

Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)

ISSN 2313-1039 (E)

# ОНТОЛОГИЯ

Vol 16

2026

№2

Научный журнал -  
Scientific journal

# ПРОЕКТИРОВАНИЯ



**60** выпуск  
журнала

приоритет2030<sup>+</sup>

лидерами становятся

Передовые  
инженерные  
школы



Национальный  
Фонд  
Искусственного  
Интеллекта

Scientific journal

Volume 16

№ 2

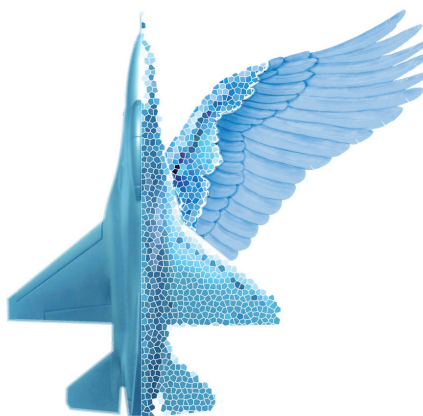
# ОНТОЛОГИЯ

## ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 16

№ 2



---

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** Венедикт Степанович, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия  
**Ландэ** Дмитрий Владимирович\*, д.т.н., с.н.с., ИПРИ НАН Украины, Киев, Украина  
**Лейтао** Пауло, профессор, Политехнический институт Браганса, Браганса, Португалия  
**Марик** Владимир, профессор, научный директор ЧИИРК Чешского технического университета, Прага, Республика Чехия  
**Масель** Людмила Васильевна\*, д.т.н., профессор, ИСЭМ СО РАН, Иркутск, Россия  
**Нестеров** Александр Юрьевич, д.филос.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия  
**Новиков** Дмитрий Александрович, д.т.н., профессор, академик РАН, ИПУ РАН, Москва, Россия  
**Палагин** Александр Васильевич, д.т.н., профессор, академик НАН Украины, Ин-т кибернетики, Киев, Украина  
**Резник** Юрий Михайлович, д.филос.н., профессор, Институт философии РАН, Москва, Россия  
**Ржевский** Георгий, профессор, Открытый университет, Лондон, Великобритания  
**Скобелев** Петр Олегович\*, д.т.н., 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](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 **1,396** (2025).

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

Искусство и наука баланса, или «Золотая середина» Аристотеля 181-188

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**А.Н. Аверкин, В.Н. Добрынин, А.А. Миловидова** 189-203

Интеграция контуров управления в многоуровневой архитектуре цифровых систем

**В.В. Воронин** 204-212

Формализация понятий «диагностическая ситуация» и «диагностическая деятельность»

**В.Н. Волкова, А.В. Логинова, Е.В. Романова, Ю.Ю. Черный** 213-225

К онтологии преобразований информации

### ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**В.В. Грибова, Д.В. Жданов, Е.Е. Помников** 226-239

Онтологическое моделирование нормативных знаний в строительной отрасли

**Т.М. Муртазин** 240-254

Онтологические модели систем управления технологическими процессами нефтеперерабатывающих производств

**А.А. Романов, А.А. Филиппов** 255-268

Автоматизация управления беспилотными транспортными средствами в точном земледелии

**Т.М. Шамсутдинова** 269-282

Онтологическое моделирование компонентов цифровой компетентности преподавателя высшей школы

### ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

**В.В. Курейчик, В.И. Данильченко, А.М. Мансур, В.В. Бова** 283-299

Онтологический подход к формализации знаний при проектировании сверхбольших интегральных схем

**Т.М. Мурзагалеев, Н.А. Жукова** 300-313

Онтология методов машинного обучения при управлении проектами

### МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

**А.И. Сергеев, С.А. Гуньков** 314-326

Проектирование конфигурации оборудования производственного участка на основе генетического алгоритма

**А.А. Борисова** 327-340

Построение правовой онтологии для поддержки принятия решений

**Н.А. Евстифеева, И.А. Ширеторова** 341-354

Построение графа знаний предметной области на основе открытых электронных словарей

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.nm@ssau.ru](mailto:borgest.nm@ssau.ru).

