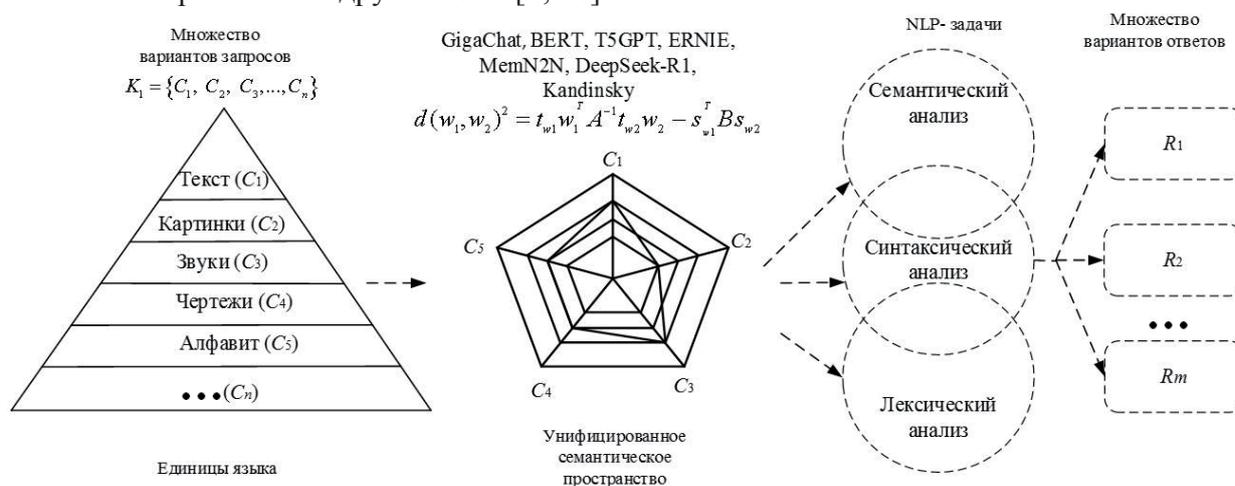


Рисунок 3 – Единое семантическое пространство для различных языковых структур

Исходный текст подаётся модели на начальном этапе обработки и преобразуется моделью в числовое представление в виде набора векторов, удобных для последующей обработки. Применяя ранее полученные знания с помощью механизма внимания, модель изменяет структуру полученного вектора таким образом, чтобы он соответствовал структуре текста на требуемом языке перевода. Итоговый вектор подвергается обратному преобразованию в читаемый текст на целевом языке. Модель выводит готовый перевод на целевом языке.

Формальные грамматики обеспечивают основу для анализа и генерации предложений, разбивая их на составляющие элементы и определяя правила их сочетания [19]. Грамматики Хомского могут применяться в контексте современных языковых моделей на основе трансформеров. Единицы языка состоят из компонентов: $G = \{N, T, P, S\}$, где: N – алфавит конкретных символов, формирующий конечный алфавит нетерминальных символов; T – конечный алфавит терминальных символов (совпадает с алфавитом языка, задаваемого грамматикой); P – правила вывода, морфология; S – начальный нетерминал грамматики G .

Граматики Хомского могут оказать существенную поддержку в снижении генерации недостоверных сведений.

1.4 Модели трансформеров

Модели, такие как *BERT*, используют только компонент энкодера. Это позволяет им эффективно выполнять задачи, такие как текстовая классификация, распознавание именованных сущностей и ответы на вопросы [20].

Модели типа *GPT* функционируют на основе декодера, что позволяет им успешно справляться с задачами, связанными с продолжением текста, ведением диалогов и оценкой вероятности текстов.

Таким образом, *BERT* ориентирован на анализ и классификацию, *GPT* специализируется на генерации текста и взаимодействии [21, 22].

Недостатки известных моделей: неустойчивость (потеря качества при изменении данных); предвзятость (модель даёт ответы, не соответствующие этике); нестабильность вывода (получение разных результатов запроса).

2 Особенности и результаты тестирования диалоговой модели

Для создания диалоговой модели использована БЯМ ГигаЧат 2.0, предназначенная для работы с ЕЯ. Модель основана на архитектуре трансформеров, схожей с семейством *GPT*, и способна решать широкий спектр задач [20].

Для работы с различной длиной входных данных и сохранения контекста в продолжительных диалогах применяется механизм направленного внимания, реализованный через синтаксически-обогащённый запрос. Модель включает внешние модули проверки достоверности, взаимодействующие с дополнительными источниками данных для верификации фактов. Механизм внимания предлагается использовать на этапе предобработки данных [23]. Это упрощает и ускоряет обработку, но появляется риск потери деталей и возможного ухудшения качества на коротких текстах. Важно внимательно подбирать архитектуру и настраивать гиперпараметры для оптимального баланса между скоростью и точностью обработки.

Построение компактного представления текста осуществляется через каскад блоков компрессии, которые уменьшают длину последовательности, при сохранении существенных признаков. Это может быть достигнуто введением функции компрессии $L(x)$ (см. рисунок 4). На каждом временном шаге t глобальная модель внимания вычисляет вектор веса выравнивания переменной длины α_t на основе текущего состояния цели h_t и всех состояний источ-

ника h_s [24]. Глобальный вектор контекста c_t вычисляется как средневзвешенное значение, согласно α_t по всем состояниям источника. Цель – получить вектор контекста на основе всех скрытых состояний кодирующей рекуррентной нейронной сети. Этот тип внимания охватывает всё пространство входных состояний [25, 26].

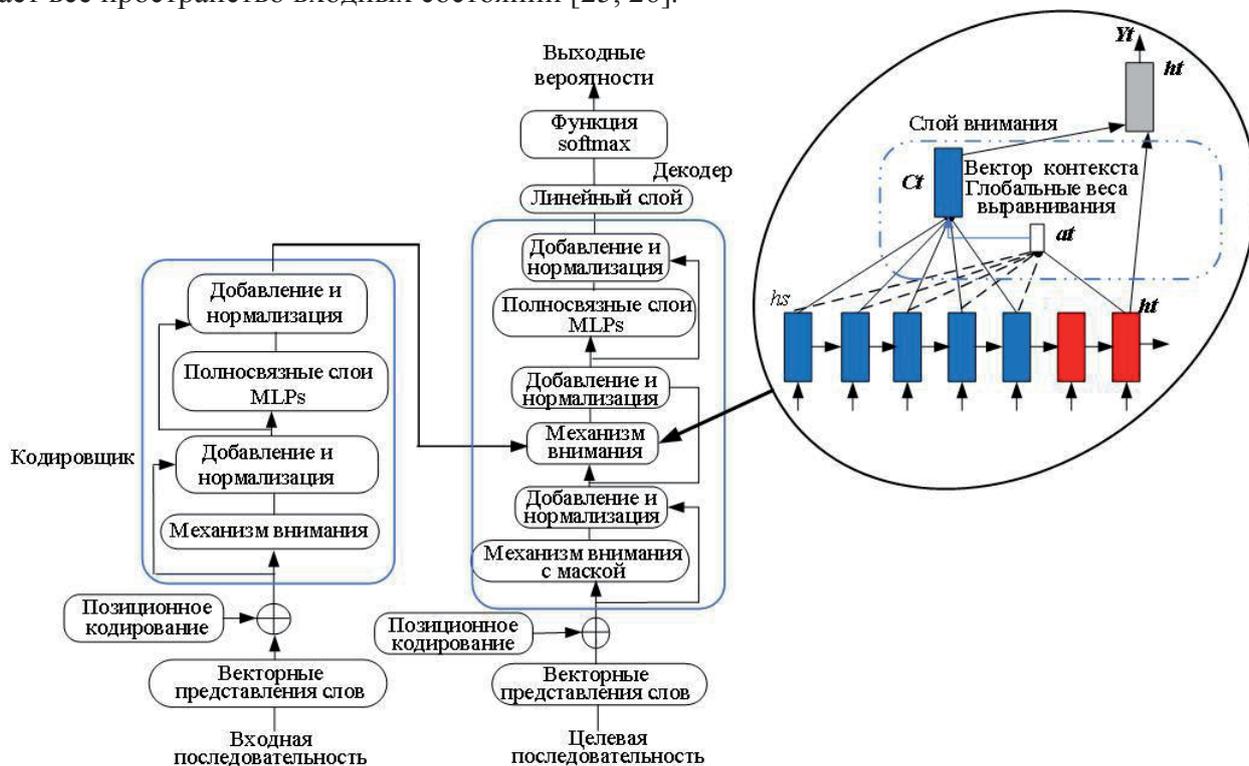


Рисунок 4 – Структура языковой модели с архитектурой трансформера

Алгоритм работы БЯМ включает: сбор данных; предобработку данных; работу диалоговой модели, имеющей архитектуру трансформера.

В ходе тестирования проверялись ключевые характеристики модели: качество генерации текста и правильность понимания вопросов; временные показатели откликов на запросы; надёжность предоставляемой информации.

Дообучение проведено на специализированном наборе данных объёмом около 15 000 пар «вопрос-ответ» из образовательной сферы (учебники по гуманитарным наукам, сборники задач). Для процесса дообучения модели использовался оптимизатор *AdamW* [27]. Для интеграции грамматических правил в процесс генерации использован механизм синтаксически-обусловленного внимания, который на этапе предобработки формирует синтаксические признаки размерностью 128 и использует их для направления фокуса модели на структурно корректные паттерны. Достоверность ответов определялась сочетанием трёх показателей: фактологическая точность – соответствие утверждений в ответе проверяемым фактам из авторитетных источников; логическая связность – отсутствие противоречий в ответе, соблюдение причинно-следственных связей и правил логики; синтаксическая и семантическая корректность – грамматическая правильность предложений и соответствие смысла запросу.

В качестве тестового использовался набор данных из 500 запросов трёх категорий: фактологические (200) – вопросы с однозначным проверяемым ответом; структурированные/логические (200) – математические задачи, задачи на логику, запросы на построение алгоритма; провоцирующие (100) – запросы, содержащие противоречия или отсылающие к несуществующим фактам (для оценки склонности к галлюцинациям).

Для оценки использовались следующие метрики: доля фактологически верных утверждений в ответе, доля вымышленных или неподтверждённых утверждений в ответе, оценка логической связности и последовательности ответа, среднее время генерации ответа. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментального сравнения

Модель	Доля фактологически верных утверждений в ответе	Доля вымышленных или неподтверждённых утверждений в ответе	Оценка логической связности и последовательности ответа	Среднее время генерации ответа
Baseline (ГигаЧат 2.0)	78.5%	18.2%	3.8	0.45
Предложенная модель	91.3%	7.1%	4.4	0.68

Полученные результаты позволяют сопоставить предлагаемую модель с другими подходами (см. таблица 2).

Таблица 2 – Качественное сопоставление подходов к обеспечению достоверности языковых моделей

Критерий / Метод	RLHF [4, 5]	RAG [5]	Нейро-символьные гибриды [6, 7]	Предлагаемый гибридный метод
Основной механизм	Смещение выхода через предпочтения	Поиск по внешним БЗ	Интеграция нейросетей с логич. правилами	Тройная интеграция: грамматики + категории + геом. модель
Фактологическая точность	Косвенно, через обратную связь	Высокая (за счёт БЗ)	Зависит от системы правил	Высокая (контроль на входе/выходе + RAG-верификация)
Синтаксический/ структурный контроль	Отсутствует	Отсутствует	Частичный (зависит от грамматик)	Высокий (формальные грамматики Хомского)
Объяснимость	Низкая («чёрный ящик»)	Средняя (можно указать источник)	Высокая (логический вывод)	Высокая (категориальная модель потоков)
Учёт контекста/связность	Высокий (за счёт обучения)	Ограничен контекстом запроса	Жёсткий (правила)	Высокий (геом. модель Минковского + генеративная БЯМ)
Вычислительная сложность	Очень высокая (обучение с подкр.)	Высокая (поиск + генерация)	Средняя-высокая	Средняя (увеличение ~50% к baseline, см. таблица 1)
Ключевое ограничение	Затраты на разметку, галлюцинации	Качество БЗ, связность текста	Жёсткость, сложность интеграции	Время отклика, творческие задачи

В отличие от *RLHF* и *RAG* предлагаемый метод обеспечивает системное преимущество в задачах, требующих одновременно высокой структурной корректности, фактологической точности и объяснимости. По вычислительной сложности метод занимает промежуточное положение: он легче масштабируемого сбора человеческих предпочтений (*RLHF*), но требует больше ресурсов, чем *RAG*. Таким образом, метод заполняет нишу проектирования контролируемых и верифицируемых диалоговых систем для предметно-ориентированных областей, где цена ошибки высока, а требования к корректности преобладают над требованиями к минимальной задержке.

Добавление модуля на основе грамматик Хомского даёт значительный прирост точности и снижает уровень галлюцинаций. Это подтверждает гипотезу о важности синтаксической

фильтрации. Улучшение качества сопровождается увеличением времени ответа (на ~50% с 0.45 до 0.68 с).

Эффективность предложенного подхода снижается в следующих условиях.

- При работе с творческими задачами (написание эссе, генерация художественных текстов), где строгий синтаксический контроль может ограничивать творчество.
- В условиях неопределённых или противоречивых запросов, когда грамматический анализ не позволяет однозначно классифицировать намерение пользователя.
- При обработке специализированной терминологии, не охваченной правилами грамматик Хомского.
- В сценариях реального времени с жёсткими требованиями к задержке, поскольку дополнительный модуль предобработки увеличивает время отклика на 15-20%.

Наибольшая эффективность достигается при работе со структурированными запросами: решение математических задач, проверка грамматики, фактологический поиск, технические консультации.

Заключение

Основными результатами работы являются следующие:

- разработана гибридная архитектура диалоговой модели на основе ГигаЧат 2.0 и интегрирующая формальные грамматики Хомского для синтаксического контроля на входе и выходе;
- предложено формальное описание работы диалоговой модели на языке теории категорий, что упрощает анализ потоков данных;
- осуществлено моделирование семантики в пространстве Минковского для отделения инвариантного значения языковых единиц от их контекстуально-временной динамики, что улучшает логическую связность ответов;
- предложенный гибридный метод может снижать уровень галлюцинаций и повышать фактологическую точность и логическую связность ответов.

Список источников

- [1] **Soydaner D.** Attention mechanism in neural networks: where it comes and where it goes. *Neural Computing and Applications*. 2022. Vol. 34, Issue 16. P.13371–13385. DOI: 10.1007/s00521-022-07366-3.
- [2] **Dai Z., Lai G., Yang Y., Le Q.V.** Funnel-Transformer: Filtering out Sequential Redundancy for Efficient Language Processing // arXiv:2006.03236. 2020. DOI:10.48550/arXiv.2006.03236.
- [3] **Elkhatat A.M.** Evaluating the authenticity of ГигаЧат responses: a study on text-matching capabilities. *Int J Educ Integr*. 2023. Vol.15. P.1-23. DOI:10.1007/s40979-023-00137-0.
- [4] **Bai Y. et al.** Constitutional AI: Harmlessness from AI Feedback // arXiv:2212.08073. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.08073.
- [5] **Brown T.B. et al.** Language Models are Few-Shot Learners // arXiv:2005.14165. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2005.14165.
- [6] **Ахо А., Ульман Дж.** Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. Т. 2: Синтаксический анализ. М.: Книга по требованию, 2012. 487 с.
- [7] **Clark P., Tafford O., Richardson K.** Transformers as Soft Reasoners over Language. *Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-20)*. 2020. P.3882–3890. DOI: 10.24963/ijcai.2020/53
- [8] **Шавгулидзе Н.Е.** Размерность Минковского и фракталы в p-адических пространствах // Обучение фрактальной геометрии и информатике в вузе и школе в свете идей академика А.Н. Колмогорова: материалы XVI Колмогоровских чтений: 3-й Международной научно-методической конференции, Кострома, 07–09 декабря 2021 года. Кострома: Костромской государственный университет, 2021. С.82-87.
- [9] **Vaswani A., Shazeer N., Parmar N. et al.** Attention Is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems* 30 (NIPS 2017). 2017. P.5998–6008. <https://arxiv.org/abs/1706.03762>. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.
- [10] **Маклейн С.** Категории для работающего математика / Пер. с англ. В.А. Артамонова, под ред. В.А. Артамонова. 2-е изд. М.: Физматлит, 2004. 352 с.

- [11] **Антонов В.В., Куликов Г.Г., Кромина Л.А., Родионова Л.Е.** Концепция программно-аналитического комплекса образовательного процесса на основе онтологии и искусственных нейронных сетей. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №3(41). С.339-350. DOI:10.18287/2223-9537-2021-11-3-339-350.
- [12] **Vlontzos A., Rocha H.B., Rueckert D., Kainz B.** Causal Future Prediction in a Minkowski Space-Time // arXiv.2008.09154. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2008.09154.
- [13] **Arsalan M., Raza S.A., Singh A.P.** Transformers in Natural Language Processing: A Comprehensive Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2024. Vol.12, Issue 5. P.5591-5597. DOI :10.22214/ijraset.2024.62863.
- [14] **Сологуб Г.Б., Пухов В.А.** Проблемы классификации текстов естественного языка методами классического машинного обучения. *Моделирование и анализ данных*. 2023. Т.13 №2. С.64–76. DOI: 10.17759/mda.2023130203.
- [15] **Choi D., Spangner L., Hidey C., Grabowski P., Eskander R.** Revisiting Funnel Transformers for Modern LLM Architectures with Comprehensive Ablations in Training and Inference Configurations // arXiv.2504.02877. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.02877.
- [16] **Санников С.В.** Семиотические аспекты лингвокультурного трансфера: к проблеме типологии формул передачи информации. *Universum: Филология и искусствознание. Электронный научный журнал*. 2018. №9 (55). <https://7universum.com/ru/philology/archive/item/6341>.
- [17] **Валькман Ю.Р., Тарасов В.Б.** От онтологий проектирования к когнитивной семиотике // *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №1(27). С.8–34. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-1-8-34.
- [18] **Morris C.W.** Foundations of the Theory of Signs. The Hague: Mouton, 1971. (Original 1938). DOI: 10.1515/css-2019-0001
- [19] **Хомский Н.** Язык и проблема знания. *Вестник Московского университета*. Сборник научных трудов. 1996. Выпуск 6. С.157–185.
- [20] **Аксьёнов К.А., Сунь Л.** Эволюция и современное состояние систем ответов на вопросы: технологии распознавания намерений и именованных сущностей с использованием модели BERT. *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 7(115). С.761-773.
- [21] **Евстигнеев М.Н.** Планирование учебного занятия по иностранному языку с помощью технологий генеративного искусственного интеллекта. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки*. 2024. Т.29, №3. С.617-634. DOI: 10.20310/1810-0201-2024-29-3-617-634.
- [22] **Hochreiter S.** The Vanishing Gradient Problem During Learning Recurrent Neural Nets and Problem Solutions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 1998. Vol.6(2). P.107–116. DOI: 10.1142/S0218488598000094.
- [23] **Bahdanau D., Cho K., Bengio Y.** Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate // arXiv.1409.0473. 2015. P.1-15. DOI: 10.48550/arXiv.1409.0473.
- [24] **Luong M.T., Pham H., Manning C.D.** Effective Approaches to Attention-based Neural Machine Translation // arXiv:1508.04025. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1508.04025.
- [25] **Kardakis S., Perikos I., Grivokostopoulou F., Hatzilygeroudis I.** Examining Attention Mechanisms in Deep Learning Models for Sentiment Analysis. *Applied Sciences*. 2021. Vol.11, Issue 9(3883). DOI: 10.3390/app11093883.
- [26] **Топольян С.Г.** Развитие генеративных моделей в логических системах принятия решений. *Вестник науки*. 2025. №5(86). С.671-678.
- [27] **Loschilov I., Hutter F.** Decoupled Weight Decay Regularization // arXiv:1711.05101. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1711.05101.

Сведения об авторах



Антонов Вячеслав Викторович, 1956 г. рождения. Окончил Башкирский государственный университет (1979), к.т.н. (2007), д.т.н. (2015). Заведующий кафедрой автоматизированных систем управления УУНИТ. В списке научных трудов более 200 работ в области построения интеллектуальных систем. AuthorID (РИНЦ): 530537. AuthorID (Scopus): 57200254522; ResearcherID (WoS): AАН-5121-2019. antonov.v@bashkortostan.ru.

Родионова Людмила Евгеньевна, 1984 г. рождения. Окончила УГАТУ (2007), к.т.н. (2019). Доцент кафедры автоматизированных систем управления УУНИТ. В списке научных трудов около 30 работ в области проектирования программных аналитических комплексов. AuthorID (РИНЦ): 852968. Author ID (Scopus): 57221335881 ORCID: 0000-0003-4041-0365; Researcher ID (WoS): AAU-3498-2020. lurik@mail.ru. ✉





Пальчевский Евгений Владимирович, 1994 г. рождения. Окончил УГАТУ (2019). Кандидат технических наук (2024), доцент кафедры индустриального программирования РТУ МИРЭА. В списке научных трудов около 200 работ в области разработки программного обеспечения и интеллектуальных вычислений. AuthorID (РИНЦ): 837544. Author ID (Scopus): 57220744490; Researcher ID (WoS): ABB-2403-2021. *teelp@inbox.ru*.



Суворова Вероника Александровна, 1982 г. рождения. Окончила УГАТУ (2004), к.т.н. (2012). Доцент кафедры автоматизированных систем управления УУНиТ. В списке научных трудов около 30 работ в области управления организационными системами. AuthorID (РИНЦ): 541074. Author ID (Scopus): 57263144400 ORCID 0009-0009-6005-0695. *milana_da@mail.ru*.

Поступила в редакцию 07.07.2025, после рецензирования 25.12.2025. Принята к публикации 15.01.2026.