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

Отпечатано в ООО «Новая техника» (типография), 443013, Самарская обл., г. Самара, пр. К. Маркса, 24-76. Дата выхода 05.06.2026. Тираж 100 экз. Свободная цена. (6+).

# CONTENTS

## EDITORIAL

- The Art and Science of Balance or Aristotle's «Golden Mean» 181-188

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

- A.N. Averkin, V.N. Dobrynin, A.A. Milovidova** 189-203  
Integration of control loops in the multilevel architecture of digital systems
- V.V. Voronin** 204-212  
Formalization of the concepts of diagnostic situation and diagnostic activity
- V.N. Volkova, A.V. Loginova, E.V. Romanova, Yu.Yu. Chernyy** 213-225  
Towards the ontology of information transformations

## APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

- V.V. Gribova, D.V. Zhdanov, E.E. Pomnikov** 226-239  
Ontological modeling of regulatory knowledge in the construction industry
- T.M. Murtazin** 240-254  
Ontological models of control systems for technological processes in oil refining production
- A.A. Romanov, A.A. Filippov** 255-268  
Automation of unmanned vehicle control in precision agriculture
- T.M. Shamsutdinova** 269-282  
Ontological modeling of components of digital competence in higher education teaching staff

## ONTOLOGY ENGINEERING

- V.V. Kureychik, V.I. Danilchenko, A.M. Mansour, V.V. Bova** 283-299  
An ontological approach to knowledge formalization in the design of very-large-scale integrated circuits
- T.M. Murzagaleev, N.A. Zhukova** 300-313  
Ontology of machine learning methods in project management

## METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

- A.I. Sergeev, S.A. Gunkov** 314-326  
Design of production area equipment configuration based on a genetic algorithm
- A.A. Borisova** 327-340  
Construction of a legal ontology for decision support
- N.A. Evstifeeva, I.A. Shiretorova** 341-354  
Construction of a domain knowledge graph based on open electronic dictionaries

---

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.nm@ssau.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, borgest@yandex.ru.



## ОТ РЕДАКЦИИ

## Искусство и наука баланса, или «Золотая середина» Аристотеля The Art and Science of Balance or Aristotle's "Golden Mean"

«... ты никогда не обращал внимания на Дедаловы<sup>1</sup> статуи<sup>2</sup>... они, когда не связаны, убегают прочь, а когда связаны, стоят на месте... Будучи связанными, мнения становятся, во-первых, знаниями и, во-вторых, устойчивыми. Поэтому-то знание ценнее правильного мнения и отличается от правильного мнения тем, что оно связано».

*Сократ* (Платон «Менон» 97a-98b, ~385г. до н.э.)

«... по всем учениям церковным придёт конец мира, и по всем учениям научным неизбежно то же самое. Так что же странного, что по учению нравственному выходит то же самое?».

*Л. Толстой*. Крейцера соната (1889)

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

Время, в котором нам довелось жить, особенно ярко демонстрирует важность поиска и нахождения рационального баланса между возрастающими потребностями, желаниями, устремлениями и не всегда и не всеми осознаваемыми ограничениями; между ответственностью за принятие решений и действиями, за ними последующими. Жизнь каждого индивида полна побед и поражений, вынужденных консенсусов и компромиссов, и лишь немногие способны на отречение от своих житейских нужд во благо по-своему понимаемых общественных интересов.

Цивилизация вступила в завершающий этап своей эволюции<sup>3</sup>, где моральные наставления древних философов и вторивших им религиозных учений и постулатов имеют для человечества в целом иной, уже планетарный характер, т.к. эти жизненные установки вышли далеко за границы этики и её норм.

«Золотая середина» – ключевая концепция в этике Аристотеля, которая заключается в поиске баланса между двумя крайностями: недостатком и избытком какого-либо качества. Это не арифметическое среднее, а «оптимум», который зависит от конкретной ситуации, человека и его возможностей.

С помощью этой золотой середины Аристотеля<sup>4</sup> можно попытаться переосмыслить миф об Икаре, где главный герой этой истории – создатель крыльев и отец Икара Дедал. В рассказе Овидия<sup>5</sup> Дедалу приписывается следующая фраза: «Позволь мне предупредить



«Дедал и Икар»  
Х.А. Гербер (1896)

<sup>1</sup>Дедал — персонаж древнегреческой мифологии, художник, архитектор, изобретатель, символ мудрости, знаний и власти. Среди его самых известных творений – крылья, с помощью которых он и его сын Икар пытались убежать с Крита. Икар не послушался отца и подлетел слишком близко к Солнцу. Воск, скреплявший его крылья, растаял, и Икар разбился. <https://en.wikipedia.org/wiki/Daedalus>.

<sup>2</sup>По преданию, статуи, сделанные Дедалом, двигались как живые. Платон «Менон» 97a-98b. <https://plato.today/TEXTS/PLATO/LosevH/0119.htm?ysclid=mpf6fa39rb433723502#r45>.

<sup>3</sup>От редакции. Эволюция всего от Гераклита до Микони. *Онтология проектирования*, 2026, №1. С.5-13. [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2026\\_1\(59\)/Ontology\\_Of\\_Designing\\_2026\\_1-5-13\\_from\\_editorial.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2026_1(59)/Ontology_Of_Designing_2026_1-5-13_from_editorial.pdf)

<sup>4</sup>Erik Brown. Flying close to the sun can be a virtue in a balanced world. Rethinking the Icarus myth with Aristotle's flexible Golden Mean. *History Philosophy Action*. Jan 14, 2026. <https://historyphilosophyaction.substack.com/p/flying-close-to-the-sun-can-be-a>.

<sup>5</sup>Metamorphoses Book VIII (A.S. Kline's Version). <https://ovid.lib.virginia.edu/trans/Metamorph8.htm>.

тебя, Икар, чтобы ты выбрал *средний путь*, на случай, если влага отяжелит твои крылья, если ты будешь лететь слишком низко, или, если ты поднимешься слишком высоко, солнце обожжёт их. Путешествуй между *крайностями*».

В этой мифической истории о разрушении и умеренности крылья помогают Дедалу, и он спасается, теряя сына. Создание и использование крыльев – крайнее событие, но этот опасный полёт – единственный способ Дедала совершить побег из тюрьмы на острове Крит.

Почти каждый, кто совершил что-то великое, по необходимости впадал в крайности. Иначе они никогда бы не оторвались от земли. Вот почему важно переосмыслить миф об Икаре и Дедале, а также идеал или оптимум равновесия. Ведь *полёт ближе к солнцу может стать достоинством в сбалансированном мире*<sup>4</sup>.

### Аристотель о середине

Сократ утверждал<sup>2</sup>, что, хотя истина, подобно «живой» статуе Дедала, по своей сути ценна, её одушевлённость (способность к движению и жизни) делает её бесполезной, если владелец не может контролировать её и приковывать к месту, чтобы она не «разбрелась». Платон<sup>6</sup> использует образ движущихся статуй Дедала как метафору для понимания истины: её ценность как знания или понимания сохраняется, но на практике необходимо иметь возможность «приковать» её к определённому месту или контексту.

Может показаться, что выбирать между крайностями просто, т.к. есть некие границы, которые определяют нахождение нужного решения. В многочисленных определениях Аристотель предлагает способы оценки и нахождения этой золотой середины для различных случаев. Вот несколько его утверждений<sup>7</sup> в области этики, математики и экономики, включая и политическую экономику.

«Я здесь говорю об этической добродетели, ибо она имеет дело с аффектами и с деятельностью, а в них-то и возможен избыток или недостаток, или **середина**, как, например, страх и отважность, страсть и гнев, сожаление и вообще всякое наслаждение или страдание допускают избыток или недостаток, которые оба не хороши.

... в действиях есть избыток, недостаток и **середина**. Добродетель же касается аффектов и действий, в которых излишек – ошибка, недостаток порицается, **середина** же похвывается и достигает цели; то и другое суть признаки добродетели. Итак, добродетель есть известного рода **середина**, поскольку она стремится к среднему.

... нельзя полагать, что и в несправедливом образе действий, или в трусости, или в невоздержанности есть **середина**, избыток и недостаток: выходило бы в таком случае, что есть середина в самом избытке или в самом недостатке и что есть избыток избытка и недостаток недостатка...