Scientific article

DOI: DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-1-125-138

Enhancing the reliability of dialogue model responses using formal grammars and category theory

© 2026, V.V. Antonov¹, L.E. Rodionova¹✉, E.V. Palchevsky², V.A. Suvorova¹

¹Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

²MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia

Abstract

This study is devoted to enhancing the reliability of dialog model responses in tasks requiring high accuracy. A hybrid approach is proposed that combines fine-tuning the model on domain-specific data with the integration of Chomsky formal grammars into the query processing pipeline. An architecture is introduced that unifies formal syntactic control with the generative capabilities of the fine-tuned GigaChat 2.0 model. The query processing workflow incorporates a module for preliminary analysis and filtering of user queries based on Chomsky context-free grammars. To align the operation of the generative model with the identified syntactic structure, a two-level control mechanism is proposed. At the input stage, a syntactically enriched query guides the generation process toward appropriate structural query patterns. At the output stage, the verification module performs selection and correction of the generated response based on formal criteria. To enhance explainability and enable formal analysis of data flows, category theory is employed, in which queries, intermediate representations, and responses are modeled as objects and morphisms of a category. To improve logical coherence and contextual awareness, a geometric representation of semantics in Minkowski space is proposed, whose metric makes it possible to separate the invariant meaning of a word from its contextual and temporal dynamics. Experimental evaluation on a specialized set of 500 factual and structured queries demonstrates that the proposed method reduces the generation of fabricated statements by 22% compared to the baseline GigaChat 2.0 model. The results show that the combined use of formal grammars, categorical formalism, and a geometric model of semantics enhances the reliability of responses in domain-specific dialogues.

Keywords: *response reliability, dialogue model, transformer, Chomsky formal grammars, category theory, Minkowski space, semantic space.*

For citation: Antonov VV, Rodionova LE, Palchevsky EV, Suvorova VA. Enhancing the reliability of dialogue model responses using formal grammars and category theory [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(1): 125-138. DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-1-125-138.

Financial Support: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation of the state assignment to higher education institutions No. FRRR-2026-0006.

Authors contributions: Antonov V.V. – development of the article structure and selection of sources; Rodionova L.E. – preparation of examples; Palchevsky E.V. – development of the dialogue model; V.A. Suvorova – verification of results.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Architecture of the hybrid system with external control

Figure 2 – Structure of the Funnel-Transformer model

Figure 3 – Unified semantic space for various linguistic structures

Figure 4 – Structure of a transformer-based language model

Table 1 – Results of the experimental comparison

Table 2 – Qualitative comparison of approaches to ensuring the reliability of language models

References

- [1] **Soydaner D.** Attention Mechanism in Neural Networks: Where It Comes from and Where It Goes. *Neural Computing and Applications*. 2022; 34(16): 13371–13385. DOI: 10.1007/s00521-022-07366-3.
- [2] **Dai Z, Lai G, Yang Y, Le QV.** Funnel-Transformer: Filtering out Sequential Redundancy for Efficient Language Processing // arXiv: 2006.03236.[cs.CL]. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2006.03236.
- [3] **Elkhatat AM.** Evaluating the authenticity of ГигаЧат responses: a study on text-matching capabilities. *International Journal for Educational Integrity*. 2023; 15: 1-23. DOI: 10.1007/s40979-023-00137-0.
- [4] **Bai Y. et al.** Constitutional AI: Harmlessness from AI Feedback // arXiv:2212.08073 [cs.AI]. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.08073.
- [5] **Brown TB. et al.** Language Models are Few-Shot Learners // arXiv:2005.14165 [cs.CL]. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2005.14165.
- [6] **Aho A, Ullman J.** Syntax Analysis (Principles of Compiler Design, Vol. 2). Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2012. 487 p. (Original work published 1978). ISBN: 978-5-458-27407-4.
- [7] **Clark P, Tafford O, Richardson K.** Transformers as Soft Reasoners over Language. In: *Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-20)*. 2020. P.3882–3890. DOI: 10.24963/ijcai.2020/53.
- [8] **Shavgulidze NE.** Minkowski Dimension and Fractals in p-adic Spaces [In Russian]. *Materials of the XVIth Kolmogorov Readings: International Scientific-Methodical Conference*, Kostroma, December 7–9, 2021. Kostroma: Kostroma State University Press, 2021, P.82–87.
- [9] **Vaswani A, Shazeer N, Parmar N. et al.** Attention Is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems* 30 (NIPS 2017). 2017. P.5998–6008. <https://arxiv.org/abs/1706.03762>. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.
- [10] **Mac Lane S.** Categories for the Working Mathematician [In Russian]. (2nd ed., translated by V.A. Artamonov, edited by V.A. Artamonov). Moscow: Fizmatlit. 2004. 352 p.
- [11] **Antonov VV, Kulikov GG, Kromina LA, Rodionova LE.** The concept of a software and analytical complex of the educational process based on ontology and artificial neural networks [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2021; 11(3): 339–350. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-339-350.
- [12] **Vlontzos A, Rocha HB, Rueckert D, Kainz B.** Causal Future Prediction in a Minkowski Space-Time // arXiv.2008.09154 [cs.CV]. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2008.09154.
- [13] **Arsalan M, Syed Azeem Raza, Er. Aayush Pratap Singh.** Transformers in Natural Language Processing: A Comprehensive Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. – 2024; 12(5): 5591-5597. DOI: 10.22214/ijraset.2024.62863.
- [14] **Sologub GB, Pukhov VA.** Problems of classification of natural language texts by classical machine learning methods. *Data Modeling and Analysis*. 2023; 13(2): 64–76. DOI: 10.17759/mda.2023130203.
- [15] **Choi D, Spangner L, Hidey C, Grabowski P, Eskander R.** Revisiting Funnel Transformers for Modern LLM Architectures with Comprehensive Ablations in Training and Inference Configurations // arXiv.2504.02877 [cs.LG]. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.02877.
- [16] **Sannikov SV.** Semiotic Aspects of Linguocultural Transfer: Towards the Typology of Information Transfer Formulas [In Russian]. *Universum: Philology and Arts Studies. Online scientific journal*. 2018; 9(55). <https://7universum.com/ru/philology/archive/item/6341>.
- [17] **Val'kman Yu R, Tarasov VB.** From ontologies of designing to cognitive semiotics [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2018; 8(1): 8–34. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-1-8-34.
- [18] **Morris CW.** Foundations of the Theory of Signs. The Hague: Mouton, 1971. (Original 1938). DOI: 10.1515/css-2019-0001.

- [19] **Chomsky N.** Language and the Problem of Knowledge [In Russian]. *Bulletin of Moscow State University. Collected Scientific Papers.* 1996; 6: 157–185.
 - [20] **Aksyonov KA, Sun L.** Evolution and current status of question answering systems: Technologies for Recognizing Intentions and Named Entities Using BERT Model [In Russian]. *Engineering Bulletin of the Don.* 2024; 7(115): 761–773.
 - [21] **Yevstigneev MN.** Planning a Lesson in a Foreign Language Using Generative AI Technologies [In Russian]. *Tambov State University Bulletin.* 2024; 29(3): 617–634. DOI: 10.20310/1810-0201-2024-29-3-617-634.
 - [22] **Hochreiter S.** Disappearing Gradient Problems in Recurrent Neural Network Training and Their Solutions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems.* 1998; 6: 107–116. DOI: 10.1142/S0218488598000094.
 - [23] **Bahdanau D, Cho K, Bengio Y.** Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate // arXiv:1409.0473 [cs.CL].2015. DOI: 10.48550/arXiv.1409.0473.
 - [24] **Luong MT, Pham H, Manning CD.** Effective Approaches to Attention-based Neural Machine Translation // arXiv:1508.04025 [cs.CL].2015. DOI: 10.48550/arXiv.1508.04025.
 - [25] **Kardakis S, Perikos I, Grivokostopoulou F, Hatzilygeroudis I.** Examination of Attention Mechanisms in Deep Learning Models for Sentiment Analysis. *Applied Sciences.* 2021; 11(9): 3883. DOI: 10.3390/app11093883.
 - [26] **Topolyan SG.** Development of Generative Models in Logical Decision-Making Systems [In Russian]. *Bulletin of Science.* 2025; 5(86): 671–678.
 - [27] **Loschilov I, Hutter F.** Decoupled Weight Decay Regularization // arXiv:1711.05101 [cs.LG].2017. DOI: 10.48550/arXiv.1711.05101.
-

About the authors

Vyacheslav Viktorovich Antonov (b. 1956) graduated from Bashkir State University (1979), Candidate of Technical Sciences (2007), Doctor of Technical Sciences (2015). Head of the Department of Automated Control System, Ufa University of Science and Technology. The list of scientific papers contains more than 200 works in the field of intelligent systems development. AuthorID (RCI): 530537. Author ID (Scopus): 57200254522; Researcher ID (WoS): AAH-5121-2019. antonov.v@bashkortostan.ru.

Lyudmila Evgenievna Rodionova (b. 1984) graduated from Ufa State Aviation Technical University (2007), Candidate of Technical Sciences (2019). Associate Professor, Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology. The list of scientific papers includes about 10 works in the field of designing software analytical systems. AuthorID (RCI): 852968. Author ID (Scopus) 57221335881; Researcher ID (WoS): AAU-3498-2020. lurik@mail.ru ✉

Evgeny Vladimirovich Palchevsky (b. 1994) graduated from Ufa State Aviation Technical University (2019). Candidate of Technical Sciences (2024), Associate Professor, Department of Industrial Programming, RTU MIREA. The list of scientific publications includes about 200 works in the field of software development and intelligent computing. AuthorID (RSCI): 837544. Author ID (Scopus): 57220744490; ORCID 0000-0001-9033-5741; Researcher ID (WoS): ABB-2403-2021. teelxp@inbox.ru.

Veronika Aleksandrovna Suvorova (b. 1982) graduated from Ufa State Aviation Technical University (2004), Candidate of Technical Sciences (2012). Associate Professor, Department of Automated Control Systems, Ufa University of Science and Technology. The list of scientific publications include approximately 30 works in the field of organizational systems management. AuthorID (RSCI): 541074. Author ID (Scopus): 57263144400; ORCID 0009-0009-6005-0695. milana_da@mail.ru.

Received July 7, 2025. Revised December 25, 2025. Accepted January 15, 2026.



Онтологическая модель процесса планирования работ на производственных предприятиях в мультиагентной системе поддержки принятия решений

© 2026, Е.В. Ляпунцева, В.Б. Чечнев ✉

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва, Россия

Аннотация

Представлена онтологическая модель процесса планирования работ на производственных предприятиях, интегрированная в мультиагентную систему поддержки принятия решений на основе модульного подхода. В мультиагентной системе используется коалиционно-холоническая архитектура, представляющая собой многоуровневую структуру агентов, объединяемых в статичные холоны, управляемые супервизорами, для реализации повторяющихся задач и временные коалиции, управляемые агентами-координаторами, с целью решения сложных задач. Онтология является общим семантическим пространством и источником знаний для агентов, обеспечивая когнитивную согласованность их действий, а также средством координации холонов и коалиций. Взаимодействие с онтологией реализуют специализированные агенты. Настройка приоритетов критериев осуществляется через весовые коэффициенты, что повышает адаптивность и управляемость системы. Снижение когнитивной нагрузки на лиц, принимающих решения, достигается за счёт онтологического отсека несогласованных альтернатив и предустановленных правил. Особенно выражены данные эффекты при увеличении дефицита ресурсов и жёсткости ограничений к создаваемому плану. Результаты апробации системы позволяют сделать вывод о возможном уменьшении времени планирования, увеличении равномерности распределения нагрузки производственного персонала и повышении точности соблюдения бюджетных ограничений при планировании работ. Практическая значимость заключается в ускорении подготовки и повышении точности планов производственных работ, уменьшении когнитивной нагрузки на лицо, принимающего решения, при планировании работ сотрудников малых и средних производственных предприятий.

Ключевые слова: онтологическая модель, мультиагентная система, поддержка принятия решений, когнитивная система, планирование работ.

Цитирование: Ляпунцева Е.В., Чечнев В.Б. Онтологическая модель процесса планирования работ на производственных предприятиях в мультиагентной системе поддержки принятия решений. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.139-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-139-151.

Вклад авторов: Ляпунцева Е.В. – постановка задачи, анализ результатов; Чечнев В.Б. – разработка онтологической модели, проведение эксперимента.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В условиях постоянно изменяющейся информационной среды, дефицита времени, наличия множества критериев эффективности и высокой степени неопределённости исходных данных задачи планирования работ (ПР) на производственных предприятиях (ПП) представляют собой сложный интеллектуальный процесс. Следствие является высокая когнитивная нагрузка лиц, принимающих решения (ЛПР) [1]. Системы поддержки принятия решений (СППР), основанные на детерминированных критериях, жёстких алгоритмах и статических моделях, недостаточно учитывают специфику когнитивных процессов ЛПР. Существует потребность в СППР, способных адаптироваться к изменениям среды и понижать когнитивную

нагрузку на ЛПП. Применение онтологий позволяет формализовать знания о предметной области (ПрО), повысить гибкость и адаптивность управления, снизить когнитивную нагрузку на ЛПП, в т.ч. из-за схожести с ментальными моделями деятельности человека [2-4].

Целью данного исследования является разработка онтологической модели (ОМ) процесса ПР на ПП в мультиагентной системе (МАС), обеспечивающей поддержку решений с учётом сложности многокритериальных задач.

1 Формализация задачи планирования работ

В работе рассматривается ПП, выполняющее множество проектов (контрактов) $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ в определённом плановом периоде, делящемся на месяцы и представляющем собой множество $T = \{T_1, T_2, \dots, T_c\}$. Каждый контракт C_i – это выпуск одного или нескольких конечных продуктов или оказания услуг. В данной задаче принято, что результаты деятельности ПП представляются множеством продуктов $P = \{P_1, P_2, \dots, P_d\}$. Для каждого продукта P_j существует множество операций $O_{ij} = \{O_{ij1}, O_{ij2}, \dots, O_{ij\sigma}\}$. Каждая операция O_{ijk} характеризуется трудоёмкостью L_{ijk} – объёмом трудовых затрат (нормо-часов), необходимых для её выполнения. Набор операций может иметь технологические или логические отношения предшествования, при которых $O_a < O_b$ означает необходимость завершить операцию O_a до начала O_b . Для выполнения операций O_{ijk} имеется множество ресурсов $R = \{R_1, R_2, \dots, R_y\}$. Ресурсом в данном случае является рабочее время отдельных работников определённой квалификации, участвующих в выполнении данной операции O_{ijk} . Каждый ресурс R_n обладает календарём доступности: в каждый дискретный период планирования T ресурс R_n может быть использован в размере y'_{nt} не более заранее задаваемого объёма норма-часов y_{nt} . При этом каждый y_{nt} обладает заранее задаваемой стоимостью S_{nt} .

Решение задачи планирования заключается в определении:

- распределения ресурсов R по всем требуемым операциям O ;
- временного расписания выполнения операций на задаваемом горизонте планирования.

В условиях дискретного времени решение может быть представлено как набор бинарных переменных:

$$x_{ijk}^{(n,t)} = \begin{cases} 1, & \text{если операция } O_{ijk} \text{ начинается в период } t \text{ на ресурсе } R_n, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Решение должно удовлетворять следующим ограничениям:

- суммарные выделенные ресурсы на каждую операцию O_{ijk} должны быть равны трудоёмкости L_{ijk} ;
- для любого ресурса R_n в каждом периоде T_t суммарная нагрузка от всех назначенных операций не превосходит доступного R_i ;
- соблюдение отношения предшествования;
- соблюдение заданных требований по периоду начала и окончания выполнения операций;
- суммарная стоимость всех используемых ресурсов R должна находиться в рамках задаваемых границ бюджета: $B_{min_{ijk}} \leq \sum_{n \in R} \sum_{t \in T} (S_{nt} y'_{nt}) \leq B_{max_{ijk}}$.

В рассматриваемых условиях ПР можно сформулировать следующие критерии оптимальности f :

- для каждой C_i :

$$f_i - \text{минимизация отклонения от целевого бюджета контракта } B_{target_i} = \frac{B_{min_i} + B_{max_i}}{2},$$

$$f'_i - \text{максимизация выполнения контракта внутри целевого периода выполнения } T_{TARGET_i};$$

$$f''_i - \text{максимизация равномерности распределения нагрузки между } R;$$

- для каждого P_{ij} :

f'_{ij} – минимизация отклонения от целевого бюджета продукта $B_{target_{ij}} = \frac{B_{min_{ij}} + B_{max_{ij}}}{2}$;

f''_{ij} – максимизация выполнения продукта внутри целевого периода выполнения $T_{TARGET_{ij}}$;

f'''_{ij} – максимизация равномерности распределения нагрузки между R ;

- для каждого O_{ijk} :

f'_{ijk} – минимизация отклонения от целевого бюджета операции $B_{target_{ijk}} = \frac{B_{min_{ijk}} + B_{max_{ijk}}}{2}$;

f''_{ijk} – максимизация выполнения операций внутри целевого периода выполнения $T_{TARGET_{ijk}}$;

f'''_{ijk} – максимизация равномерности распределения нагрузки между R .

В зависимости от выбранного метода многокритериальная задача может иметь разную целевую функцию. Например, используя метод линейной свёртки критериев, можно получить функцию: $F = \max(\sum_{i=1}^p W_b f'_i + \sum_{i=1}^p W_t f''_i + \sum_{i=1}^p W_c f'''_i)$, где W_b – вес критерия соответствия целевому бюджету, W_t – вес критерия соответствия целевому периоду, W_c – вес критерия равномерности распределения нагрузки.

В общей схеме процесса ПР действия ЛПР и мультиагентной СППР можно разделить на следующие категории (см. рисунок 1), совершаемые: при первичном запуске или при каждом расчёте; ежемесячно или по мере необходимости.

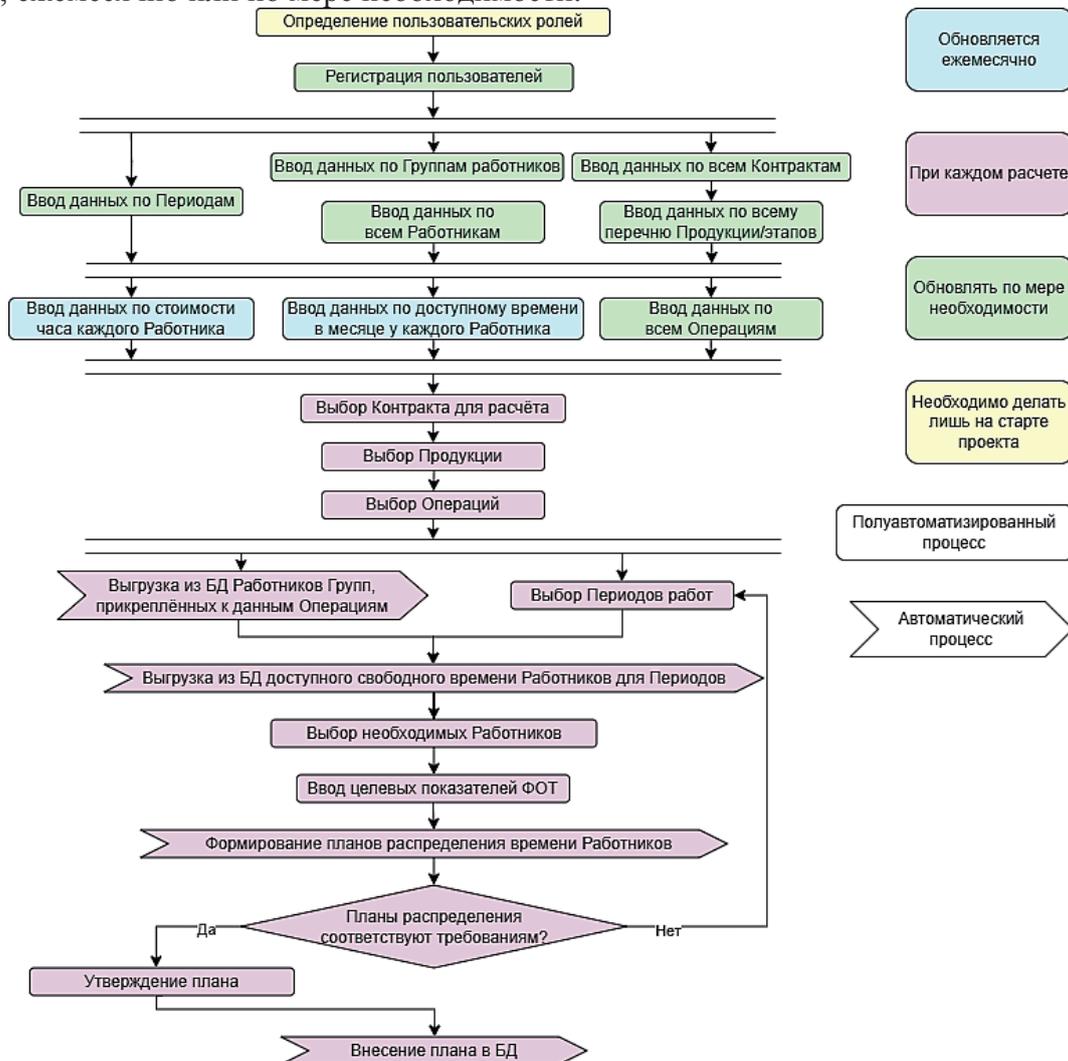


Рисунок 1 – Алгоритм работы лица, принимающего решение, в мультиагентной СППР

Эти категории действий образуют сквозную цепочку: результаты действий, выполняемых при первичном запуске, становятся входными данными для ежемесячных процедур, а отклики на события «по мере необходимости» вызывают перерасчёты, выполняемые системой при каждом прохождении алгоритма.

IDEF0-диаграмма (см. рисунок 2) переносит эту цепочку в терминологию «Input – Control – Output – Mechanism», демонстрируя действия ЛПП, точки передачи данных и механизмы управления на каждом этапе работы.

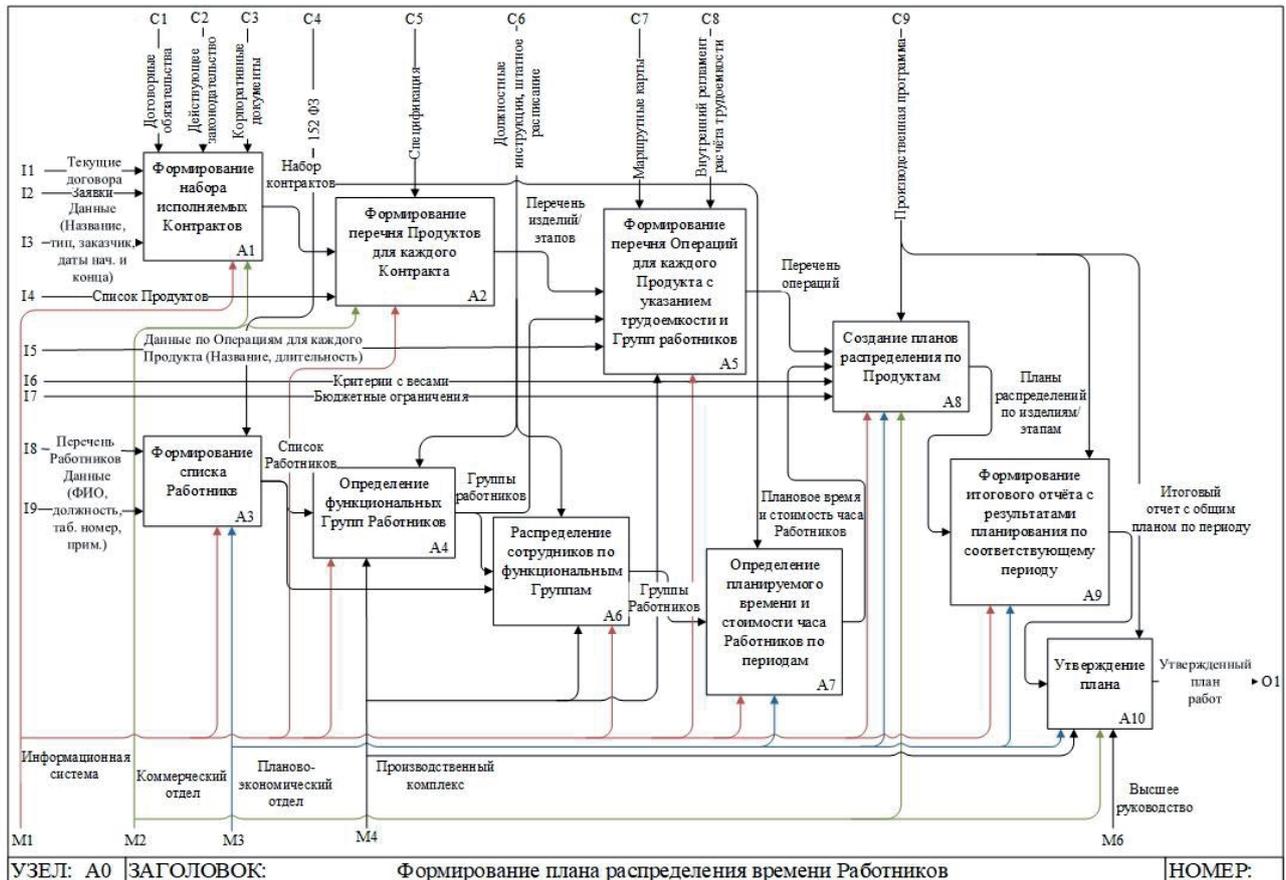


Рисунок 2 – Схема процесса планирования работ с помощью мультиагентной СППР

Задача ПР относится к слабоструктурированным и трудноформализуемым. Когнитивная сложность в данном контексте проявляется в необходимости восприятия большого объема информации о производственном процессе, понимания взаимосвязей, в прогнозировании последствий решений и оперативном перестроении плана при вносимых изменениях. Когнитивная сложность задачи ПР характеризуется следующими метриками:

- перцептивная нагрузка – объем и гетерогенность информации, актуальной для ЛПП, формально оцениваемые по подграфу ОМ, релевантному текущему контексту выбора: $k_{perc} = |V_s| + |E_s|$, где V_s, E_s – множества вершин и ребер подграфа;
- нагрузка памяти – число одновременно активных ограничений и правил, влияющих на решение: $k_{wm} = \sum_{r \in L} w_r$, где L – множество ограничений, w_r – «когнитивный вес» ограничения;
- комбинаторная сложность выбора – мощность множества альтернатив A и их неопределённость: $k_{comb} = |A|$.

С целью повышения прозрачности процесса принятия решения и повышения уровня когнитивной поддержки ЛПП, предлагаемое решение должно предоставлять ЛПП:

- ОМ всех сущностей и взаимоотношений ПрО;
- возможность воздействия на получаемые решения, например, с помощью выбора критериев и весов для них;
- возможность осуществлять выбор среди нескольких альтернативных вариантов;
- возможность динамической адаптации параметров расчёта, влияющих на получаемые планы работ, исходя из контекста каждой рассматриваемой задачи;
- объяснение получаемых решений.

2 Онтологическая модель процесса планирования

Онтология в контексте информационных систем определяется как формальное описание ПрО в понятной для всех участников процесса форме [5]. Внесённые уточнения [6, 7] определяют онтологию как:

- формальную модель ПрО (множество классов и отношений);
- аксиомы и правила, обеспечивающие возможность контроля целостности знаний;
- однозначно интерпретируемый всеми пользователями и системными компонентами словарь, представленный в виде помеченного графа, отражающего логические связи между элементами.

Онтология обеспечивает повторное использование знаний, позволяя разработать обобщённую структуру и специализировать её под разные ПрО. Так, в работах [8, 9] рассматривается использование онтологий для формализации знаний о производственных процессах в МАС. Такая онтология является примером обобщённой структуры, что позволяет на её основе сформировать конкретную модель с учётом особенности задачи. Наличие формальной структуры знаний облегчает идентификацию ключевых параметров и взаимосвязей между ними, помогая ЛПП принимать решения быстрее и с меньшими усилиями [10].

В данной работе используется редактор онтологий *Protégé*¹. Среди основных сущностей онтологии ПР можно выделить следующие классы (см. рисунок 3): Контракт, Продукт, Операция, Ресурс, Группа работников, Работник, Тариф работника, Период, План.

Приведённые классы образуют иерархическую структуру:

Контракт включает один или несколько Продуктов, каждый Продукт выполняется множеством Операций, а каждая Операция потребляет определённые Ресурсы, которые представляют собой Работников, объединённых в Группы по принципу возможности их взаимозаменяемости в рамках определённых Операций.

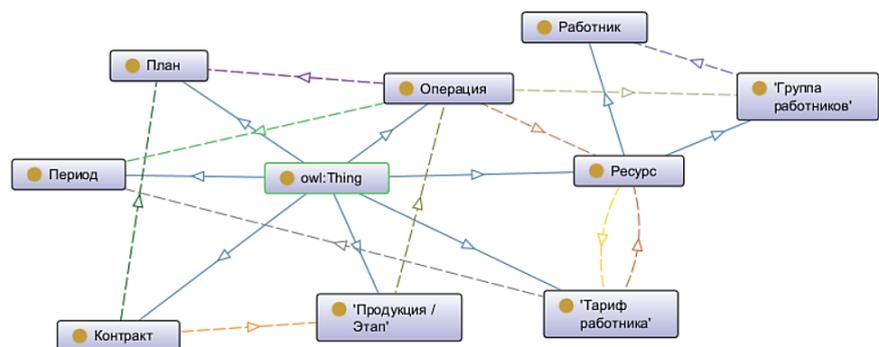


Рисунок 3 – Диаграмма классов для задачи планирования работ

Для каждого класса формируется набор атрибутов, хранящих характеристики экземпляров, и указываются связи-отношения между выявленными основными сущностями онтологии (см. рисунок 4).

Новизна предлагаемой ОМ заключается в выделении специальных классов и атрибутов, отражающих когнитивные требования ЛПП на ПП. В отличие от существующих решений предложенная ОМ может включать параметры, связанные с когнитивной нагрузкой и удоб-

¹ *Protégé* – свободный, открытый редактор онтологий и фреймворк для построения баз знаний. <https://protege.stanford.edu/>.

ством восприятия информации, например, параметры выбора критериев и весов критериев, наличие альтернативных решений.

ОМ, представленная таким образом, носит когнитивный характер – она близка к тому, как ЛПР описывало бы процесс ПР с использованием ПрО, выражая набор своих суждений о ней терминами данной онтологии. Эксперт может пополнять онтологию новыми сущностями, отношениями и атрибутами, а система может объяснять решения, опираясь на понятия из модели. Пользователь может взаимодействовать с системой через интерфейс, оперирующий заложенными онтологическими понятиями.



Рисунок 4 – Примеры отношений между классами и атрибуты для класса: (а) «Операция» и (б) «Контракт»

3 Интеграция онтологии с мультиагентной системой

Онтология участвует в работе МАС, обеспечивая когнитивную согласованность действий агентов, оперирующих понятиями, определёнными в ней и использующих её как общий источник знаний о ПрО.

Среди подходов к интеграции онтологии в МАС можно выделить следующие.

- Онтология в виде централизованной базы знаний, доступной всем агентам [8] (в таком случае выделяется специализированный агент, отвечающий за взаимодействие с онтологией: хранение экземпляров классов, выполнение запросов и внесение изменений).
- Трёхуровневая система, включающая следующие слои (такая концепция устраняет информационную разрозненность путём приведения данных к единому онтологическому виду):
 - онтологический слой (общая информационная модель, обеспечивающая согласованное хранилище данных о продукте и процессах);
 - слой взаимодействия агентов (коммуникационный центр, через который модули обмениваются данными на основе онтологии);
 - слой имитационных агентов (набор программных агентов, моделирующих поведение рассматриваемых логистических субъектов) [11].
- Модульный подход, основанный на специализации каждого агента под этапы процесса ПР, в котором онтологии представляют семантическое поле для всех агентов, обеспечивая совместимость гетерогенных знаний [12] (создание базовой онтологии с потенциальным расширением на новые ПрО, что позволяет уменьшить трудоёмкость и сроки разработки подобных систем [13]).
- Подход с использованием онтологии для оценки «аргументов» и согласования действий агентов, подкрепляющий результаты работы агентов формальными доказательствами, заложенными в онтологию [14].

Условия данной задачи релевантны модульному подходу с потенциальным расширением. Модульная архитектура позволяет не перегружать информацией каждого агента в МАС, что упрощает разработку и тестирование, а также увеличивает скорость её работы. При этом оставляя возможность перейти от текущего пакетного планирования по каждой отдельно взятой Операции к более гибкому и масштабируемому подходу, позволяющему минимизировать потери при перепланировании [15].

Концептуальная схема отображения основных классов разработанной онтологии на типы программных агентов заключается в следующем: каждому ключевому объекту планирования соответствует программный агент, наделённый определёнными целями и поведением. Онтология служит общим информационным пространством для агентов: все агенты оперируют одними понятиями и информацией, получаемой из онтологической базы знаний в соответствии со своей специализацией [16].

Исходя из данной схемы и параметров задачи ПР, предлагается использовать многоуровневую коалиционно-холоническую агентную архитектуру. Каждый холон представляет собой автономную группу агентов, которые могут использовать специализированные части общей онтологии для решения своих задач, координируясь общим агентом-супервизором, который отвечает за взаимодействие холона с другими холонами и коалициями. Такая структура позволяет раскрыть основные преимущества МАС:

- *распределённые вычисления* – агенты могут создавать краткосрочные группы (коалиции) с целью решения сложных задач, используя параллельные вычисления несколькими агентами одновременно;

- *масштабируемость* – выстраиваемая иерархия вложенности холонов даёт возможность верхнеуровневым холонам, например холонам агентов «Контракт», группировать и управлять количеством и работой холонов агентов «Продукт». Такая иерархия позволяет наращивать вычислительную мощность программы, увеличивая параллельность вычислений путём добавления новых низкоуровневых холонов, решающих локальные задачи, а также добавлять новые сущности в рамках существующей конфигурации холонов без полного пересмотра всего алгоритма работы.

Схема интеграции онтологии с МАС представлена на рисунке 5: ОМ; холоны, управляющиеся агентами-координаторами; коалиция агентов, создаваемая агентом-супервизором, и их взаимосвязь посредством общей онтологии знаний, с которой взаимодействуют специальные API-агенты, отвечающие за работу с отдельными частями онтологии, согласно их специализации.

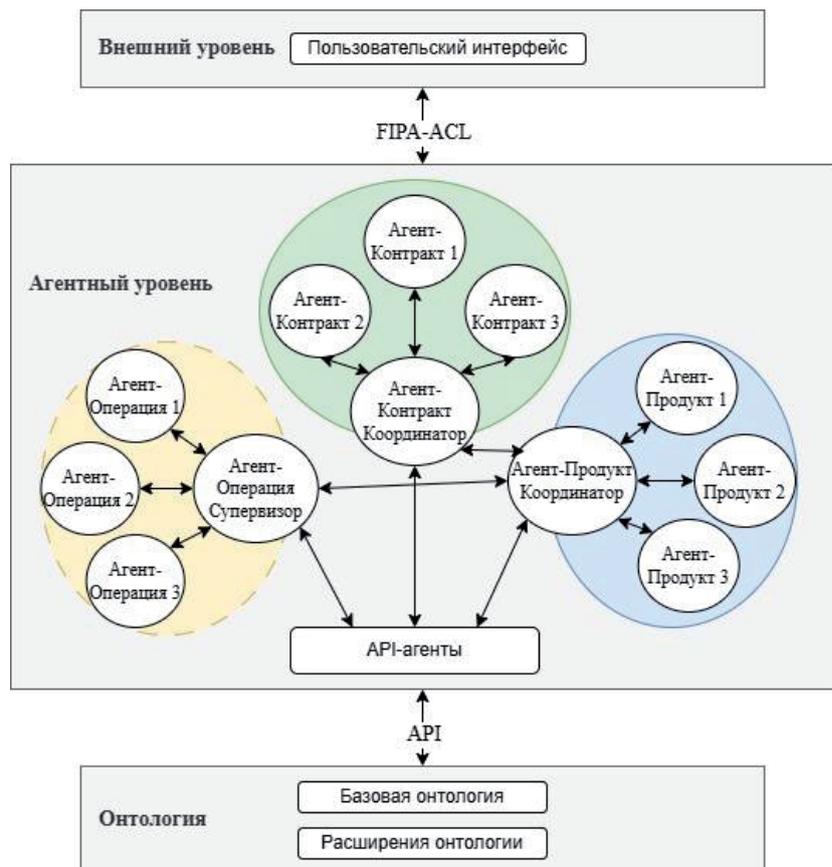


Рисунок 5 – Схема интеграции онтологии с мультиагентной системой

4 Апробация модели

Апробация ОМ в МАС выполнялась путём сопоставления двух вариантов процесса ПР:

- базового, в котором ЛПП разрабатывает план, используя справочники и последовательный просмотр ограничений без семантического отсека несогласованных решений;
- интеграционного, в котором МАС с ОМ создают единое семантическое пространство ПрО, осуществляется фильтрация альтернатив и предоставляется возможность управления ограничениями с помощью весовых коэффициентов W_b , W_t и W_c .

Для обоих вариантов применялись одинаковые наборы тестовых исходных данных и сценарии изменений. Исходные данные разделены на две типовые категории по их мощности: малые и средние (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Основные параметры тестовых данных

Набор данных	Количество Операций	Число Работников	Количество Периодов	Отношение длительности Операций к доступному времени Работников, %
Средний А	25	22	6	21
Средний Б	25	22	9	9
Малый А	12	12	3	37
Малый Б	12	12	3	49

В эксперименте принимали участие специалисты, выполняющие ПР в рамках своей профессиональной деятельности на предприятии оборонно-промышленного комплекса. Каждый участник проводил оба варианта планирования со случайным порядком режима выполнения задач. Предоставлялась тренировочная сессия для ознакомления с интерфейсом, а для исключения влияния накопительного утомления между сессиями предусматривались перерывы. После завершения каждого варианта планирования фиксировались значения следующих показателей эффективности получаемого решения (см. таблицу 2):

- время подготовки плана T_{plan} (минут) – затрачиваемое время на формирование плана при заранее подготовленных исходных данных;
- критерии оптимальности плана: f' , f'' и f''' ;
- количество перегрузок Работников N_{over} – среднее арифметическое от количества перегрузок Работников в данном режиме у всех участников.

Таблица 2 – Полученные показатели эффективности двух вариантов процесса планирования работ

Набор данных	Метод	T_{plan} , минут	f' , %	f'' , %	f''' , %	N_{over}
Средний А	Базовый	91	2,1	100	94,3	0,4
	МАС с ОМ	3	0,9	100	97,6	0
Средний Б	Базовый	82	3,5	100	93,1	0
	МАС с ОМ	3	1	100	96,9	0
Малый А	Базовый	30	1,2	100	94,3	0
	МАС с ОМ	2	0,3	100	98,1	0
Малый Б	Базовый	55	1,9	100	82,8	1,2
	МАС с ОМ	2	1,4	100	93,6	0

По представленным в таблице 2 результатам можно сделать следующие выводы:

- наибольший эффект от использования МАС с ОМ виден на времени подготовки плана;
- несмотря на близкие к минимальным значениям базовые показатели f' , все сценарии МАС с ОМ продемонстрировали заметную положительную динамику;
- критерий соответствия срокам во всех сценариях достиг максимального значения в связи с тем, что все ЛПП ориентировались в первую очередь на него;
- показатель равномерности распределения стабилен в условиях разброса времени доступности работников;

- небольшое количество перегрузок, встречавшееся в базовых сценариях, в варианте МАС с ОМ сведены до нуля за счёт встроенных в ОМ ограничений на наличие перегрузок.

Помимо технической эффективности, в задаче снижения когнитивной нагрузки необходимо учитывать и оценку влияния МАС непосредственно на ЛПР. Для этого использовался метод субъективной оценки рабочей нагрузки *NASA TLX*, включающий набор шкал, по которым пользователь оценивает умственную и физическую нагрузки, нехватку времени, качество выполнения задачи, сложность и уровень стресса [17]. Данный метод показал достаточную достоверность в исследованиях когнитивной нагрузки в сравнении с более глубокими тестами [18-20]. В данном тестировании использовалась его сокращённая версия *RAW-TLX* без физической нагрузки, где каждому из пяти факторов соответствовала десятибалльная шкала от «очень низкий» (1) до «очень высокий» (10) (кроме качества выполнения задачи, которое оценивается инвертированной шкалой), а итоговый индекс рассчитывался как среднее арифметическое всех параметров [21]. Опросник заполнялся участниками сразу после выполнения задания в каждом из режимов (см. рисунки 6 и 7).

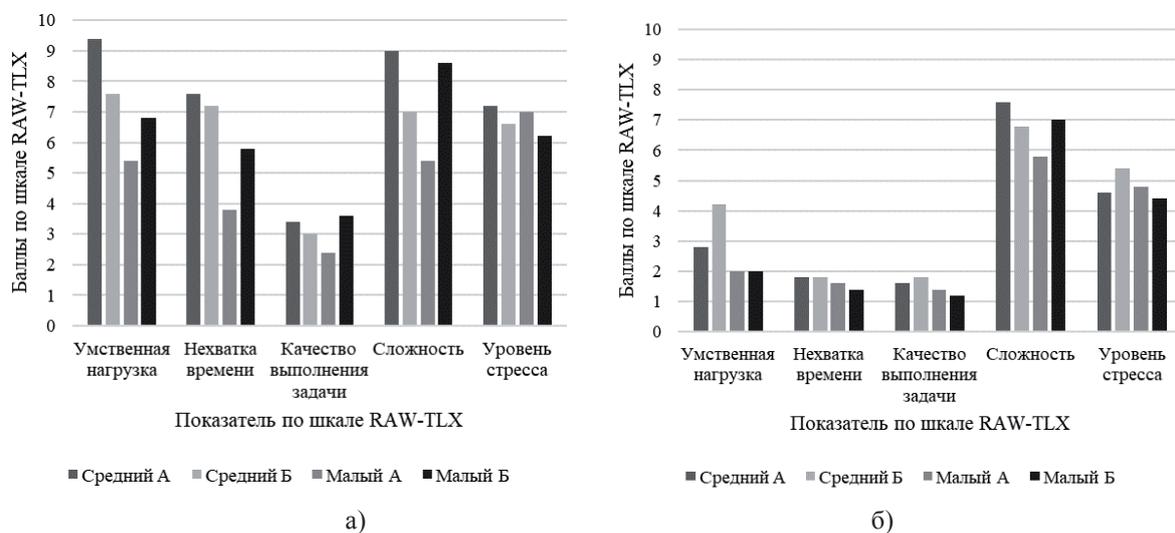


Рисунок 6 – Результаты субъективной оценки методом *RAW-TLX*: (а) Базовый вариант и (б) МАС с ОМ

Можно отметить, что на сценариях с высокой дефицитностью ресурсов и более жёсткими ограничениями по Периодам преимущество МАС возрастало, что объясняется онтологическим отсечением несогласованных альтернатив, снижающим объём рассматриваемых альтернатив и число итераций. Данный эффект позволяет снизить k_{perc} и k_{comb} . Этот эффект проявляется и при увеличении объёма входных данных, помогая преодолеть комбинаторный рост числа вариантов, характерный для централизованных алгоритмов управления [16]. При этом k_{wm} снижается за счёт установленных по умолчанию правил разработанной ОМ, так как ЛПР освобождается от необходимости удерживания в своей памяти данных правил и может сосредоточиться на более важных элементах принятия решений.