Умеренность и мужество в одинаковой мере гибнут от избытка и недостатка, в то время как **середина** спасает их... Мужество – **середина** трусости и отважности... Щедрость – **середина** относительно траты денег и приобретения; избыток называется расточительностью, а недостаток – скупостью... **Середина** во всём заслуживает похвалы, крайности же не похвальны, а заслуживают порицания...

Серединую же по отношению к нам я называю то, что не даёт ни излишка, ни недостатка, и эта **середина** не одна и та же для всех. Если, например, десять слишком много, а два слишком мало, то шесть мы признаём серединой по отношению самого предмета, ибо шесть на столько же единиц больше двух, на сколько меньше десяти. Это-то и есть **середина** арифметической прогрессии...

Разделяющая справедливость состоит в сочетании отношений ***a* к *c*** и ***b* к *a***, и в то же время справедливое – **середина** того, что находится вне пропорции, ибо пропорциональность состоит в середине, а справедливое – в пропорциональности. Математики называют такую пропорцию геометрической, ибо именно в ней целое относится к целому, как один член относится к другому...

Итак, **середина** между избытком и недостатком – равное; выгода же и ущерб суть... избыток и недостаток, и притом в противоположном отношении: выгодой называется избыток блага и недостаток зла, ущербом – противоположное; **середина** же между ними есть равное, которое мы называем справедливым.

...справедливость есть **середина** выгоды и ущерба, ограничивающая произвол; она стремится к тому, чтобы каждый как ранее, так и позднее имел равное... **Отсюда мы можем узнать, что мы должны взять у человека, имеющего слишком много, и какую часть должны прибавить тому, кто имеет слишком мало; ту**

<sup>6</sup>Платон. Собрание сочинений в четырёх томах. М.: Мысль, 1990-1994. <https://plato.today/TEXTS/Losev.htm>.

<sup>7</sup>Аристотель. Никомахова этика. Перевод Э.Л. Радлова. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 222 с.

часть, которая превышает середину, мы должны прибавить имеющему слишком мало, и избыток середины должны отнять у имеющего слишком много<sup>8</sup>».

**Точной** середины не существует, судить о ней можно только по собственному восприятию. Недостатки и достоинства у всех разные, и со временем они могут меняться.

Аристотель делил добродетели на два вида: дианоэтические – добродетели разума (благоразумие, мудрость) и этические – добродетели воли (мужество, дружба, щедрость). Добродетель – это середина между двумя крайностями, которая определяется разумом, где человек должен уметь оценить контекст и принимать взвешенное решение, избегая крайностей. Добродетель – устойчивое состояние характера, формируемое через повторение правильно оцениваемых действий, со временем выбор меры становится естественным.

*Читайте статьи наших авторов о мере<sup>9</sup>, и Ваш выбор будет естественно верным!*

### Атараксия или конец: на пути к середине

Основатель античного скептицизма древнегреческий философ Пиррон заимствовал идеи медитации в буддизме и переформулировал их для греческой аудитории<sup>10</sup>. Именно он ввёл термин *атараксия* – душевное спокойствие, невозмутимость, безмятежность, которое достигается мудрецом. Атараксия – это та самая найденная долгожителем Пирроном «золотая» середина бытия, о которой размышлял и писал Аристотель.

Этот термин Пиррон использовал для описания душевного состояния солдат, вступающих в бой. Сражение – это действие, в котором идеальное состояние духа солдата – это состояние потока. Солдаты Александра Македонского, которые могли входить в состояние потока, всегда одерживали верх на поле боя, даже против более крупных сил. Такие солдаты не спокойны, они *невозмутимы*, так как ключевым элементом потока является расслабление самосознания и минимальный внутренний конфликт. Сосредоточение внимания на том, что происходит в данный момент, обеспечивает оптимальную производительность. Для македонского солдата победа в сражениях – это благо. Размышления о том, хорошо ли участвовать в сражениях, мешает тому, что нужно делать прямо сейчас; а нужно – побеждать.

Древние греки считали, что люди должны стремиться к совершенству во всём, что они делают. Отказ от суждений приводит к атараксии. Атараксия приводит к потоку. Поток позволяет жить правильно по отношению к арете. Введённое понятие *арета* (иногда персонифицировалось с богиней Арета) тесно связано с идеей жизни, основанной на моральных и интеллектуальных достоинствах. И результатом всего этого является эвдемония (высшее человеческое благо – счастье, благополучие).