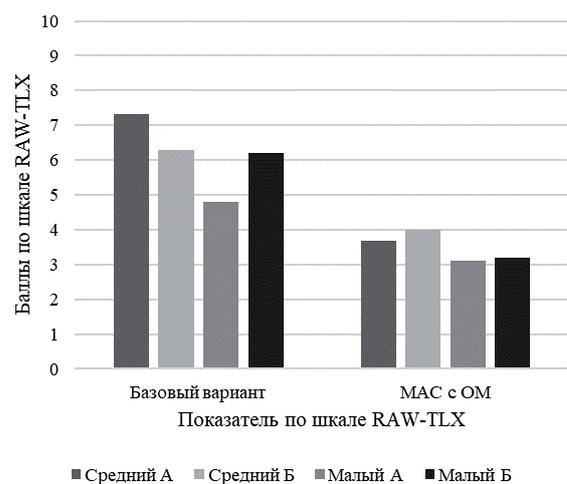


Рисунок 7 – Интегральный показатель субъективной оценки рабочей нагрузки методом *RAW-TLX*

Таким образом, можно отметить, что ОМ процесса ПР в сочетании с МАС позволила уменьшить комбинаторную сложность выбора, перцептивную нагрузку и нагрузку памяти ЛПР, при этом повысив основные метрики эффективности решения в сравнении с базовым вариантом процесса ПР.

Заключение

Разработана оригинальная ОМ процесса ПР на ПП, интегрированная в мультиагентную СППР и учитывающая когнитивную нагрузку на ЛПР.

Формализация процесса многокритериального ПР позволило определить требования к разрабатываемой СППР, а предложенная ОМ послужила единым информационным пространством, описывающим ключевые сущности и их взаимосвязи. Модульный подход, основанный на фрагментации онтологии в зависимости от специализации агентов, позволяет расширять данную модель и облегчить разработку СППР.

Разработанная модель отличается от существующих аналогов более глубоким учётом когнитивных аспектов ПР и адаптивностью. Показана возможность интеграции онтологии с коалиционно-холонической архитектурой МАС.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается возможностью применения модели на ПП и успешно прошла апробацию в оборонно-промышленном комплексе при составлении расписаний работ сотрудников.

ОМ процесса ПР в сочетании с мультиагентной СППР позволяет эффективно решать задачи разработки оптимальных планов в динамических условиях с учётом нескольких критериев.

Список источников

- [1] *Karakikes M., Nathanael D.* The effect of cognitive workload on decision authority assignment in human–robot collaboration. *Cognition, Technology & Work*. 2023. Vol. 25. P.31-43. DOI:10.1007/s10111-022-00719-x.
- [2] *Манаськин А.В., Брунилин А.А., Саенко И.Б.* Онтологический подход к созданию систем поддержки принятия решений. *Технические науки – от теории к практике*. 2016. № 11. С.28-32.
- [3] *Скобелев П.О.* Ситуационное управление и мультиагентные технологии. *Онтология проектирования*. 2013. № 2(8). С.26-48.
- [4] *Тиханычев О.В.* Теория и практика автоматизации поддержки принятия решений. М.: Эдитус, 2018. 76 с.
- [5] *Gruber T.R.* Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *Int. Journal of Human-Computer Studies*. 1993. Vol. 43. P.907-928.
- [6] *Guarino N., Oberle D., Staab S.* What Is an Ontology? Handbook on Ontologies. 2009. P.1-17.
- [7] *Микони С.В.* Понятность онтологической модели как характеристика её качества. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11. №1(39). С.20-34. DOI:10.18287/2223-9537-2021-11-1-20-34.
- [8] *Skobelev P., Zhilyaev A., Larukhin V., Grachev S., Simonova E.* Ontology-based Open Multi-agent Systems for Adaptive Resource Management. *Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. 2020. Vol.1. P.127-135. DOI:10.5220/0008896301270135.
- [9] *Шилов Н.Г.* Разработка мультиаспектной онтологии для поддержки принятия решений в производственных системах. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2024. № 2. С.52-64. DOI:10.14357/20718632240205.
- [10] *Meyers B. et al.* Towards a knowledge graph framework for ad hoc analysis in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2024. Vol.35. P.3731-3752. DOI:10.1007/s10845-023-02319-6.
- [11] *Du J., Jing H., Choo K.R., Sugumaran V., Castro-Lacouture D.* An ontology and multi-agent based decision support framework for prefabricated component supply chain. *Information Systems Frontiers*. 2020. Vol.22. P.1467-1485. DOI:10.1007/s10796-019-09941-x.
- [12] *Shen Y., Jacquet-Andrieu A., Colloc J.* A multi-agent ontologies-based clinical decision support system. arXiv:2001.07374. 2012. DOI:10.48550/arXiv.2001.07374.
- [13] *Жиляев А.А.* Онтологии как инструмент создания открытых мультиагентных систем управления ресурсами. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9. №2(32). С.261-281. DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-2-261-281.

- [14] **Liu P., Xiao L.** Improving Clinical Decision Support: Architecture Design of a Multi-agent System based on an Argument Quality Assessment Ontology. *IEEE 22nd International Conference on Software Architecture* (Odense, Denmark, April, 2025). P.313-323. DOI:10.1109/ICSA65012.2025.00039.
- [15] **Кирьяков Ф.М., Скобелев П.О.** Мультиагентный метод повышения адаптивности и эффективности управления вычислительными ресурсами в реальном времени. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №3(57). С.418-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-418-435.
- [16] **Hadzic M., Wongthongtham P., Dillon T., Chang E.** Ontology-Based Multi-Agent Systems. Berlin: Springer, 2009. 274 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01904-3.
- [17] **Hart S.G., Staveland L.E.** Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*. 1988. Vol.52. P.139-183. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [18] **Ramkumar A. et al.** Using GOMS and NASA-TLX to Evaluate Human-Computer Interaction Process in Interactive Segmentation. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2017. No.2. P.123-134. DOI:10.1080/10447318.2016.1220729.
- [19] **Grier R.A.** How High Is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2015. No.59. P.1727-1731. DOI:10.1177/1541931215591373.
- [20] **Virtanen K. et al.** Weight watchers: NASA-TLX weights revisited. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2022. No.6, P.725-748. DOI:10.1080/1463922X.2021.2000667.
- [21] **Said S. et al.** Validation of the Raw National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) Questionnaire to Assess Perceived Workload in Patient Monitoring Tasks: Pooled Analysis Study Using Mixed Models. *Journal of Medical Internet Research*. 2020. 22(9):e19472. DOI: 10.2196/19472.

Сведения об авторах



Ляпунцева Елена Вячеславовна, 1963 г. рождения. Окончила Таганрогский радиотехнический институт им. В.Д. Калмыкова в 1985г., д.т.н. (1996). Профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эксперт РАН, эксперт Фонда Сколкова и эксперт АСИ. Основатель, руководитель проектов и председатель координационного совета МОО «Лига преподавателей Высшей Школы». Член диссертационного совета по техническим наукам МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктор бизнес администрирования. В списке научных трудов более 150 работ в области информатики и вычислительной техники. ORCID ID: 0000-0002-3420-3805. Author ID (РИНЦ): 372736; Author ID (Scopus): 6507410840. lev86@bmstu.ru.



Чечнев Василий Борисович, 1999 г. рождения. Окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана (2023), направление «Организация и управление наукоёмкими производствами». Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана, специальность «Когнитивное моделирование». В списке научных трудов 6 работ в области интеллектуальных систем и систем поддержки принятия решений. ORCID ID: 0009-0000-1523-3294. Author ID (РИНЦ): 1215414. gegrev@yandex.ru. ✉.

Поступила в редакцию 22.08.2024, после рецензирования 17.12.2025. Принята к публикации 14.01.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-139-151

Ontological model of work planning processes at manufacturing enterprises within a multi-agent decision support system

© 2026, E.V. Lyapunceva, V.B. Chechnev ✉

Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia

Abstract

This paper presents an ontological model of work planning processes at manufacturing enterprises, integrated into a multi-agent decision support system based on a modular approach. The multi-agent system utilizes a coalition-holonic

architecture representing a multi-level structure of agents grouped into static holons, managed by supervisors for recurring tasks and temporary coalitions, managed by coordinating agents for solving complex tasks. The ontology serves as a shared semantic space and a knowledge source for agents, ensuring cognitive coherence of their actions and serving as a means of coordinating holons and coalitions. Interaction with the ontology is implemented through specialized agents. The adjustment of decision criteria priorities is performed via weighting coefficients, which enhances the adaptability and controllability of the system. The cognitive load on decision makers is reduced through the ontological elimination of inconsistent alternatives and predefined rules. These effects are particularly pronounced with increasing resource scarcity and stricter constraints imposed on the generated plan. The results of the system's pilot testing suggest potential reductions in planning time, a more even distribution of workload among production personnel, and improved compliance with budget constraints during work planning. The practical significance of the proposed approach lies in accelerating the preparation and increasing the accuracy of production work plans, and reducing the cognitive load on decision makers when planning work for employees of small and medium-sized manufacturing enterprises.

Keywords: *ontological model, multi-agent systems, decision support, cognitive system, work planning.*

For citation: *Lyapuntsova EV, Chechnev VB. Ontological model of work planning processes at manufacturing enterprises within a multi-agent decision support system [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 139-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-139-151.*

Authors' contribution: *Lyapuntsova E.V.* – problem formulation and analysis of results; *Chechnev V.B.* – development of the ontological model and experiment execution.

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

List of figures

Figure 1 – Decision-maker workflow in a multi-agent decision support system (MAS DSS)

Figure 2 – Work planning process supported by a multi-agent DSS

Figure 3 – Class diagram for the work planning problem

Figure 4 – Examples of relations between classes and attributes for the classes: (a) "Operation" and (b) "Contract"

Figure 5 – Ontology integration scheme with the MAS

Figure 6 – Results of subjective assessment using the RAW-TLX method: (a) baseline configuration and (b) MAS with an ontological model

Figure 7 – Integral subjective workload index obtained using the RAW-TLX method

Table 1 – Key parameters of the test dataset

Table 2 – Performance indicators obtained for the two work planning process options

References

- [1] **Karakikes M, Nathanael D.** The effect of cognitive workload on decision authority assignment in human-robot collaboration. *Cognition, Technology & Work*. 2023; 25: 31-43. DOI: 10.1007/s10111-022-00719-x.
- [2] **Manaskin AV, Brunilin AA, Saenko IB.** Ontological approach to creation of decision-making support systems [In Russian]. *Technical sciences – from theory to practice*. 2016; 11: 28-32.
- [3] **Skobelev PO.** Situation-driven decision-making and multi-agent technology: finding solutions in dialogue [In Russian]. *Ontology of designing*. 2013; 2(8): 26-48.
- [4] **Tikhanychev OV.** Theory and practice of automation of decision support [In Russian]. Moscow: Editus, 2018. 76 p.
- [5] **Gruber TR.** Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *Int. Journal of Human-Computer Studies*. 1993; 43: 907-928.
- [6] **Guarino N, Oberle D, Staab S.** What Is an Ontology? *Handbook on Ontologies*. 2009: 1-17.
- [7] **Mikoni SV.** Comprehensibility of an ontological model as a characteristic of its quality [In Russian]. *Ontology of designing*. 2021; 11; 1(39): 20-34. DOI:10.18287/2223-9537-2021-11-1-20-34.
- [8] **Skobelev P. et al.** Ontology-based Open Multi-agent Systems for Adaptive Resource Management. *Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. 2020; 1: 127-135. DOI: 10.5220/0008896301270135.
- [9] **Shilov NG.** Development of a multi-aspect ontology to support decision-making in production systems [In Russian]. *Information technologies and computing systems*. 2024; 2: 52-64. DOI: 10.14357/20718632240205.
- [10] **Meyers B. et al.** Towards a knowledge graph framework for ad hoc analysis in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2024; 35: 3731-3752. DOI: 10.1007/s10845-023-02319-6.

- [11] **Du J, Jing H, Choo KR, Sugumaran V, Castro-Lacouture D.** An ontology and multi-agent based decision support framework for prefabricated component supply chain. *Information Systems Frontiers*. 2020; 22: 1467-1485. DOI: 10.1007/s10796-019-09941-x.
- [12] **Shen Y, Jacquet-Andrieu A, Colloc J.** A multi-agent ontologies-based clinical decision support system. arXiv:2001.07374. 2012. DOI: 10.48550/arXiv.2001.07374.
- [13] **Zhilyaev AA.** Ontology as a tool for creating open multi-agent resource management systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9; 2(32): 261-281. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-261-281.
- [14] **Liu P, Xiao L.** Improving Clinical Decision Support: Architecture Design of a Multi-agent System based on an Argument Quality Assessment Ontology. *IEEE 22nd International Conference on Software Architecture* (Odense, Denmark, April, 2025). 2025: 313-323. DOI: 10.1109/ICSA65012.2025.00039.
- [15] **Kiriakov FM, Skobelev PO.** Multi-agent method to improving adaptive real-time management of computing resources [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 418-435. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-418-435.
- [16] **Hadzic M, Wongthongtham P, Dillon T, Chang E.** *Ontology-Based Multi-Agent Systems*. Berlin: Springer, 2009. 274 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01904-3.
- [17] **Hart SG, Staveland LE.** Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*. 1988, 52. 139-183. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [18] **Ramkumar A. et al.** Using GOMS and NASA-TLX to Evaluate Human-Computer Interaction Process in Interactive Segmentation. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2017, 2. 123-134. DOI: 10.1080/10447318.2016.1220729.
- [19] **Grier RA.** How High Is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2015, 59. 1727-1731. DOI:10.1177/1541931215591373.
- [20] **Virtanen K. et al.** Weight watchers: NASA-TLX weights revisited. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2022, 6. 725-748. DOI:10.1080/1463922X.2021.2000667.
- [21] **Said S. et al.** Validation of the Raw National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) Questionnaire to Assess Perceived Workload in Patient Monitoring Tasks: Pooled Analysis Study Using Mixed Models. *Journal of Medical Internet Research*. 2020. 22(9):e19472. DOI: 10.2196/19472.

About the authors

Elena Vyacheslavovna Lyapunsova (b. 1963) graduated from the Taganrog Radiotechnical Institute named after V.D. Kalmykov in 1985, D. Sc. Eng. (1996). She is a Professor at BMSTU. Expert of the Russian Academy of Sciences, the Skolkovo Foundation, and the Agency of Strategic Initiatives. Founder, project manager, and Chair of the Coordinating Council of the International Public Organization «League of Higher Education Teachers». Member of the Dissertation Council for Technical Sciences at BMSTU. Doctor of Business Administration. She is a co-author of more than 150 publications in the fields of informatics and computer engineering. ORCID ID: 0000-0002-3420-3805. Author ID (RSCI): 372736; Author ID (Scopus): 6507410840. lev86@bmstu.ru.

Vasily Borisovich Chechnev (b. 1999) graduated from the BMSTU in 2023 with a degree in Organization and Management of High-Technology Manufacturing. Postgraduate student at BMSTU, specialization Cognitive modeling. He is a co-author of six scientific articles in the fields of intelligent systems and decision support system. ORCID ID: 0009-0000-1523-3294. Author ID (RSCI): 1215414. gegrev@yandex.ru. ✉

Received August 22, 2025. Revised December 17, 2025. Accepted January 14, 2026.



Проектирование алгоритмов прогнозирования технического состояния электромеханических приводов

© 2026, Г.С. Вересников✉, Е.А. Серебровская, А.В. Скрыбин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), Москва, Россия

Аннотация

Прогнозирование технического состояния электромеханических приводов обусловлена необходимостью своевременного обнаружения неисправностей, развитие которых может привести к происшествию или невозможности выполнения функционального назначения объекта. Предлагается методика проектирования алгоритмов прогнозирования технического состояния электромеханических приводов, объединяющая методы математического моделирования электромеханического привода, основанные на регрессионном, спектральном и корреляционном анализе. Новизна работы заключается в адаптации и интеграции существующих методов обработки стационарных сигналов, учитывающих специфику объектов диагностики, которые включают взаимодействующие электрическую и механическую подсистемы. Представленные результаты получены на основе данных, сформированных с использованием разработанной математической модели, позволяющей учитывать типовые неисправности механической природы. Для повышения точности трендовых моделей в работе выделены диагностические признаки. Установлены зависимости между ними и параметрами, позволяющими описать степень развития деградаций, характеризующих расходование технического ресурса привода. В качестве целевых функций приняты точность прогноза параметров технического состояния и сложность моделей отклика, определяемая количеством используемых диагностических признаков. Приведён пример проектирования и применения алгоритма прогнозирования неисправностей электромеханического привода беспилотного летательного аппарата самолётного типа, связанных с изменением люфта, вязкого и сухого трений.

Ключевые слова: диагностика, прогнозирование, электромеханический привод, летательный аппарат, диагностические признаки, техническое состояние.

Цитирование: Вересников Г.С., Серебровская Е.А., Скрыбин А.В. Проектирование алгоритмов прогнозирования технического состояния электромеханических приводов. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.152-163. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-152-163.

Финансирование: исследование частично выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00464).

Вклад авторов: Вересников Г.С. – постановка задач, разработка структуры статьи; Серебровская Е.А. – проведение расчётов, подготовка примеров, подбор источников; Скрыбин А.В. – разработка методики исследования, подготовка исходных данных.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Исследования, направленные на разработку алгоритмов прогнозирования технического состояния (ТС) электромеханических приводов (ЭМП), имеют практическую значимость для обеспечения безопасности, например, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые широко применяются в задачах доставки грузов, мониторинга окружающей среды, контроля строительных процессов, управления транспортными потоками и др. [1-3]. ТС – это состояние объекта, которое характеризуется в определённый момент времени, при определённых условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект [4]. Для проектирования алгоритмов, позволяющих экстраполировать ретро-

спективные данные и выполнять раннюю диагностику контролируемого объекта, в данной статье предложена методика, в которой сочетаются процедуры формализации закономерностей, описывающих развитие типовых неисправностей ЭМП. Эти закономерности являются основой оценки ожидаемого ТС ЭМП в будущие периоды времени, что даёт возможность своевременно принять меры для предотвращения отказных ситуаций.

При моделировании, ресурсных испытаниях и эксплуатации ЭМП накапливаются значительные объёмы данных, которые могут использоваться при создании алгоритмов, агрегирующих эмпирическую информацию для построения систем ранней диагностики [5]. Такие системы способствуют обеспечению безотказной работы контролируемого объекта на основе регулярного мониторинга, автоматизированного обнаружения и прогнозирования развития неисправностей [6]. В настоящее время наблюдается интерес к интеллектуальным технологиям, обеспечивающим универсальность и гибкость при решении задач технической диагностики [7, 8]. В ряде исследований [9, 10] для поддержки принятия эксплуатационных решений в условиях неполной информации предлагается использовать аппарат нечёткой логики.

При разработке алгоритмов технической диагностики на основе поиска закономерностей в данных в большинстве работ рассматриваются методы, которые можно разделить на две категории: статистический анализ и машинное обучение [11, 12]. С использованием этих методов формализуются и решаются задачи выявления аномалий, классификации и прогнозирования. В задачах выявления аномалий [13] и классификации [14] строятся модели, которые позволяют определить метку класса, характеризующую текущее ТС контролируемого объекта. Формирование диагностической информации о развитии деградаций не рассматривается, что ограничивает информативность диагностики и не позволяет выявлять негативные процессы, пока не будут выполнены условия отнесения актуального вектора значений контролируемых сигналов к ТС, отличающемуся от нормального или принадлежащему к одному из заранее описанных классов неисправностей.

В задачах прогнозирования [15] создаются модели для ретроспективного анализа, предназначенные для обнаружения тенденций в эксплуатационных данных на заданном временном интервале. Эффективность подобных моделей определяется выбором предикторов – диагностических признаков (ДП), пригодных для экстраполяции оценки ТС контролируемого объекта. Для формирования предикторов целесообразно применение методов извлечения [16] и отбора признаков [17], которые позволяют уменьшить размерность обрабатываемых данных и повысить точность прогноза посредством исключения из анализа недостаточно содержательной или избыточной информации.

При статистическом подходе к прогнозированию ТС контролируемых объектов могут использоваться регрессионные и авторегрессионные модели [18-20]. Высокую эффективность показывает множественная регрессия, которая позволяет учитывать множество различных признаков и оценивать влияние каждого предиктора на точность прогноза [21].

Значительное внимание в исследованиях уделяется применению в технической диагностике методов машинного обучения, таких как деревья решений и нейронные сети. Деревья решений представляют собой иерархические структуры, где каждое решение основано на последовательной обработке значений отдельных признаков, что делает их полезными при работе с категориальными данными и при построении интерпретируемых моделей [22, 23]. Деревья решений дают возможность компактно описывать закономерности с использованием набора правил, упрощающих анализ сложных данных. Нейронные сети способны выявлять более сложные зависимости и применяются в задачах с большим объёмом эмпирической информации, но при этом трудно интерпретируемы [24, 25].

В предыдущей работе авторов решалась ограниченная задача выделения признаков для прогнозирования технического состояния электромеханических систем на основе только од-

ного сценария развития неисправности без возможности определения степени (стадии) деградации [26]. В данной статье для проектирования алгоритмов диагностики ЭМП рассматривается интеграция регрессионных моделей отклика для оценки параметров, определяющих ТС ЭМП (далее параметры ТС), и методов построения трендовых моделей.

1 Методика проектирования алгоритмов

Методика проектирования алгоритмов прогнозирования ТС, выполняющих анализ ретроспективных данных, состоит из следующих этапов:

- 1) формирование обучающего набора данных;
- 2) извлечение и отбор ДП, построение модели отклика по каждому параметру ТС;
- 3) интеграция моделей отклика с методами построения трендовых моделей.

Целью проектирования является обеспечение точности прогноза параметров ТС при малом количестве используемых ДП.

На первом этапе применяется математическая модель ЭМП для отработки в рамках множества сеансов моделирования стационарного управляющего сигнала с заданными амплитудой и частотой. ТС привода определяются комбинациями значений, не наблюдаемых при мониторинге параметров ТС, в частности люфта (Л), сухого трения (СТ), вязкого трения (ВТ). В результате моделирования формируются временные ряды из значений контролируемых сигналов.

Каждая комбинация значений параметров ТС является точкой расчётной сетки, сгенерированной с использованием полного факторного эксперимента. Пример исходной информации для создания расчётной сетки приведён в таблице 1. В соответствии с таблицей 1 формируется 230400 точек (возможные сочетания трёх параметров при указанных диапазонах изменения и дискретных шагах).

Таблица 1 – Формирование расчётной сетки при планировании сеансов моделирования (пример)

№	Параметр	Размерность	Минимальное значение	Шаг	Количество шагов	Максимальное значение
1	Люфт	°	0,2	0,04	64	2,72
2	Сухое трение	Нм	0,36	0,03	60	2,13
3	Вязкое трение	Нм/об/мин	0,001	0,001	60	0,06

Амплитуда и частота управляющего сигнала, длительность одного сеанса моделирования при фиксированных значениях параметров ТС, частота съёма данных выбираются таким образом, чтобы обеспечить применение методов частотного анализа (например, амплитуда сигнала 40°, частота 1 Гц, длительность сеанса 3 секунды, съём данных 100 значений в секунду с постоянным шагом). Результатом одного сеанса моделирования при использовании математической модели [27] является 10 временных рядов, которые соответствуют контролируемым сигналам (входной сигнал, поворот ротора двигателя, положение выходного вала, управляющее напряжение, ток питания, мощность электропитания, скорость вращения вала ротора, момент на валу ротора, механическая мощность на валу ротора, скорость вращения выходного вала). На рисунке 1 представлена схема формирования обучающего набора данных для построения моделей отклика. Согласно приведённой схеме каждой совокупности временных рядов, полученной в рамках одного сеанса моделирования, ставится в соответствие изначально заданная комбинация значений параметров ТС ЭМП.

На втором этапе производится извлечение и отбор ДП и построение моделей отклика (см. рисунок 2). Извлечение признаков выполняется с использованием методов спектрального анализа [28], в частности быстрого преобразования Фурье. Предварительный отбор при-

знаков выполняется с использованием методов корреляционного анализа [29]. Использование быстрого преобразования Фурье позволяет выполнять поиск ДП во временном и частотном диапазонах. Корреляционный анализ даёт возможность с низкими вычислительными затратами определить и исключить признаки, несущие недостаточную и/или избыточную информацию. Среди всех моментов времени и спектральных отсчётов по всем контролируемым сигналам выделяется ограниченное количество признаков (например, 10-20 признаков), составляющих входной вектор модели отклика. При построении для параметров ТС моделей отклика, описывающих относительно простые закономерности в данных, достаточно использовать методы регрессионного анализа и на основе элементарных математических функций сформировать уравнения с коэффициентами регрессии, оцениваемыми методом наименьших квадратов. Для проверки качества моделей отклика применяются статистические метрики, например, коэффициент детерминации R^2 или средняя абсолютная ошибка (САО).

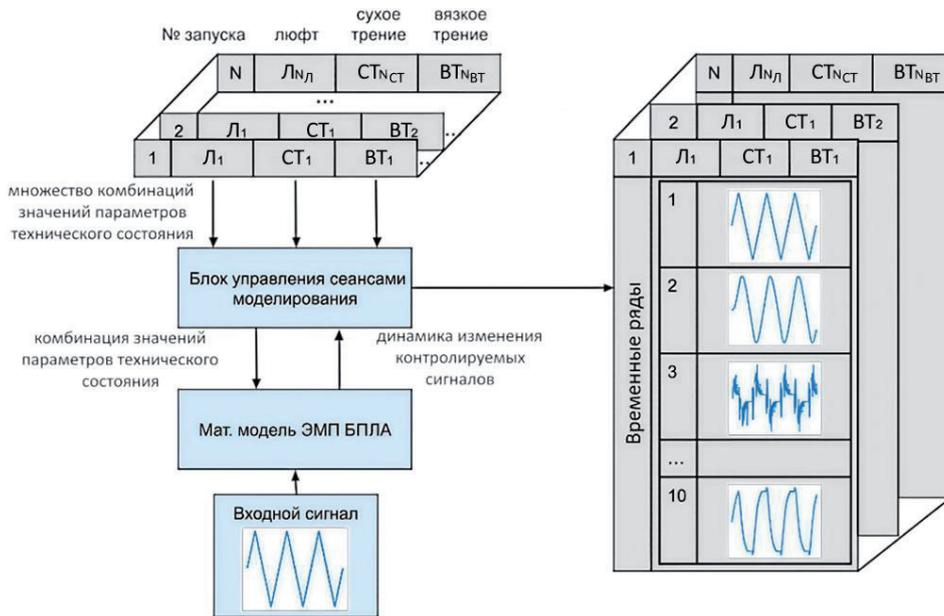


Рисунок 1 – Схема формирования обучающего набора данных

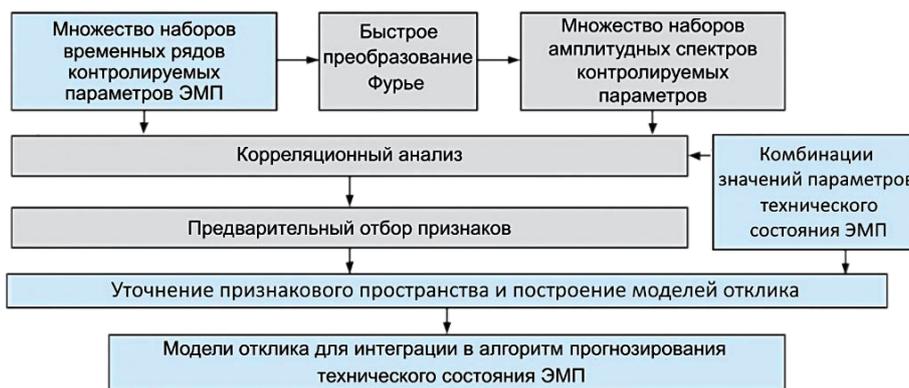


Рисунок 2 – Схема формирования признакового пространства и построения моделей отклика

На основе анализа значений коэффициентов регрессии, характеризующих степень влияния отдельных ДП на параметры ТС, и статистических метрик уточняется признаковое пространство и сложность уравнений (см. рисунок 3).

Обработка данных с использованием схем, представленных на рисунках 2 и 3, позволяет снизить вычислительные затраты на формирование качественного признакового пространства, так как исключается необходимость применения метода полного перебора.

На третьем этапе созданные модели отклика интегрируются с методами построения трендовых моделей (см. рисунок 4). Результатом применения моделей отклика к ретроспективным последовательностям входных векторов, включающих ДП, являются временные ряды для параметров ТС, которые экстраполируются на основе трендовых моделей. Результаты экстраполяции используются для создания диагностической информации. Таким образом, формируется проект единого алгоритма прогнозирования ТС ЭМП, который может быть реализован на языках программирования со специализированными математическими библиотеками.

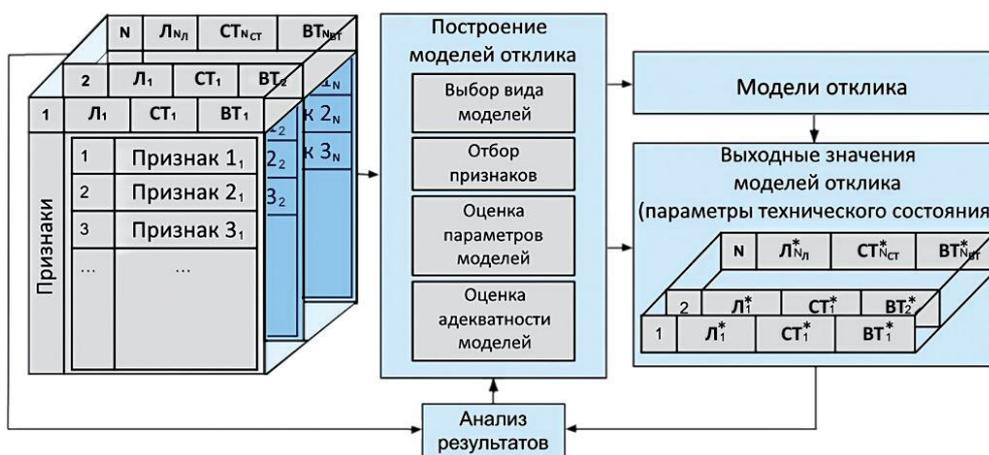


Рисунок 3 – Схема уточнения признакового пространства

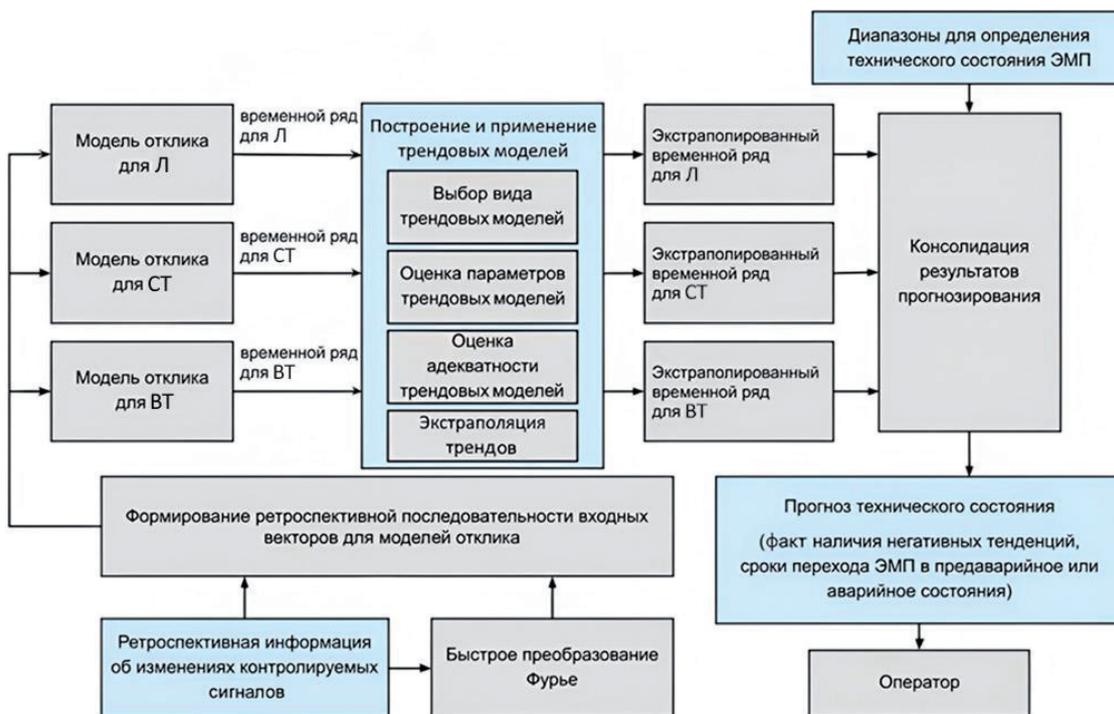


Рисунок 4 – Схема алгоритма прогнозирования технического состояния электромеханических приводов

На рисунке 5 приведены примеры экстраполяции на основе трендовых моделей для параметров ТС (сухое трение и люфт), которые изменяются от минимальных до максимальных значений согласно таблице 1 и соответствуют типу ЭМП (с прямозубым редуктором), применяющемуся в БПЛА самолётного типа. Действительные значения и выходные значения моделей отклика практически совпадают (сплошные линии), десятью точками показан результат прогноза (количество точек соответствует заданному горизонту прогнозирования). Каждый прогноз построен на основе 50 упорядоченных во времени значений, полученных от соответствующей модели отклика. Для анализа качества трендовых моделей используется коэффициент детерминации R^2 , для оценки точности прогнозирования применяются метрики: среднеквадратическая ошибка (СКО) и средняя абсолютная процентная ошибка (САПО).

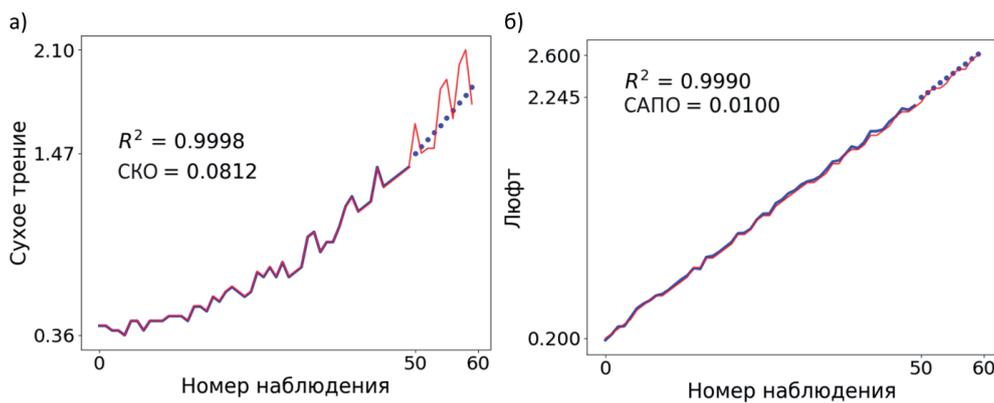


Рисунок 5 – Примеры применения трендовых моделей для прогнозирования сухого трения (а) и люфта (б)

В целях формирования диагностической информации о контролируемом объекте на основе вычисленных и экстраполированных выходных значений моделей отклика определяются классы ТС в соответствии с заданными экспертами диапазонами значений параметров ТС (пример показан в таблице 2), что позволяет выработать сообщения о возможном переходе ЭМП в предаварийное или аварийное состояния.

Таблица 2 – Классификация технических состояний электромеханических приводов

Состояние	Люфт, °	Сухое трение, Нм	Вязкое трение, Нм/об/мин
Исправное	От 0,25 до 0,52	От 0,36 До 0,51	Более 0,05
Предаварийное	От 0,56 до 1,32	От 0,54 до 1,34	От 0,011 до 0,0499
Аварийное	Более 1,36	Более 1,38	Менее 0,01

На основе предложенной методики и математической модели ЭМП [27] разработан алгоритм прогнозирования ТС ЭМП БПЛА самолётного типа. В моделях отклика для сухого трения и люфта использованы ДП, отражающие значения контролируемых сигналов в моменты времени, найденные в результате применения схем, представленных на рисунках 2 и 3. Для вязкого трения высокая точность модели отклика была достигнута при добавлении признаков, которые вычислены в результате применения быстрого преобразования Фурье.

2 Результаты тестовых расчётов

Для комплексной оценки точности созданного алгоритма сформированы тестовые данные, содержащие ретроспективные последовательности наборов временных рядов и сопоставленные им комбинации значений технических параметров. Каждая последовательность соответствовала линейному, квадратичному или экспоненциальному закону изменения одного из параметров ТС (два других параметра принимали значения, соответствующие нормаль-

ному ТС), что обеспечивало моделирование процессов перехода ЭМП в предаварийное или аварийное состояние. Количество наборов в одной последовательности варьировалось от 40 до 60, горизонт прогнозирования составлял от 5 до 20 моментов времени. Для исследования устойчивости прогноза к шуму в данных во временные ряды контролируемых сигналов добавлялись локальные выбросы и осцилляции. В итоге создано 3500 ретроспективных последовательностей по каждому параметру ТС.

Для всех ретроспективных последовательностей, которые участвовали в расчётах, ошибка САПО не превышала 2.5 %. Результаты работы алгоритма прогнозирования ТС типового ЭМП (с прямым зубным редуктором), который применяется в БПЛА самолётного типа, визуализированы для организации поддержки принятия эксплуатационных решений (см. рисунки 6 и 7). В каждом приведённом примере горизонт прогнозирования составляет семь моментов времени. Прогноз строится на основе 53 упорядоченных во времени значений, полученных от модели отклика для вязкого трения.

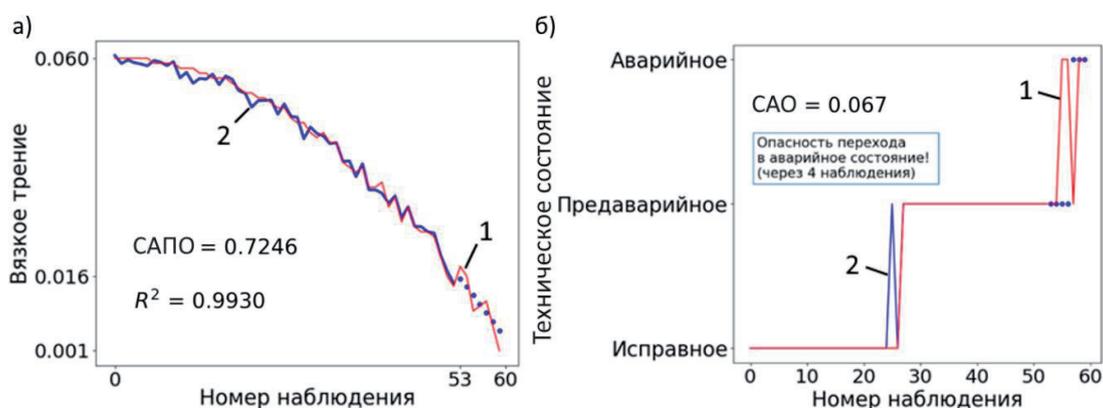


Рисунок 6 – Пример прогнозирования перехода электромеханических приводов из предаварийного в аварийное состояние, связанное с изменением вязкого трения (1 - действительные значения, 2 - по модели отклика)

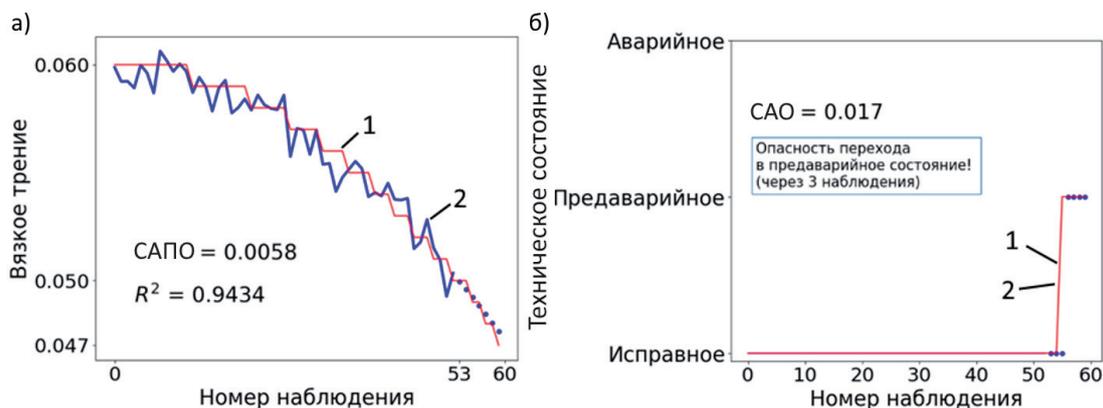


Рисунок 7 – Пример прогнозирования перехода электромеханических приводов из нормального в предаварийное состояние, связанное с изменением вязкого трения (1 - действительные значения, 2 - по модели отклика)

Заключение

Создана методика проектирования алгоритмов прогнозирования ТС ЭМП, позволяющих до наступления негативных последствий получить информацию о возможном переходе контролируемого объекта в предаварийное или аварийное состояние для выработки сообщений

оператору системы диагностики. Результаты тестовых расчётов подтвердили адекватность разработанной методики на примере алгоритма, прогнозирующего неисправности, связанные с изменением люфта, вязкого и сухого трений. Показано, что для рассматриваемых видов неисправностей регрессионный, спектральный и корреляционный анализы позволили формализовать взаимосвязи контролируемых сигналов и параметров ТС, что обеспечило построение точных моделей отклика, предназначенных для интеграции с методами построения трендовых моделей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Матюха С.В.** Возможные сферы использования беспилотных летательных аппаратов в Арктической зоне Российской Федерации. *Транспортное дело России*. 2021. №5. С.96-98. DOI: 10.52375/20728689_2021_5_96.
- [2] **Molina A.A., Huang Y., Jiang Y.** A review of unmanned aerial vehicle applications in construction management: 2016–2021. *Standards*. 2023. Vol.3. P.95-109. DOI: 10.3390/standards3020009.
- [3] **Сухарев Н.В.** Система слежения за автомобильным транспортом на базе беспилотных летательных аппаратов с применением технологии радиочастотной идентификации и камер инфракрасного диапазона. *Автоматика на транспорте*. 2023. №2. С.141-152. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-141-152.
- [4] ГОСТ 20911-89. Межгосударственный стандарт. Техническая диагностика. Термины и определения М.: Стандартиформ, 1989. 11 с.
- [5] **Yin Z., Hu N., Chen J., Yang Y., Shen G.** A review of fault diagnosis, prognosis and health management for aircraft electromechanical actuators. *IET Electric Power Applications*. 2022. Vol.16, №11. P.1249-1271. DOI: 10.1049/elp2.12225.
- [6] **Bosch C., Hajek M., Ismail M.A.A.** Preliminary system safety assessment of electromechanical actuation architectures for unmanned aerial vehicles. *5th International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems*. 2021. Saint-Raphael. France. P.133-138. DOI: 10.1109/SysTol52990.2021.9595342.
- [7] **Ковалев С.М., Колоденкова А.Е., Снасель В.** Интеллектуальные технологии слияния данных при диагностировании технических объектов. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №1(31). С.152-168. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-152-168.
- [8] **Грищенко М.А., Дородных Н.О., Коршунов С.А., Юрин А.Ю.** Разработка диагностических интеллектуальных систем на основе онтологий. *Онтология проектирования*. 2018. Т.8, №2(28). С.265-284. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-2-265-284.
- [9] **Колоденкова А.Е., Верещагина С.С., Фаворская Е.А., Осипова Е.А.** Подход к оценке технического состояния электрооборудования с использованием взвешенных нечётких правил. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №1(51). С.134-144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [10] **Колоденкова А.Е., Верещагина С.С.** Разработка системы иерархических продукционных правил для диагностирования электротехнического оборудования. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №1(35). С.63-72. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-63-72.
- [11] **Li W.Q., Zhang C.** Application of combination forecasting model in aircraft failure rate forecasting. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. P.6729608. DOI:10.1155/2022/6729608.
- [12] **Hajiyev C., Caliskan F.** Sensor/actuator fault diagnosis based on statistical analysis of innovation sequence and Robust Kalman Filtering. *Aerospace Science and Technology*. 2000. Vol.4. P.415-422. DOI:10.1016/S1270-9638(00)00143-7.
- [13] **Arellano-Espitia F., Delgado-Prieto M., Martinez-Viol V., Fernandez-Sobrino A., Osornio-Rios R.** Anomaly Detection in Electromechanical Systems by means of Deep-Autoencoder. *IEEE 26th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2021. Sweden. DOI: 10.1109/ETFA45728.2021.9613529.
- [14] **Nadezhin M., Slobodzyan N., Kiselev A.** Improving quality of the faults' classification models for electromechanical systems' diagnostics. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2022. Vol.10. P.73-80. DOI: 10.31776/RTCJ.10108.
- [15] **Guo J., Lao Z., Hou M., Li C., Zhang S.** Mechanical fault time series prediction by using EFMSAE-LSTM neural network. *Measurement*. 2020. Vol.173. P.108566. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108566.
- [16] **Bodla M.K., Malik S.M., Rasheed M.T., Numan M., Ali M.Z., Brima J.B.** Logistic regression and feature extraction based fault diagnosis of main bearing of wind turbines. *Proceedings of the 11th Conference on Industrial Electronics and Applications*. 2016. IEEE, Hefei, China. P.1628-1633. DOI:10.1109/ICIEA.2016.7603846.
- [17] **Noura H., Allal Z., Salman O., Chahine K.** An Optimized Tree-Based Model with Feature Selection for Efficient Fault Detection and Diagnosis in Diesel Engine Systems. *Results in Engineering*. 2025. Vol.27. P.106619. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106619.