В статье «Имел ли Платон ввиду то, что он сказал?»<sup>11</sup> постулируется тезис, в котором Сократ и его ученик Платон осознавали непонятное состояние ума, которое было названо потоком, и Платон стремился описать его. Поток – это психическое состояние, при котором человек полностью погружён в какую-либо деятельность, испытывает прилив энергии и удовольствия, часто теряя счёт времени. Авторы статьи приходят к выводу, что «...потеря нор-

<sup>8</sup> Этот выделенный здесь фрагмент **текста** может произвести эффект дежавю на тех, кто изучал труды Карла Маркса и его последователей. Именно Аристотель, Витрувий и впоследствии Маркс заложили основу научного направления онтологии проектирования, в котором объект, субъект и среда проектирования и их взаимосвязи исследуются и моделируются в равной степени детальности (см., *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.).

<sup>9</sup> См. например: *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; *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. И другие статьи в журнале «Онтология проектирования».

<sup>10</sup> *Doug Bates.* Why the ancient greeks had no need for meditation. Arete, Ataraxia, and Flow. ATARAXIA or BUST! Feb 19, 2026. <https://substack.com/home/post/p-188445909>.

<sup>11</sup> *Merkle B., Rodionov V.* Did Plato Mean What He Said? Where the Sane Man Disappears. November 2025. 78 p. <https://leapingspark.github.io/>. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.17776531>.

мального сознания необходима для достижения совершенства, эта потеря происходит по предсказуемой схеме и может быть вызвана намеренно, этому процессу можно систематически обучаться». Примечательны в этой статье не только выводы, но и примечание, в котором авторы честно заявляют об использовании ИИ при подготовке статьи.

*«Примечание об использовании ИИ (A Note on AI Usage).*

Статья написана в тесном сотрудничестве с *Anthropic Claude* (в частности, *Opus 4.1* и *Sonnet 4.5*). Это преднамеренный выбор, прежде всего не из-за скорости или единообразного доступа к обширным знаниям, а по другой преднамеренной причине, которая опущена из-за её спорности... В этой статье нет ни единого слова, которое не было бы хотя бы тщательно проверено человеком; эта статья прошла несколько проверок человеком и явно не подпадает под категорию «сгенерировано ИИ»; но академическая этика, наряду с характером этой статьи, посвящённой происхождению добродетели, требует раскрытия информации...».

Ранее в редакционной статье<sup>12</sup> нашего журнала в полушутливой форме прозвучало предложение о том, что «... в состав авторов надлежит включать и подобных «субъектов» (имелся в виду ИИ), указывая в разделе «Вклад авторов» соответствующую часть творческих работ, которые ими были выполнены».

*Теперь же, уже без всяких шуток, это надлежит делать всем авторам нашего журнала, которые прибегают к услугам ИИ. Им необходимо с этической точки зрения обязательно указать используемый ими инструмент ИИ и тот вклад в подготовку присланного в редакцию материала, который был внесён этим ИИ.*

В редакционной статье майского номера набирающего популярность журнала «Природа машинного интеллекта» (*Nature Machine Intelligence*) рекомендуют отказаться от «максимизации токенов» и использовать ИИ разумно<sup>13</sup>. В статье отмечается, что основная проблема заключается в том, как анализировать результаты, полученные с помощью систем агентного ИИ, как проверять их и решать, чему можно доверять. Задавать вопросы моделям и получать результаты несложно, а вот оценить результат – задача не из простых. Проверка результатов, полученных с помощью ИИ, необходима для надёжного научного прогресса и требует значительного участия со стороны человека.