- [18] **Marangis D., Livera A., Tziolis G., Makrides G., Kyprianou A., Georghiou G.E.** Trend-Based Predictive Maintenance and Fault Detection Analytics for Photovoltaic Power Plants. *Solar RRL*. 2024. Vol.8. P.2400473. DOI: 10.1002/solr.202400473.
- [19] **Patankar S.S., Kamalpure P.D.** Bearing Fault Detection Using Autoregressive Modeling. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2024. Vol.1236. P.117-127. DOI:10.1007/978-981-97-5866-1_10.
- [20] **Mu W., Zhang A., Gao W., Huo X.** Application of ARIMA Model in Fault Diagnosis of TEP. *2020 IEEE 9th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*. 2020. Liuzhou, China. P.393-398. DOI: 10.1109/DDCLS49620.2020.9275054.
- [21] **Тоноян С.А., Балдин А.В., Елисеев Д.В.** Прогнозирование технического состояния электронных систем с адаптивными параметрическими моделями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2016. №6. С.115-125. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-6-115-125.
- [22] **Хальясмаа А.И., Ревенков И.С., Сидорова А.В.** Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования. *Вестник КГЭУ*. 2022. №3(55). P.99-113.
- [23] **Spiliotis E.** Decision trees for time-series forecasting. *The International Journal of Applied Forecasting, International Institute of Forecasters*. 2022. Is.64. P.30-44.
- [24] **Tealab A.** Time series forecasting using artificial neural networks methodologies: A systematic review. *Future Computing and Informatics Journal*. 2018. Vol.3, Is.2. P.334-340. DOI: 10.1016/j.fcij.2018.10.003.
- [25] **Lin Y.** Fault Prediction and Diagnosis of Electromechanical Equipment based on LSTM Neural Network. *First International Conference on Software, Systems and Information Technology*. 2024. Tumkur, India. P.1-7. DOI: 10.1109/SSITCON62437.2024.10795988.
- [26] **Veresnikov G.S., Skryabin A.V., Golev A.V.** Optimization Algorithms for Informative Features Extraction to Predict the Aircraft Electromechanical Systems Technical Condition. *16th International Conference Management of Large-Scale System Development*. 2023. Moscow, Russia. P.1-5. DOI: 10.1109/MLSD58227.2023.10303769.
- [27] **Скрябин А.В.** Математическая модель для обучающихся систем ранней диагностики редуктора электромеханического привода. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2025. № 3(151). С.71-92. EDN: QHNESI.
- [28] **Chen X., Xu M., Wu W.B.** Covariance and precision matrix estimation for high-dimensional time series. *The Annals of Statistics*. 2013. Vol.41. P.2994-3021. DOI: 10.1214/13-AOS1182.
- [29] **Fiecas M., Leng C., Liu W., Yu Y.** Spectral analysis of high-dimensional time series. *Electronic Journal of Statistics*. 2019. Vol.13, №2. P.4079-4101. DOI: 10.1214/19-EJS1621.

Сведения об авторах



Вересников Георгий Сергеевич, 1980 г. рождения. Окончил ЮРГТУ (НПИ) в 2003 г., д.т.н. (2021). Ведущий научный сотрудник лаборатории систем поддержки принятия решений ИПУ РАН. В списке научных трудов более 100 работ в области проектирования и диагностики технических объектов. ORCID: 0000-0002-9985-5652, Author ID (РИНЦ): 598262; Author ID (Scopus): 57193709333; Researcher ID (WoS): ABD-2779-2020. veresnikov@mail.ru. ✉.



Серебровская Екатерина Александровна, 2002 г. рождения. Окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2024 г. Инженер ИПУ РАН. Научные интересы: системы поддержки принятия решений, анализ и обработка многомерных данных, методы прогнозирования. ORCID: 0009-0008-4853-8092, Author ID (РИНЦ): 1314051. e.a.serebrovskaya@gmail.com.



Скрябин Алексей Валерьевич, 1988 г. рождения. Окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г., к.т.н. (2024). Старший научный сотрудник лаборатории систем поддержки принятия решений ИПУ РАН. В списке научных трудов более 50 работ в области диагностики электромеханических систем. ORCID: 0009-0006-5406-7288, Author ID (РИНЦ): 1088798; Author ID (Scopus): 57196237107, Researcher ID (WoS): ABD-4605-2020. skryabinalexey@gmail.com.

Поступила в редакцию 31.10.2025, после рецензирования 22.12.2025. Принята к публикации 13.02.2026.



Design of algorithms for predicting the technical condition of electromechanical drives

© 2026, G.S. Veresnikov ✉, E.A. Serebrovskaya, A.V. Skryabin

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

Forecasting the technical condition of electromechanical drives requires the timely detection of faults whose progression may lead to accidents or the inability of a system to fulfill its intended function. This paper proposes a methodology for designing algorithms to predict the technical condition of electromechanical drives, integrating mathematical modeling techniques with regression, spectral, and correlation analyses. The novelty of this work lies in the adaptation and integration of established stationary signal processing methods, tailored to the specific characteristics of diagnostic objects comprising interacting electrical and mechanical subsystems. The presented results are based on data generated using a developed mathematical model that accounts for typical mechanical faults. To improve the accuracy of trend-based models, diagnostic features were identified and extracted. Relationships were established between these features and parameters describing the degree of degradation associated with the consumption of the drive's service life. Forecast accuracy of technical condition parameters and model complexity, defined by the number of diagnostic features employed, were adopted as objective functions. An example is provided illustrating the design and application of a fault prediction algorithm for the electromechanical drive of a fixed-wing unmanned aerial vehicle, addressing faults associated with variations in backlash, viscous friction, and dry friction.

Keywords: diagnostics, forecasting, electromechanical drive, aircraft, diagnostic features.

For citation: Veresnikov GS, Serebrovskaya EA, Skryabin AV. Design of algorithms for predicting the technical condition of electromechanical drives [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 152-163. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-152-163.

Financial Support: The study was partially supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 23-19-00464).

Authors' contributions: Veresnikov G.S. – problem formulation and development of the article structure; Serebrovskaya E.A. – computational analysis, preparation of examples, and literature review; Skryabin A.V. – development of the research methodology and preparation of input data.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Diagram of training dataset formation

Figure 2 – Diagram of feature space construction and response model development

Figure 3 – Diagram of feature space refinement

Figure 4 – Flowchart of the algorithm for predicting the technical condition of electromechanical drives

Figure 5 – Examples of applying trend-based models to predict dry friction (a) and backlash (b)

Figure 6 – Example of predicting the transition of electromechanical drives from a pre-failure to an failure condition associated with changes in viscous friction (1 - actual values, 2 - response model estimates)

Figure 7 – Example of predicting the transition of electromechanical drives from a normal to a pre-failure condition associated with changes in viscous friction (1 - actual values, 2 - response model estimates)

Table 1 – Formation of the computational grid for planning simulation sessions (Example)

Table 2 – Classification of technical conditions of electromechanical drives

References

- [1] *Matyukha SV*. Possible areas of use of unmanned aerial vehicles in the Arctic zone of the Russian Federation [In Russian]. *Transport business in Russia*. 2021; 5: 96-98. DOI: 10.52375/20728689_2021_5_96.

- [2] **Molina AA, Huang Y, Jiang Y.** A review of unmanned aerial vehicle applications in construction management: 2016–2021. *Standards*. 2023; 3: 95-109. DOI: 10.3390/standards3020009.
- [3] **Sukharev NV.** Vehicle tracking system based on unmanned aerial vehicles using radio frequency identification technology and infrared cameras [In Russian]. *Automation in transport*. 2023; 2: 141-152. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-141-152.
- [4] GOST 20911-89. Interstate standard. Technical diagnostics. Terms and definitions [In Russian]. Moscow: Standartinform, 1989. 11 p.
- [5] **Yin Z, Hu N, Chen J, Yang Y, Shen G.** A review of fault diagnosis, prognosis and health management for aircraft electromechanical actuators. *IET Electric Power Applications*. 2022; 16(11): 1249-1271. DOI: 10.1049/elp2.12225.
- [6] **Bosch C, Hajek M, Ismail MAA.** Preliminary system safety assessment of electromechanical actuation architectures for unmanned aerial vehicles. In: *Control and Fault-Tolerant Systems, proc. of the 5th Int. Conf.* (Saint-Raphael, France, 2021, September 29 - October 01). IEEE, 2021: 133-138. DOI: 10.1109/SysTo152990.2021.9595342.
- [7] **Kovalev SM, Kolodenkova AE, Snasel V.** Intellectual technologies of data fusion for diagnostics technical objects [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(1): 152-168. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-152-168.
- [8] **Grishchenko MA, Dorodnykh NO, Korshunov SA, Yurin AYu.** Ontology-based development of diagnostic intelligent systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(2): 265-284. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-2-265-284.
- [9] **Kolodenkova AE, Vereshchagina SS, Favorskaya EA, Osipova EA.** An approach to assessing the technical condition of electrical equipment using weighted fuzzy rules [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(1): 134-144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [10] **Kolodenkova AE, Vereshchagina SS.** Development of a system of hierarchical production rules for electrical equipment diagnosing [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(1): 63-72. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-63-72.
- [11] **Li WQ, Zhang C.** Application of combination forecasting model in aircraft failure rate forecasting. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022: 6729608. DOI:10.1155/2022/6729608.
- [12] **Hajiyev C, Caliskan F.** Sensor/actuator fault diagnosis based on statistical analysis of innovation sequence and Robust Kalman Filtering. *Aerospace Science and Technology*. 2000; 4: 415-422. DOI:10.1016/S1270-9638(00)00143-7.
- [13] **Arellano-Espitia F, Delgado-Prieto M, Martinez-Viol V, Fernandez-Sobrino A, Osornio-Rios R.** Anomaly Detection in Electromechanical Systems by means of Deep-Autoencoder. In: *Emerging Technologies and Factory Automation, proc. of the 26th Int. Conf.* (Vasteras, Sweden, 2021, September 07-10). IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ETFA45728.2021.9613529.
- [14] **Nadezhin M, Slobodzyan N, Kiselev A.** Improving quality of the faults' classification models for electromechanical systems' diagnostics. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2022; 10: 73-80. DOI: 10.31776/RTCJ.10108.
- [15] **Guo J, Lao Z, Hou M, Li C., Zhang S.** Mechanical fault time series prediction by using EFMSAE-LSTM neural network. *Measurement*. 2020; 173: 108566. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108566.
- [16] **Bodla MK, Malik SM, Rasheed MT, Numan M, Ali MZ, Brima JB.** Logistic regression and feature extraction based fault diagnosis of main bearing of wind turbines. In: *Industrial Electronics and Applications, proc. of the 11th Int. Conf.* (Hefei, China, 2016, June 05-07). IEEE, 2016: 1628-1633. DOI:10.1109/ICIEA.2016.7603846.
- [17] **Noura H, Allal Z, Salman O, Chahine K.** An Optimized Tree-Based Model with Feature Selection for Efficient Fault Detection and Diagnosis in Diesel Engine Systems. *Results in Engineering*. 2025; 27: 106619. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106619.
- [18] **Marangis D, Livera A, Tziolis G, Makrides G, Kyprianou A, Georghiou GE.** Trend-Based Predictive Maintenance and Fault Detection Analytics for Photovoltaic Power Plants. *Solar RRL*. 2024; 8: 2400473. DOI: 10.1002/solr.202400473.
- [19] **Patankar SS, Kamalapur PD.** Bearing Fault Detection Using Autoregressive Modeling. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2024; 1236: 117-127. DOI:10.1007/978-981-97-5866-1_10.
- [20] **Mu W, Zhang A, Gao W, Huo X.** Application of ARIMA Model in Fault Diagnosis of TEP. In: *Data Driven Control and Learning Systems, proc. of the 9th Int. Conf.* (Liuzhou, China, 2020, November 20-22). IEEE, 2020: 393-398. DOI: 10.1109/DDCLS49620.2020.9275054.
- [21] **Tonoyan SA, Baldin AV, Eliseev DV.** Technical state prediction of electronic systems with adaptive parametric models [In Russian]. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering*. 2016; 6: 115-125. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-6-115-125.
- [22] **Khalyasmaa AI, Revenkov IS, Sidorova AV.** Application of digital twin technology for analysis and prediction state of power transformer equipment [In Russian]. *Vestnik KGEU*. 2022; 3(55): 99-113.
- [23] **Spiliotis E.** Decision trees for time-series forecasting. *The International Journal of Applied Forecasting, International Institute of Forecasters*. 2022; 64: 30-44.

- [24] **Tealab A.** Time series forecasting using artificial neural networks methodologies: A systematic review. *Future Computing and Informatics Journal*. 2018; 3(2): 334-340. DOI: 10.1016/j.fcij.2018.10.003.
- [25] **Lin Y.** Fault Prediction and Diagnosis of Electromechanical Equipment based on LSTM Neural Network. In: *Software, Systems and Information Technology, proc. of the 11th Int. Conf.* (Tumkur, India, 2024, October 18-19). IEEE, 2024: 1-7. DOI: 10.1109/SSITCON62437.2024.10795988.
- [26] **Veresnikov GS, Skryabin AV, Golev AV.** Optimization Algorithms for Informative Features Extraction to Predict the Aircraft Electromechanical Systems Technical Condition. In: *Management of Large-Scale System Development, proc. of the 16th Int. Conf.* (Moscow, Russia, 2023, September 26-28). IEEE, 2023: 1-5. DOI: 10.1109/MLSD58227.2023.10303769.
- [27] **Skryabin AV.** Mathematical model for learning systems of early diagnostics of electromechanical drive gearbox [In Russian]. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*. 2025; 3(151):71-92.
- [28] **Chen X, Xu M, Wu WB.** Covariance and precision matrix estimation for high-dimensional time series. *The Annals of Statistics*. 2013; 41: 2994-3021. DOI: 10.1214/13-AOS1182.
- [29] **Fiecas M, Leng C, Liu W, Yu Y.** Spectral analysis of high-dimensional time series. *Electronic Journal of Statistics*. 2019; 13(2): 4079-4101. DOI: 10.1214/19-EJS1621.
-

About the authors

Georgy Sergeevich Veresnikov (b. 1980) graduated from Platov South-Russian State Polytechnic University (Volgondsk, Russia) in 2003, Doctor of Technical Sciences (2021). Leading Researcher at the Laboratory of Decision Support Systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. He is the author and a co-author of about 100 scientific publications in the field of design and diagnostics of technical systems. ORCID: 0000-0002-9985-5652, Author ID (RSCI): 598262; Author ID (Scopus): 57193709333; Researcher ID (WoS): ABD-2779-2020. veresnikov@mail.ru. ✉.

Ekaterina Aleksandrovna Serebrovskaya (b. 2002) graduated from Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia) in 2024. She is an Engineer at the Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. Research interests include decision support systems, multidimensional data analysis and processing, and forecasting methods. ORCID: 0009-0008-4853-8092, Author ID (RSCI): 1314051. e.a.serebrovskaya@gmail.com.

Alexey Valerievich Skryabin (b. 1988) graduated from Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia) in 2011, Candidate of Technical Sciences (2024). He is a Senior researcher at the Laboratory of Decision Support Systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. He is the author and a co-author of about 50 scientific works in the field of diagnostics of electromechanical systems. ORCID: 0009-0006-5406-7288, Author ID (RSCI): 1088798; Author ID (Scopus): 57196237107; Researcher ID (WoS): ABD-4605-2020. skryabinalexey@gmail.com.

Received October 31, 2025. Revised December 22, 2025. Accepted February 13, 2026.



Применение методов искусственного интеллекта при формировании индивидуальной траектории обучения

© 2026, А.З. Асанов¹✉, И.Ю. Мышкина², А.С. Мурашко²

¹ Институт искусственного интеллекта МИРЭА – Российского технологического университета, Москва, Россия

² Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

Аннотация

Рассматривается возможность применения методов искусственного интеллекта в системе управления дистанционным обучением. Представлена структурная схема интеллектуальной системы управления дистанционным обучением. Выделены направления применения онтологического моделирования в данной системе. Рассмотрены подходы к решению задачи формирования индивидуальной траектории обучения на основе графа знаний электронного учебного курса, возможность построения векторных представлений графа знаний и использования нейронных сетей для анализа цифрового следа обучаемых. Задачи исследования включают: построение графа знаний электронного учебного курса; применение векторных представлений вершин и отношений графа знаний; выбор архитектуры, структуры и обучение нейронной сети для решения задачи формирования индивидуальной траектории обучения. В предложенном подходе для формирования индивидуальной траектории обучения используется граф знаний электронного курса, включающий параметры электронного курса и данные о пользователях, прошедших обучение. Представление элементов графа в виде векторов позволяет применить к исследованию предметной области методы машинного обучения, в том числе нейросетевые модели. Приводится методический пример использования предложенного подхода.

Ключевые слова: граф знаний, онтология, электронный курс, персонализация, траектория обучения, нейронная сеть.

Цитирование: Асанов А.З., Мышкина И.Ю., Мурашко А.С. Применение методов искусственного интеллекта при формировании индивидуальной траектории обучения. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.164-176. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-164-176.

Вклад авторов: Асанов А.З. – постановка задачи исследования, Мышкина И.Ю. – разработка и реализация моделей и алгоритмов, Мурашко А.С. – обзор существующих подходов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Актуальность задачи совершенствования моделей и алгоритмов, применяемых в системах управления дистанционным обучением, обусловлена внедрением на всех уровнях образования компьютерных средств обучения и дистанционных образовательных технологий, что способствует индивидуализации процесса обучения. Необходимость принятия решения в условиях неопределённости и алгоритмическая сложность задачи построения индивидуальной (адаптивной) траектории обучения (ИТО) делают целесообразным применение методов искусственного интеллекта (ИИ) [1-10].

В [1] представлен обзор исследований, посвящённых использованию ИИ в высшее образование за период с 2016 по 2022 годы. Проведённый анализ позволил выделить ключевые направления применения ИИ: автоматизированная оценка и анализ учебных достижений; прогностические модели для предсказания образовательных траекторий; разработка интел-

лектуальных ассистентов для поддержки учебного процесса; создание интеллектуальных обучающих систем (ИОС), адаптированных к индивидуальным потребностям обучающихся; автоматизация управления учебным процессом на основе ИИ-технологий.

В применении ИИ в образовательной системе согласно [2] может быть выделено два основных направления: оптимизация и реорганизация учебного процесса с использованием ИИ-технологий; взаимодействие между участниками образовательного процесса, включая студентов, преподавателей и административный персонал. Вопросам анализа потенциальных рисков, связанных с внедрением технологий ИИ, особенно больших языковых моделей (БЯМ), в высшее образование посвящена работа [3], предлагаются меры по минимизации выявленных рисков.

Индивидуализация электронного обучения (ЭО) с применением графов знаний (ГЗ), онтологий и методов машинного обучения (МО) исследуется в [4]. Особое внимание уделяется использованию аппарата векторных представлений ГЗ для автоматизации процессов персонализации обучения. В [5] предлагается модель содержания электронного учебного курса (ЭУК), которая представляет совокупность древовидного ориентированного графа учебных элементов и таблицы их атрибутов.

Построение онтологической модели личности молодого исследователя и разработка математической модели его личностного роста рассмотрено в [6], предложен комплексный подход к оценке и прогнозированию развития профессиональных и личностных качеств будущих исследователей.