*Здесь нет золотой середины между ИИ и человеком, использующим ИИ, здесь вся ответственность за результат, за принятое решение лежит на человеке!*

Этому вторит и статья, посвящённая самопроектирующему артефакту<sup>14</sup> в журнале «Этика ИИ». Самопроектирование относится к способности системы ИИ изменять свои внутренние модели, политики или механизмы управления, выполняя эти операции во время проектирования. С архитектурной точки зрения самопроектирование – это способность вызывать функции мета-уровня проектирования. В процессуальном смысле – это относится к итеративным циклам предложений, модификаций и их валидации. Системы ИИ будут развиваться за пределы простых инструментов для проектирования, совершенствования и управления собой *в рамках этических ограничений*. Эти рамки включают четыре основных принципа: ответственную автономию, при которой системы ИИ саморегулируют свои решения в рамках этических границ; самообъяснимость ИИ; поддержку итеративного самосовершенствования; машинное обучение, основанное на знаниях, которое объединяет экспертизу в области контекстно-ориентированного обучения. В отличие от традиционных систем, которые опираются на контроль человека в цикле или постфактические объяснения, такая структура позволяет ИИ отслеживать и развивать свои рассуждения в реальном времени.

<sup>12</sup>От редакции. Хулиганы в науке. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4. С.465-470. [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2025\\_4\(58\)/Ontology\\_Of\\_Designing\\_2025\\_4\\_opt\\_465-470\\_Editorial.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2025_4(58)/Ontology_Of_Designing_2025_4_opt_465-470_Editorial.pdf).

<sup>13</sup>Stop «tokenmaxxing» and deploy AI sensibly instead. *Nat Mach Intell* 8, 641 (2026). <https://doi.org/10.1038/s42256-026-01253-5>.

<sup>14</sup>Verma D., Terzian V., Tuunanen T. et al. Toward an artifact that designs itself: generative design science research approach. *AI Ethics*6, 104 (2026). <https://doi.org/10.1007/s43681-025-00965-5>.

Этическое соответствие в новых системах ИИ стремится имитировать «золотую середину» Аристотеля, обозначая, насколько системное поведение соответствует заявленным этическим ограничениям и контекстно-специфичным нормативным требованиям. Архитектурно выравнивание кодируется в виде наборов ограничений, отбойников и мониторов. Как процесс, согласованность поддерживается посредством постоянных аудитов и проверок соответствия. В качестве доказательства согласованность демонстрируется через стресс-тесты, анализ контрфактических рисков и аудиты достоверности объяснения. Это триадное различие позволяет проверять этические улучшения, а не предполагать<sup>14</sup>.

### Онтологии данных: в поиске баланса

Национальные академии наук, инженерии и медицины США выпустили весной 2026 года руководства по онтологиям для принятия решений на основе данных, включающие разработку и использование<sup>15</sup>, подход к исследованию и результаты<sup>16</sup>. Основной целью проведённых исследований была разработка концептуальной основы руководств для сотрудников государственных департаментов транспорта по разработке стратегий создания и использования онтологий для поддержки гибкого и эффективного принятия решений на основе данных. Эти руководства – ценный материал и практический опыт для тех, кто планирует объединить разрозненные данные и системы в своей предметной области, где разработка онтологии – это путь, а не конечная цель.

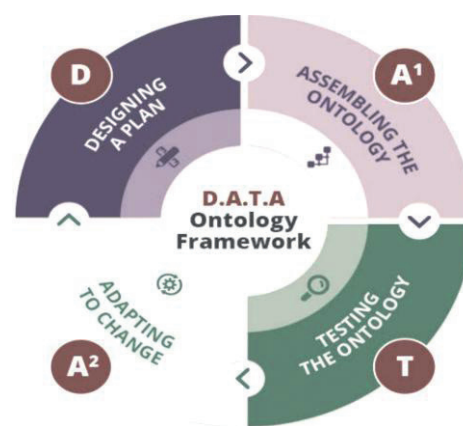
Достаточно привести одну схему из этих руководств, чтобы оценить важность этих документов для практики – это структура D.A.T.A, которая состоит из четырёх циклических стратегий: разработка плана, обеспечивающего успех (D); сборка онтологии (A<sup>1</sup>); тестирование и валидация онтологии (T); адаптация и совершенствование онтологии (A<sup>2</sup>) и процесса с учётом полученного опыта.

В стратегии D уточняется цель, подтверждается область, классифицируются заинтересованные стороны, *создаётся план*. В A<sup>1</sup> определяется объём работ, собирается необходимая информация, *систематизируется и классифицируется информация*. В T определяются и выполняются тестовые сценарии; изменяются и проверяются онтологии; *разворачивается онтология*. В стратегии A<sup>2</sup> создаётся репозиторий онтологий; устанавливается протокол обновления; определяются возможности для улучшения; разрабатывается стратегия управления версиями; *внедряются обновления и документируются изменения*.