Анализ эволюции образования, включающий онтологические основы классно-урочной системы и принципы инновационного смарт-образования, проведён в [7]. Внимание уделяется вопросам индивидуализации и персонификации обучения с использованием ИИ-технологий. Методы когнитивного моделирования применяются для исследования процессов адаптивного обучения, разрабатываются математические модели, позволяющие прогнозировать и оптимизировать адаптацию учебных материалов под индивидуальные потребности студентов [8].

Методам сбора и обработки данных о поведении пользователей в системах ЭО посвящена работа [9], где рассматриваются сценарии использования результатов анализа для повышения эффективности образовательного процесса и предлагаются подходы к их реализации.

Большинство современных подходов к разработке ИТО базируется на поэтапной классификации обучающихся по результатам изучения разделов ЭУК. На каждом этапе обучения выполняется задача классификации обучающихся, с отнесением каждого из них к одному из определённых классов или групп. Для каждой группы разрабатываются ИТО, осуществляется вариация признаков пространства, включающего характеристики обучающихся и результаты их учебной деятельности. Применяются различные классификационные модели, такие как байесовские алгоритмы, нейронные сети, методы нечёткой логики и др.

В данной работе для формирования ИТО предлагается использовать ГЗ ЭУК, что позволяет учитывать параметры ЭУК и данные о пользователях, завершивших обучение. Представление элементов ГЗ в виде числовых векторов предоставляет возможность применения методов МО для анализа предметной области (ПрО), в том числе нейросетевых моделей.

1 Интеллектуальная система управления дистанционным обучением

В [11] рассматриваются этапы развития ЭО и соответствующие этим этапам цифровые инструменты – электронные учебники (начало 90-х годов), системы управления обучением (2000-е г.), облачные сервисы (начало 2000-х г.), открытые курсы, массовые открытые онлайн-курсы (2010-е г.). К актуальным трендам развития цифровых технологий в образовании

в настоящее время относят: адаптивные технологии обучения; методы ИИ и МО; сбор и анализ цифрового следа обучения; технологии виртуальной и дополненной реальности [12].

В [13] на основе непрерывного анализа данных об обучающемся формируется ИТО, под которой понимается «...последовательность учебных задач и материалов, которая формируется исходя из анализа персональных характеристик обучающегося и целей обучения».

В таблице 1 приведены цифровые инструменты и платформы для организации обучения студентов высших учебных заведений и/или корпоративного обучения, их краткое описание, особенности реализуемого с их помощью образовательного процесса [14-16]. Как видно из таблицы 1, повышение адаптивности ЭО может быть достигнуто путём разработки гибридных систем на основе применения методов ИИ.

Таблица 1 – Цифровые инструменты и платформы для электронного обучения

Цифровые инструменты и платформы	Описание	Применение в образовательном процессе
Инструменты для создания курсов электронного обучения ¹	Программное обеспечение для создания электронных учебных курсов.	Адаптивность обучения может быть реализована при наличии альтернативных модулей для изучения тем курса и возможности их выбора обучающимся.
Система управления обучением	Информационная система, предназначенная для обеспечения поддержки процессов, связанных с электронным обучением [14].	Ориентирована прежде всего на администрирование учебных процессов. Встроенные механизмы адаптации траектории обучения под особенности обучающихся ограничены.
Система управления образовательным контентом	Информационная система, используемая для создания, хранения, сбора и/или доставки образовательного контента [14].	Управляет учебным контентом. Позволяет создавать интерактивный учебный контент, способный адаптироваться к индивидуальным особенностям обучающихся.
Платформа подбора и рекомендации обучения	Платформа использует методы ИИ, МО, технологии рекомендательных систем для адаптации процесса обучения к особенностям, потребностям и опыту обучаемого.	Платформа способна агрегировать образовательный контент и использовать внешние источники учебного материала, рекомендательные алгоритмы, учитывающие индивидуальные особенности, потребности и опыт обучающегося.
Платформы управления микрообучением	Корпоративные системы управления обучением на основе учебных материалов небольшого объёма, встраиваемые в рабочие процессы.	Разбивают учебный материал на небольшие части, комбинации которых позволяют выстраивать различные траектории обучения.
Открытые онлайн-курсы	Открытые электронные курсы, доступные через Интернет, рассчитанные на обучение большого количества слушателей	Ориентированы на широкую аудиторию с заданной траекторией изучения материала и ограниченными средствами адаптации. Обучающийся самостоятельно определяет темп обучения.
Технологии виртуальной или дополненной реальности	Инструменты, создающие иммерсивную среду для формирования умений и навыков, оценки компетенций в условиях, близких к реальным.	Позволяют сделать учебный процесс более интерактивным, информативным и наглядным, способствуют в большей степени закреплению механических навыков ² .
Технологии цифровых игровых методик и элементов в обучении	Внедрение игровых методик в процесс обучения с целью повышения мотивации к обучению.	Позволяет повысить вовлечённость обучающихся [15].
Управление результативностью	Система оценки профессионального развития сотрудников, которая включает оценки компетенций и эффективности выполнения профессиональных задач после обучения.	Наличие механизма оценки компетенций и результативности работы позволяет выбрать направления профессионального развития, планировать обучение и оценивать перспективы карьерного роста.
Таксономия навыков	Создание единой системы классификации и стандартизации профессиональных компетенций, используемых при найме, адаптации и обучении персонала ² .	Позволит создавать модель компетенций в различных областях профессиональной деятельности для решения задач управления персоналом, в том числе обучения персонала.

¹ Ken Joseph. Learning Technology Trends. April 17, 2023. <https://brandonhall.com/learning-technology-trends/>.

² Селевич Е. 6 самых перспективных технологий для корпоративного обучения. <https://skillbox.ru/media/corptrain/6-samykh-perspektivnykh-tekhnologiy-dlya-korporativnogo-obucheniya/>.

В качестве возможных механизмов адаптации ЭУК к индивидуальным особенностям обучающихся можно выделить следующие [17-21].

- *Создание альтернативных модулей для изучения разделов курса.* Возможные траектории изучения учебных модулей курса определяет разработчик курса. Курс имеет нелинейную структуру, для изучения одной темы модули могут отличаться, например, уровнем сложности материала. Обучающийся может выбирать модуль для изучения и/или дополнительные материалы, пропускать известный ему материал. Выбор может осуществляться в соответствии со встроенными алгоритмами системы управления обучением, например, на основе анализа цифрового следа обучения с применением методов МО.
- *Выбор темпа обучения.* Обучающийся может проходить курс в удобном для себя темпе. Цифровой след обучения может включать данные о времени, затраченном на задания, успешности выполнения и частоте ошибок, что может использоваться для прогнозирования успеваемости и корректировки ИТО.
- *Учёт промежуточных результатов прохождения курса.* Использование результатов входного и/или промежуточного контроля или/и анкетирования для выбора учебных модулей для последующего изучения. После прохождения каждого раздела обучающийся может быть отнесён к одному из определённых классов, а для каждого класса определяется учебный модуль для изучения следующего раздела курса.
- *Использование адаптивного тестирования.* На основе прогноза успешности обучения (по прошлым оценкам) для каждого обучающегося может быть сформирован индивидуальный набор тестовых заданий. Формирование тестовых заданий может осуществляться в соответствии с уровнями таксономии Блума [22], использующейся при проектировании учебных курсов.

Упрощённая структурная схема интеллектуальной системы управления дистанционным обучением представлена на рисунках 1 и 2. Ядром любой интеллектуальной системы является база знаний, в данной случае онтологическая база знаний, включающая онтологию обучаемого, онтологию преподавателя и онтологию ЭУК.

Онтологии знаний обучаемого и преподавателя вместе с моделями их поведения позволяют представить их как интеллектуальных агентов в автоматизированных обучающих системах, что позволит учитывать потребности и возможности обучаемых и автоматизировать решения типовых задач в деятельности преподавателя [23].

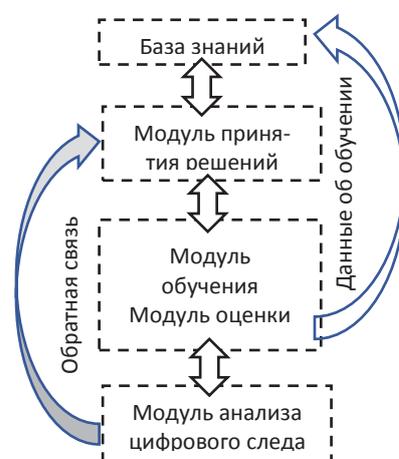


Рисунок 1 – Основные составляющие интеллектуальной системы управления дистанционным обучением

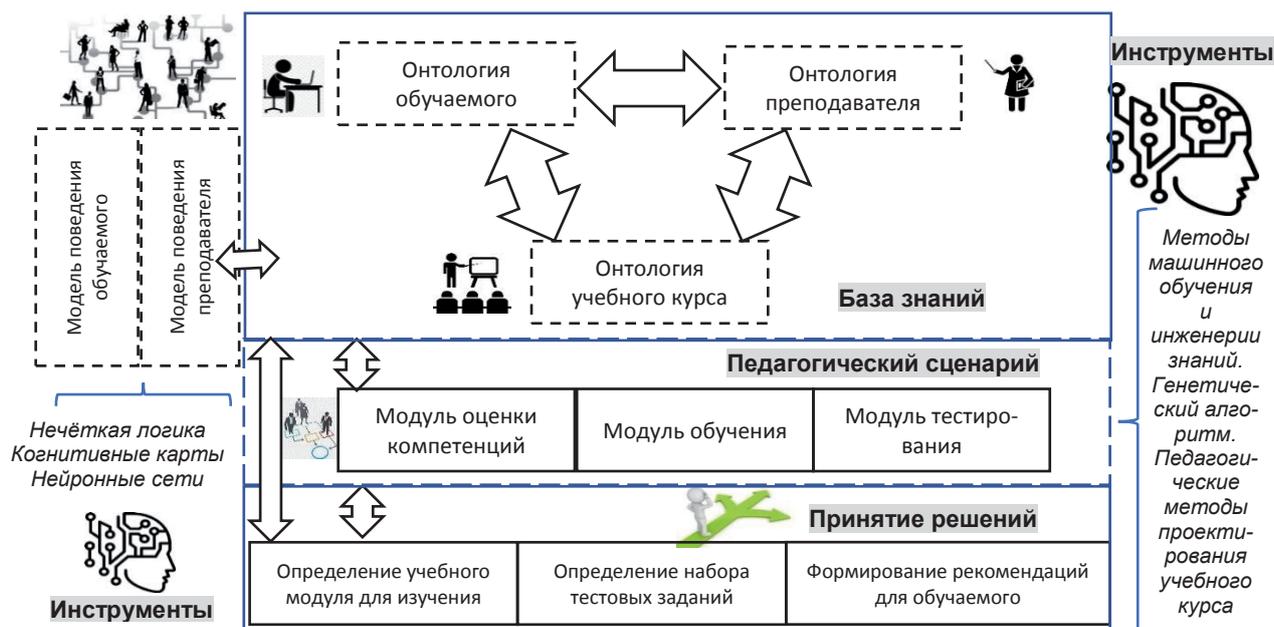


Рисунок 2 – Структурная схема интеллектуальной системы управления дистанционным обучением

В данной работе решается частная задача выбора одного из альтернативных модулей для изучения на основе анализа цифрового следа обучения.

ГЗ ЭУК строится на основе предварительно разработанного педагогического сценария ЭУК [24]. Разрабатываются альтернативные модули для изучения некоторых разделов ЭУК, определяются возможные ИТО. Информация о каждом альтернативном модуле является доступной для обучающихся. В результате изучения курса обучаемыми происходит накопление данных о его прохождении. Выбор модуля из возможных альтернатив на этапе сбора данных может осуществлять обучающийся на основе самооценки своих возможностей и уровня заинтересованности в более глубоком освоении дисциплины. Следующий модуль для изучения может быть предложен по результатам тестирования по предыдущему модулю.

ГЗ может быть расширен путём добавления элементов ЭУК в качестве вершин и построения соответствующих связей между. Например: контрольные задания по каждому разделу, разделённые на уровни освоения [25], и уровни сложности; время, затраченное на изучение разделов и прохождение тестирования; компетенции и оценки уровней их сформированности у студентов; данные о прохождении других курсов; психолого-личностные характеристики студента; личные интересы и т.п. Графовое представление курса [26] позволит учитывать связи между компетенциями, между заданиями и компетенциями, между темами и компетенциями.

2 Методический пример

В качестве методического примера рассмотрен упрощённый ЭУК, представленный в виде ГЗ на рисунке 3. ЭУК содержит четыре тематических раздела, включая входной, итоговый и промежуточный контроль освоения каждого раздела. На графе промежуточный контроль и/или результаты промежуточного контроля ассоциируются с вершинами, соответствующими изучаемым учебным модулям (не представлены отдельными вершинами).

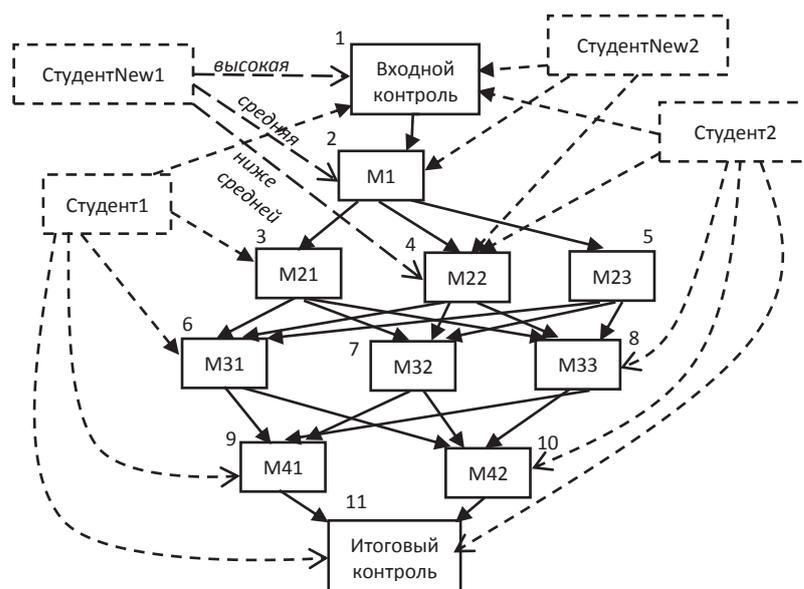


Рисунок 3 – Фрагмент упрощённого оргграфа учебного курса

Первый тематический раздел ЭУК представлен одним учебным модулем (вершина M1, номер вершины – 2, номера вершин графа приводятся рядом с соответствующей вершиной). Второй и третий тематические разделы содержат по три альтернативных учебных модуля (второй раздел: вершины M21, M22, M23, номера вершин – 3, 4, 5; третий раздел: вершины M31, M32, M33, номера вершин – 6, 7, 8). Четвёртый тематический раздел содержит два альтернативных учебных модуля (вершины M41, M42, номера вершин – 9, 10). Связи между вершинами, соответствующими модулям ЭУК определяют последовательность их изучения, т.е. соответствуют возможным ИТО изучения курса. В рассматриваемом графе предполагается возможным после изучения любого тематического раздела переход к любому модулю следующего раздела. Связи между вершинами с номерами от 1 до 11 (входной и итоговый контроль, учебные модули) имеют один тип, который условно может быть обозначен *ПослеСледует*.

Представленный граф ЭУК содержит также вершины, соответствующие изучающим курс студентам. Наличие связи между вершиной, соответствующей студенту, и вершиной, соответствующей учебному модулю или промежуточному и/или итоговому контролю, свидетельствует о том, что студент изучил этот модуль или прошёл точки контроля ЭУК. Связи

между вершинами в этом случае (студент и входной и итоговый контроль, студент и учебные модули) могут иметь четыре типа: *НижеСреднего*, *Средний*, *ВышеСреднего*, *Высокий*. Конкретный тип связи соответствует результатам освоения соответствующего модуля и результатам прохождения входного и/или итогового контроля. Набор тестов для промежуточного контроля по каждому разделу в данном курсе одинаков для всех альтернативных учебных модулей раздела. Предполагается, что в случае неудовлетворительного результата студент изучает модуль курса повторно. В общем случае в подобной ситуации разработчик курса может предусмотреть альтернативные учебные модули для изучения студентом.

В примере на рисунке 3 предполагается лишь продвижение сверху-вниз от предыдущего раздела к последующему. Эта схема ограничивает адаптивные возможности изучения курса. В этих условиях могут быть сформированы различные версии групповых образовательных траекторий, отличающиеся видами персонификации на основе учёта особенностей нескольких групп обучающихся. В общем случае обучаемые могут пропускать некоторые модули, возвращаться к предыдущим модулям и т.д., т.е. свободно «перемещаться» по учебному материалу, что повышает индивидуализацию учебного процесса.

Задача построения ИТО изучения рассматриваемого ЭУК решается путём выбора перед изучением каждого тематического раздела курса одного из альтернативных модулей на основе результатов освоения учебных модулей предыдущих разделов и результатов входного контроля. Прогнозирование номера модуля для изучения осуществляется на основе векторных представлений элементов ГЗ курса и на основе обучения нейронных сетей (НС), что позволяет определить наиболее подходящий модуль для изучения третьего раздела рассматриваемого ЭУК для обучающегося *СтудентNew1*.

Для рассматриваемого ЭУК обучающий набор данных был смоделирован. Результаты входного контроля и результаты изучения единственного модуля первого раздела курса – случайные величины с равномерным законом распределения. Номер модуля для изучения последующих разделов курса из числа имеющихся альтернативных модулей может быть рассчитан как некоторая функция от результатов изучения предыдущего и/или предыдущих модулей курса. Каждому модулю соответствует определённый диапазон значений результата изучения предыдущего модуля курса. Логика выбора модуля, реализованная при моделировании обучающей выборки, заключалась в том, что модулю с меньшим номером соответствовали меньшие значения результата изучения предыдущего модуля.

Например, второй тематический раздел рассматриваемого ЭУК представлен тремя модулями, где использовалось следующее правило выбора модуля для изучения: ЕСЛИ результат изучения первого раздела меньше 70, ТО следующий модуль – 3; ИНАЧЕ ЕСЛИ результат изучения первого раздела меньше 84, ТО следующий модуль – 4, ИНАЧЕ следующий модуль – 5. Значение итогового контроля рассчитывается как взвешенное среднее результатов изучения каждого раздела курса. Случайные факторы, влияющие на конечный результат прохождения курса, моделировались добавлением к взвешенному среднему значения случайной величины с нормальным законом распределения. Объём выборки (общее число обучающихся, прошедших курс) – 500.

Для применения методов МО к анализу графовых моделей (ГМ) можно применить существующие алгоритмы получения векторных представлений их вершин и отношений. Задачи, базирующиеся на ГМ, можно решить с применением методов МО³ – это предсказание связей между вершинами и классификация вершин. Методы построения векторных представлений вершин и отношений простого графа и ГЗ представлены в работах [27-30]. Для работы с ГЗ использованы готовые функции библиотеки *Python PyKEEN*⁴.

Прогнозирование модуля для изучения сводится к задаче предсказания связей между соответствующими вершинами: студент – учебный модуль. Из анализа графа рассматриваемо-

³ KG Course 2021. Курс по графам знаний (Knowledge Graphs) и как их готовить в 2021 году. На русском языке. <https://migalkin.github.io/kgcourse2021/>.

⁴ PyKEEN 1.10.0 documentation. <https://pykeen.readthedocs.io/en/stable/index.html>.

го ЭУК получены оценки (вероятности) наличия связи (ребра) между вершиной, соответствующей обучающемуся *СтудентNew1*, и вершинами, соответствующими модулям третьего тематического раздела, с типом связи *Высокий* (этот тип связи соответствует успешному прохождению тематического раздела). Полученное прогнозное значение (наибольшая оценка связи по результатам работы большинства алгоритмов) – 7-й модуль.

Аналогично может быть спрогнозирован результат освоения всего курса (как результат итогового контроля); может быть решена задача классификации и кластеризации студентов с целью применения к выделенным группам типовых управляющих воздействий.

Для определения возможной архитектуры и структуры НС для задачи построения ИТО была использована часть смоделированного обучающего набора данных. Для обучения НС использовались только данные об обучающихся, которые успешно освоили ЭУК, т.е. получили оценки *ВышеСреднего* или *Высокий* за итоговый контроль. Выбор этих студентов обусловлен тем, что решается задача построения ИТО изучения курса с целью успешного его освоения и получения положительного результата.

Для построения нейросетевой модели выбрана полносвязная НС прямого распространения. Общее число слоёв – два (один скрытый слой). Выбор подобной архитектуры и структуры НС обусловлен тем, что подобные НС успешно применяются для решения задач аппроксимации различных зависимостей [17, 31, 32], существуют эвристические процедуры, позволяющие оценить число нейронов в скрытых слоях на основе данных о числе входных, выходных значений и объёме обучающих данных.

Число входных сигналов НС – 8, что соответствует вершинам графа ЭУК с номерами от 1 до 8. Значения входных сигналов соответствуют результатам прохождения каждого модуля, выраженным в баллах от 0 до 100; входные значения перед обучением были нормализованы. Так как нейросетевая модель определяет номер очередного учебного модуля по результатам изучения предыдущих, данным о прохождении курса одним обучающимся соответствуют несколько обучающих примеров выборки. Это иллюстрируется примером, приведённым в таблицах 2 и 3. В таблице 2 приведены результаты прохождения курса некоторым студентом (изученные студентом модули и результаты освоения этих модулей, выраженные в баллах от 0 до 100). В таблице 3 приведены примеры из обучающей выборки, которые получены на основе данных прохождения курса этим студентом (таблица 2). Аналогичным образом были получены примеры для обучающей выборки для каждого обучающегося из смоделированного набора данных.