Основными проблемами, отмеченными разработчиками этих руководств, были: отсутствие в устаревших системах внутренних стандартов данных и документации, облегчающих построение онтологий; продолжающаяся интеграция устаревших систем и переход к корпоративным активам сосредоточены в основном на технических аспектах и интеграции данных без учёта организационных и культурных факторов; текучесть кадров усугубила потерю ценных знаний, необходимых для разработки бизнес-правил и онтологий; значительный пробел в знаниях и компетенциях персонала в области разработки и применения онтологий данных.

Грамотно построенная онтология позволяет включать большие объёмы разнообразных данных из множества источников в процессы аналитики данных, способствуя принятию решений и удовлетворению потребностей в данных и организационных требований.

Например, информация о мосте должна выходить за рамки сведений о его основных компонентах и включать объёмы дорожного движения, распространение шума, гидрологические условия, сток ливневых вод, использование моста птицами или летучими мышами, историю технического обслуживания, затраты на строительство и техническое обслуживание, культурное или историческое значение моста и др.



<sup>15</sup>National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2026. Data Ontologies for Data-Driven Decision-Making: Development and Use. 82 p. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/29373>.

<sup>16</sup>National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2026. Data Ontologies for Data-Driven Decision-Making: Research Approach and Findings. 86 p. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/29374>.

Комплексный подход к данным позволяет объединить процессы принятия решений в различных областях, повышая эффективность управления активами и обеспечивая информационную поддержку для других бизнес-направлений.

*Здесь также важен баланс интересов, и задача создателей онтологий – соблюсти его!*

## Восьмые Лемовские чтения: утопия – путь в будущее

В конце марта этого года в Самарском университете имени С.П. Королёва<sup>17</sup> прошли очередные, уже восьмые, Лемовские чтения (<https://lem.ssau.ru/>). Эта конференция посвящена Станиславу Лему и его наследию, а также осмыслению фантастических произведений с разных позиций – от философии до лингвистики, от права до математики. Утопия – это положительный образ будущего, и организаторы конференции сконцентрировались именно на таком формате, разбирая произведения Ивана Ефремова, братьев Стругацких, Виктора Пелевина и др. Бессменный руководитель этой конференции, член редколлегии нашего журнала, заведующий кафедрой философии Самарского университета, профессор Александр Юрьевич Нестеров объяснил тематику конференции: «*Результатом создания утопий и усилий по концептуализации мира, которого нет (будущего), становятся образы идеального будущего. То есть такого, к чему стремится человечество. И если оставаться в парадигме общества потребления, то его члены оказываются идеальными объектами манипуляций... И чтобы этого не произошло, необходимо культивировать утопию в самых её разных формах*».



Последователи основоположника онтологии проектирования архитектора Витрувия также устремились в утопические проекты<sup>18</sup>. В контексте, отмеченном Антропоценом, климатическим кризисом и современным блоком политического и проективного воображения, утопии и антиутопии становятся фундаментальными критическими инструментами архитектуры. Новые конструкции действуют как эпистемологические и проективные устройства, способные исследовать возможные будущие, выявлять скрытые напряжения и ставить под сомнение идеологические рамки, формирующие создаваемую среду. *Спекулятивный дизайн* рассматривается как современное обновление утопической и дистопической традиции в архитектуре, понимаемое не как нормативная модель, а как критический метод воображения радикальных преобразований жилищного пространства в ответ на текущие экологические, социальные и геополитические вызовы.

В онтологии проектирования философы и близкие к ним фантасты стоят у истоков новых идей, на верхних ступенях этого научного направления, на подступах к формализации проектных знаний. В контексте «середины» Аристотеля их позиция в области формализации этих знаний обозначается на краю известных и апробированных знаний вербально, образно и всегда неконкретно. Ценность и заслуга философов и фантастов в том, что они способны найти и обозначить бреши в границах наших знаний, показать возможные пути развития, указать направления поиска новых знаний и практических решений, обозначить грядущие цивилизационные проблемы, невидимые «стоящим на земле» онтологам и проектантам.