Таблица 2 – Результаты прохождения учебного курса одним обучающимся (пример)

Входной контроль	Уровень1 (баллы)	Уровень2 (номер вершины)	Уровень2 (баллы)	Уровень3 (номер вершины)	Уровень3 (баллы)	Уровень4 (номер вершины)	Уровень4 (баллы)
58	85	5	81	7	91	10	81

Таблица 3 – Примеры из обучающей выборки по результатам прохождения учебного курса одним обучающимся

Входной контроль	Входные значения								Выходные значения							
	M1 (вершина 2)	M21 (вершина 3)	M22 (вершина 4)	M23 (вершина 5)	M31 (вершина 6)	M32 (вершина 7)	M33 (вершина 8)	M21 (вершина 3)	M22 (вершина 4)	M23 (вершина 5)	M31 (вершина 6)	M32 (вершина 7)	M33 (вершина 8)	M41 (вершина 9)	M42 (вершина 10)	
58	85	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
	85	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	85	0	0	81	0	91	0	0	0	0	0	0	0	0	1	

Выходной слой НС содержит 8 нейронов, что соответствует вершинам графа ЭУК с номерами от 3 до 10. Значение выходного сигнала одного из нейронов, равное 1 (и равенству нулю выходных значений остальных нейронов в обучающей выборке) означает, что следующий модуль для изучения – это модуль, который соответствует этому нейрону (нейрону с

максимальным выходным значением). Число нейронов в скрытом слое варьировалось от 2 до 30. Функция активации нейронов скрытого слоя – гиперболический тангенс, нейронов выходного слоя – сигмоида. В качестве функции потерь (ошибок) использовалась средняя квадратичная ошибка, оптимизатор – *Adam*⁵.

На рисунке 4 приведён график изменения функции потерь (на обучающей выборке) при обучении нейронной сети с 30 нейронами в скрытом слое. Полученные в процессе обучения результаты (значения функции потерь) свидетельствуют о приемлемом качестве построенной нейросетевой модели и потенциальной возможности её применения к рассматриваемой задаче. Для создания и обучения НС, визуализации данных использовались язык программирования *Python*, библиотека машинного и глубокого обучения *PyTorch*⁶, библиотека для обработки и анализа данных *Pandas*⁷, библиотека для визуализации данных *Matplotlib*⁸.

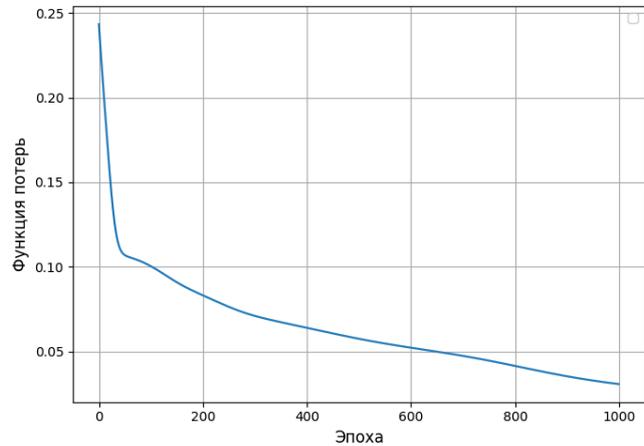


Рисунок 4 – График изменения функции потерь (пример)

С помощью обученной НС может быть получен прогноз наиболее подходящего модуля для изучения следующего (третьего) раздела ЭУК для обучающегося *СтудентNew1*, которому соответствует следующий вектор входных (нормализованных) значений – $(0.88, 0.60, 0, 0.45, 0, 0, 0, 0)^T$. При подаче на вход обученной нейронной сети этих значений максимальное значение получил нейрон выходного слоя, соответствующий вершине графа ЭУК с номером 6. Таким образом, полученное прогнозное значение – 6 модуль, что соответствует логике выбора модуля для изучения следующего раздела курса, реализованной при моделировании обучающей выборки.

Полученное прогнозное значение отличается от значения, полученного ранее (7-й модуль), что объясняется тем, что НС была обучена только на данных о студентах, получивших оценки *ВышеСреднего* или *Высокий* за итоговый контроль.

Последовательность изучения учебных модулей может быть интерпретирована как временной ряд, это делает целесообразным использование для решения рассматриваемой задачи рекуррентных НС. Использование рекуррентных НС может стать направлением дальнейших исследований в случае накопления достаточного объёма обучающих реальных данных о траекториях обучения студентов в ЭУК.

Заключение

В работе приведены возможные подходы к решению задачи формирования ИТО. Рассмотрена возможность построения векторных представлений полученного ГЗ, а также возможность использования НС для анализа цифрового следа обучаемых при изучении курса для задачи персонализации обучения. Полученный прогноз наиболее подходящего учебного

⁵ *Adam* (Adaptive Moment Estimation). <https://docs.pytorch.org/docs/stable/generated/torch.optim.Adam.html#adam>.

⁶ PyTorch 2.6 documentation. <https://pytorch.org/docs/stable/torch.html>.

⁷ Pandas 2.2.3 documentation. <https://pandas.pydata.org/docs/>.

⁸ Matplotlib 3.10.0 documentation. <https://matplotlib.org/stable/index.html>.

модуля для изучения следующих разделов ЭУК при формировании ИТО соответствуют логике выбора модуля, реализованной при моделировании обучающей выборки.

Список источников

- [1] **Crompton H., Burke D.** Artificial intelligence in higher education: the state of the field. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2023. 20:22. DOI: 10.1186/s41239-023-00392-8.
- [2] **Лукичёв П. М., Чекмарев П. М.** Применение искусственного интеллекта в системе высшего образования. *Вопросы инновационной экономики*. 2023. Т.13, №1. С.485-502. DOI: 10.18334/vinec.13.1.117223.
- [3] **Лукичёв П. М., Чекмарев П. М.** Риски применения искусственного интеллекта в системе высшего образования. *Вопросы инновационной экономики*. 2024. Т.14, №2. С.463-482. DOI: 10.18334/vinec.14.2.120731.
- [4] **Муромцев Д.И.** Модели и методы индивидуализации электронного обучения в контексте онтологического подхода. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №1(35). С.34-49. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-34-49.
- [5] **Solovov A.V., Menshikova A.A.** Designing an ontology of the e-learning course content. *Ontology of designing*. 2023; 13(1): 99-112. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-1-99-112.
- [6] **Пиявский С.А.** Онтология направляемого развития научных способностей молодёжи. Часть 2: общая схема. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №4. С.597-614. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-597-614.
- [7] **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.
- [8] **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.
- [9] **Романов А.А.** Анализ данных о поведении пользователей в системах электронного обучения. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №1(35). С.100-111. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-100-111.
- [10] **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.
- [11] **Магомедова К.Т.** Этапы развития электронного обучения и их влияние на появление новых технологических стандартов качества электронного обучения. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки»*. 2015. Т.7, №2. С.22–29.
- [12] **Константинова Л.В., Гагиев Н.Н., Смирнова Е.А., Петров А.М., Никонова О.Д.** Основные тренды цифровизации высшего образования. Результаты мониторинга информации о тенденциях развития высшего образования в мире и в России. Выпуск 1. М.: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», 2021. 46 с.
- [13] ГОСТ Р 59899-2021 Образовательные продукты с алгоритмами искусственного интеллекта для адаптивного обучения в общем образовании. Технические требования. М.: Российский институт стандартизации. 2021. 8 с.
- [14] ГОСТ Р 52653-2006 Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2007. 17 с.
- [15] **Шаугараева Д.И., Бурицев Д.С., Гаврилюк Е.С.** Проблемы управления образовательным процессом при использовании цифровых инструментов в высших учебных заведениях. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент*. 2020. №2. С. 121-130. DOI: 10.17586/2310-1172-2020-13-2-121-130.
- [16] **Сибикина И.В., Кучин И.Ю., Шихбабаева К.А.** Разработка электронного обучающего курса для специалистов в сфере информационной безопасности. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2022. №3. С.80-93. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-3-80-93.
- [17] **Шамсутдинова Т.М.** Проблемы и перспективы применения нейронных сетей в сфере образования. *Открытое образование*. 2022. Том 26, № 6. С.4-10. DOI: 10.21686/1818-4243-2022-6-4-10.
- [18] **Сахарова Л.В., Арапова Е.А., Артамонова А.Г.** Математические модели и алгоритмы интеллектуальной платформы нового типа для реализации индивидуальной траектории обучения с учетом психотипа обучающегося. *Информатизация в цифровой экономике*. 2023. Т.4. №2. С.77-104. DOI: 10.18334/ide.4.2.116812.
- [19] **Алексейчук А.С., Пантелеев А.В.** Индивидуализация процесса обучения в режиме веб-конференции на основе иерархической нечеткой экспертной системы. *Информатика и её применения*. 2017. Т.11, №1. С.90–99. DOI: 10.14357/19922264170108.

- [20] **Босов А.В.** Применение самоорганизующихся нейронных сетей к процессу формирования индивидуальной траектории обучения. *Информатика и её применения*. 2022. Т.16, №3. С.7–15. DOI: 10.14357/19922264220302.
- [21] **Босов А.В., Мартюшова Я.Г., Наумов А.В., Сапунова А.П.** Байесовский подход к построению индивидуальной траектории пользователя в системе дистанционного обучения. *Информатика и её применения*. 2020. Т.14. №3. С.86–93. DOI: 10.14357/19922264200313.
- [22] **Бабикова Н.Н.** Проектирование результатов обучения с использованием модифицированной таксономии Блума. *Психология и педагогика: методика и проблемы практического применения*. 2015. №46. С.77–84.
- [23] **Боргест Н.М.** Будущее университета: онтологический подход. Часть 2: сущности, мотивация, проектное обучение. *Онтология проектирования*. 2012. №1(3). С.87–105.
- [24] **Числова А.С.** Педагогический сценарий - как усиление обучающего и воспитывающего эффекта мультимедийных программ. *Образовательные технологии и общество*. 2008. Т.11. №2. С.439–451.
- [25] **Башарина О.В., Аленичева Е.И.** Технология разработки учебных заданий в LMS Moodle. *Инновационное развитие профессионального образования*. 2017. Т.15. №3. С.25–32.
- [26] **Кудрявцев Д.В., Беглер А.М., Гаврилова Т.А., Лещева И.А., Кубельский М.В., Тушканова О.Н.** Метод коллективной визуальной разработки онтологического графа знаний. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2019. №1. С.27–38. DOI: 10.14357/20718594190103.
- [27] **Perozzi B., Al-Rfou R., Skiena S.** DeepWalk: Online learning of social representations. *KDD '14: Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. August 2014. P.701–710. DOI: 10.1145/2623330.2623732.
- [28] **Grover Aditya, Leskovec Jure.** node2vec: Scalable Feature Learning for Networks. *KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. August 2016. P.855–864. DOI: 10.1145/2939672.2939754.
- [29] **Ali M., Berrendorf M., Hoyt C.T., Vermue L., Galkin M., Sharifzadeh S., Fischer A., Tresp V., Lehmann J.** Bringing Light Into the Dark: A Large-scale Evaluation of Knowledge Graph Embedding Models Under a Unified Framework. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2006.13365.
- [30] **Асанов А.З., Мышкина И.Ю., Грудцына Л.Ю.** Применение графовых моделей в проектном управлении. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №2(48). С.44–54. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-44-54.
- [31] **Цуканова Н.И.** Программирование глубоких нейронных сетей на языке Python. М.: КУРС, 2024. 224 с.
- [32] **Аггарвал Чару.** Нейронные сети и глубокое обучение. Санкт-Петербург: ООО «Диалектика», 2020. 752 с.

Сведения об авторах



Асанов Асхат Замилович, 1949 г. рождения. Окончил Казанский государственный университет в 1972 г., д.т.н. (2004), профессор. Профессор кафедры автоматических систем Института искусственного интеллекта МИРЭА–Российского технологического университета. В списке научных трудов более 250 работ в области системного анализа, управления и обработки информации. ORCID: 0000-0001-6724-0816; Author ID (РИНЦ): 263248; Author ID (Scopus): 7003438319. asanov@mirea.ru ✉.

федеры информационных систем Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета. В списке научных трудов более 30 работ в области управления в социальных и экономических системах. ORCID: 0000-0003-4309-3350; Author ID (РИНЦ): 603791; Author ID (Scopus): 57189268396; Researcher ID (WoS): M-4899-2015. mirinau@mail.ru.



Мурашко Антон Сергеевич, 1998 г. рождения. Окончил Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета в 2023 г. Аспирант кафедры информационных систем Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета. ORCID: 0009-0003-8089-3768. anton.myrashko@gmail.com.



Поступила в редакцию 19.03.2025, после рецензирования 21.01.2026. Принята к публикации 12.02.2026.



Application of artificial intelligence methods in the formation of an individual learning path

© 2026, A.Z. Asanov¹✉, I.Yu. Myshkina², A.S. Murashko²

¹ Institute of Artificial Intelligence of MIREA-Russian Technological University, Moscow, Russia

² Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract

The article considers the potential application of artificial intelligence methods within a distance learning management system. A structural framework of an intelligent distance learning management system is presented. The paper identifies key directions for the use of ontological modeling within this system. Approaches to solving the problem of forming individualized learning pathways are analyzed, based on a knowledge graph of an electronic course. Additionally, the study explores the development of vector representations of the knowledge graph and the use of neural networks to analyze learners' digital footprints. The research objectives include: constructing a knowledge graph for an electronic course; applying vector representations to the vertices and relations of the knowledge graph; and selecting the architecture and structure of a neural network and training it to generate individualized learning pathways. The proposed approach employs a knowledge graph of the electronic course that incorporates both course parameters and data on learners who have completed the course. Representing graph elements as vectors enables the application of machine learning techniques, including neural network models, to the analysis of the subject domain. A methodological example illustrating the implementation of the proposed approach is provided.

Keywords: knowledge graph, ontology, e-course, personalization, learning pathway, neural networks.

For citation: Asanov AZ, Myshkina IY, Murashko AS. Application of artificial intelligence methods in the formation of individualized learning pathways [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 164-176. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-164-176.

Authors' contributions: Asanov AZ – formulation of the research problem; Myshkina IY – development and implementation of models and algorithms; Murashko AS – review of existing approaches.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Core components of the intelligent distance learning management system

Figure 2 – Structural diagram of the intelligent distance learning management system

Figure 3 – Fragment of a simplified directed graph of the electronic course

Figure 4 – Loss function dynamics during training (Example)

Table 1 – Digital tools and platforms for E-learning

Table 2 – Results of an individual learner's completion of the electronic course (Example)

Table 3 – Examples from the training sample based on an individual learner's course completion results

References

- [1] **Crompton H, Burke D.** Artificial intelligence in higher education: the state of the field. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2023; 20:22. DOI: 10.1186/s41239-023-00392-8.
- [2] **Lukichyov PM, Chekmarev OP.** Artificial intelligence in higher education [In Russian]. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2023; 13(1): 485-502. DOI 10.18334/vinec.13.1.117223.
- [3] **Lukichyov PM, Chekmarev OP.** Risks of artificial intelligence in higher education [In Russian]. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2024; 14(2): 463-482. DOI: 10.18334/vinec.14.2.120731.
- [4] **Mouromtsev D.** Models and methods of e-learning individualization in the context of ontological approach [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(1): 34-49. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-34-49.

- [5] **Solovov AV, Menshikova AA.** Designing an ontology of the e-learning course content. *Ontology of designing*. 2023; 13(1): 99-112. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-99-112.
- [6] **Piyavsky SA.** Ontology of guided development of scientific abilities of young people. Part 2: General scheme [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 597-614. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-597-614.
- [7] **Solovov AV, Menshikova AA.** Transformation of the ontology of education: from the classroom lesson system to smart innovations [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12(4): 470-480. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-4-470-480.
- [8] **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.
- [9] **Romanov A, Volchek D.** Data Analysis of User Behavior in E-Learning Systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(1): 100-111. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-100-111.
- [10] **Asanov AZ, Myshkina IYu, Grudtsyna LYu.** 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.
- [11] **Magomedova KT.** Stages of E-learning Development and Their Impact on the Emergence of New Technological Standards of E-learning Quality [In Russian]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Education. Educational Sciences*. 2015; 7(2): 22–29.
- [12] **Konstantinova LV, Gagiev NN, Smirnova EA, Petrov AM, Nikonova OD.** Main trends in digitalization of higher education . Results of monitoring information on trends in the development of higher education in the world and in Russia [In Russian]. Issue 1. Moscow : Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov", 2021. 46 p.
- [13] GOST R 59899-2021 Educational products with algorithms of artificial intelligence for adaptive learning in general education. Technical requirements [In Russian]. Moscow : Russian Standardization Institute. 2021. p. 8.
- [14] GOST R 52653-2006 Information and communication technologies in education. Terms and definitions. Moscow : Standartinform. 2007. 17 p.
- [15] **Shaugaraeva DI, Burtsev DS, Gavriilyuk ES.** Problems of educational process management when using digital tools in higher education [In Russian]. *Scientific journal NRU ITMO. Series «Economics and Environmental Management»*. 2020; 2: 121-130. DOI: 10.17586/2310-1172-2020-13-2-121-130.
- [16] **Sibikina IV, Kuchin IYU, Shikhbabaeva KA.** Developing e-learning course for information security specialists [In Russian]. *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics*. 2022; 3: 80-93. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-3-80-93.
- [17] **Shamsutdinova TM.** Problems and prospects for the application of neural networks for the sphere of education [In Russian]. *Open education*. 2022; 26(6): 4-10. DOI: 10.21686/1818-4243-2022-6-4-10.
- [18] **Sakharova LV, Arapova EA, Artamonova AG.** Mathematical models and algorithms for a new type of intelligent platform for the implementation of an individual learning trajectory, taking into account the learner’s psychotype [In Russian]. *Information system development in the digital economy*. 2023; 4(2): 77-104. DOI: 10.18334/ide.4.2.116812.
- [19] **Alekseychuk AS, Panteleev AV.** Modeling individualization of the learning process in the form of web-conference using a hierarchical fuzzy expert system [In Russian]. *Computer science and its application*. 2017; 11(1): 90–99. DOI: 10.14357/19922264170108.
- [20] **Bosov AV.** Application of self-organizing neural networks to the process of forming an individual learning path [In Russian]. *Computer science and its application*. 2022; 16(3): 7–15. DOI: 10.14357/19922264220302.
- [21] **Bosov AV, Martyushova YaG, Naumov AV, Sapunova AP.** Bayesian approach to the construction of an individual user trajectory in the system of distance learning [In Russian]. *Computer science and its application*. 2020; 14(3): 86-93. DOI: 10.14357/19922264200313.
- [22] **Babikova NN.** Design of learning outcomes using modified Bloom's taxonomy [In Russian]. *Psychology and pedagogics: methods and problems of practical application*. 2015; 46: 77-84.
- [23] **Borgest NM.** The Future of the University: An Ontological Approach. Part 2: Entities, Motivation, Project-Based Education [In Russian]. *Ontology of designing*. 2012; 1(3): 87-105.
- [24] **Chislova AS.** Pedagogical scenario as an enhancement of the educational and upbringing effect of multimedia programs [In Russian]. *Educational technologies and society*. 2008; 11(2): 439-451.
- [25] **Basharina OV, Alenicheva EI.** Technology of development of educational tasks in LMS Moodle [In Russian]. *Innovative development of professional education*. 2017; 15(3): 25-32.
- [26] **Kudryavtsev DV, Begler AM, Gavrilova TA, Leshcheva IA, Kubelsky MV, Tushkanova ON.** Method of collaborative visual creation of a knowledge graph [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2019; 1: 27-38. DOI: 10.14357/20718594190103.

- [27] **Perozzi B, Al-Rfou R, Skiena S.** DeepWalk: Online learning of social representations. *KDD '14: Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. August 2014. Pages 701–710. DOI: 10.1145/2623330.2623732.
- [28] **Grover Aditya, Leskovec Jure.** node2vec: Scalable Feature Learning for Networks. *KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. August 2016. P.855–864. DOI: 10.1145/2939672.2939754.
- [29] **Ali M, Berrendorf M, Hoyt CT, Vermue L, Galkin M, Sharifzadeh S, Fischer A, Tresp V, Lehmann J.** Bringing Light Into the Dark: A Large-scale Evaluation of Knowledge Graph Embedding Models Under a Unified Framework. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2006.13365.
- [30] **Asanov AZ, Myshkina IYu, Grudtsyna LYu.** Application of graph models in project management [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 44-54. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-44-54.
- [31] **Tsukanova NI.** Programming deep neural networks with Python [In Russian]. Moscow: KURS; 2024. 224 p.
- [32] **Charu Aggarwal.** Neural Networks and Deep Learning [In Russian]. Saint Petersburg: Dialectika LLC; 2020. 752 p.
-

About the authors

Askhat Zamilovich Asanov (b. 1949) graduated from Kazan State University in 1972, Doctor of Technical Sciences (2004). Professor of the Department of Automatic Systems at the Institute of Artificial Intelligence of MIREA - Russian Technological University. He is the author and a co-author of more than 250 publications in the fields of system analysis, control, and information processing. ORCID: 0000-0001-6724-0816; Author ID (РИНЦ): 263248; Author ID (Scopus): 7003438319. asanov@mirea.ru. ✉.

Irina Yurievna Myshkina (b. 1980) graduated from Elabuga State Pedagogical Institute in 2002, Candidate of Technical Sciences (2018). Associate Professor of the Department of Information Systems at the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University. In the list of scientific papers there are more than 30 works in the field of management in social and economic systems. ORCID: 0000-0003-4309-3350; Author ID (РИНЦ): 603791; Author ID (Scopus): 57189268396; Researcher ID (WoS): M-4899-2015. mirinau@mail.ru.

Anton Sergeevich Murashko (b. 1998) graduated from the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University in 2023. Postgraduate student at the Department of Information Systems of the Naberezhnye Chelny Institute (Branch) of Kazan (Volga Region) Federal University. ORCID: 0009-0003-8089-3768. anton.myrashko@gmail.com.

Received March 19, 2025. Revised January 21, 2026. Accepted February 12, 2026.