<sup>17</sup>Задачи фантастики – искать выход из ловушек цивилизации и эволюции. 01.04.2026. <https://ssau.ru/news/25462-zadachi-fantastiki-iskat-vykhod-iz-lovushkek-tsivilizatsii-i-evolyutsii>.

<sup>18</sup>Pierpaoli B., Meza E.G. Between Utopia and Dystopia: AI-Driven Speculative Design as a Critical Practice in Architecture. *Architecture* 2026, 6, 70. <https://doi.org/10.3390/architecture6020070>. Эта статья относится к специальному выпуску «Назад в будущее: утопии, дистопии и новый мегаструктурализм 2020-х годов». Опубликовано: 24 апреля 2026 года.

«Приземлённые» онтологи описывают видимый им мир, и стремятся найти возможность передать эти знания в цифровую среду. Проектанты многочисленных артефактов по-прежнему стремятся воплотить навеянные фантазии в жизнь, используя современную вычислительную среду. *Наш журнал им всем в помощь!*

## 20-летие Саммита по онтологии<sup>19</sup>

Первый Саммит по онтологии состоялся в марте 2006 года, поэтому юбилейный Саммит по онтологии 2026 года посвящён анализу 20-летней истории – ретроспективе прошлых саммитов, текущей деятельности в области онтологии и перспективам на будущее.

Саммит по онтологии – это ежегодная серия мероприятий, в которых принимают участие специалисты по онтологии и представители сообществ, связанных с темой Саммита. Саммит по онтологии организован открытым международным виртуальным практическим сообществом Ontolog (<https://ontologforum.com/index.php/Ontolog>) и Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST, <http://www.nist.gov/>) при поддержке других организаций, разделяющих цели и задачи Саммита.

На Саммите рассматриваются вопросы взаимосвязи между современными возможностями искусственного интеллекта (ИИ) и представлениями знания и смысла, в т.ч. с помощью онтологий. Обсуждаются текущие проблемы, связанные с интеграцией генеративного ИИ в задачи в области знаний и понимания: как генеративный ИИ помогает в области знаний и понимания; каковы его ограничения; как знания, формализованные в семантических ресурсах, таких как онтологии, могут помочь улучшить интеллектуальные системы?

На Саммите по онтологии 2026 обсуждались следующие темы: онтологии и ИИ; основы и инструменты; функциональная совместимость; образование, тренинг и сертификация. Подведение итогов Саммита ожидается в июне 2026 года.

21–25 сентября 2026 года в Бразилии (Витория, штат Эспириту-Санту) состоится 16-я Международная конференция по формальной онтологии в информационных системах (FOIS 2026, <https://foisconference.org/>) – флагманская конференция Международной ассоциации онтологии и её приложений<sup>20</sup> (первая конференция FOIS состоялась в 1998 году в Тренто, Италия).

В рамках FOIS 2026 пройдёт 19-й семинар по онтологическим исследованиям в Бразилии – ONTOBRAS 2026<sup>21</sup>. Конференция ONTOBRAS продолжает традицию, зародившуюся в Бразилии в 2005 году и признанную Бразильским онтологическим сообществом как уникальный высококвалифицированный научный форум для представления и обсуждения онтологий и примеров их применения в Бразилии.

*Свой посильный вклад в развитие онтологии в информатике вносит и наш журнал.*

## Юбилейный выпуск журнала «Онтология проектирования»

Дорогой наш читатель! Вы держите 60-й номер научного журнала «Онтология проектирования», идея создания которого родилась в июне 2011 года в Самаре на ПУМСС-2011 – 13-ой Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». За 15 лет в журнале опубликовано более 600 статей из различных городов и стран и более чем ста организаций. Пятнадцать лет поиска смысла, истины, бескорыстной работы

<sup>19</sup>20th Anniversary of the Ontology Summit. Ontology Summit 2026. Ontologies: Past, Present, Future. <https://ontologforum.com/index.php/OntologySummit2026>.

<sup>20</sup> International Association for Ontology and its Applications, IAOA, <https://iaoa.org/>.

<sup>21</sup> ONTOBRAS. <https://www.inf.ufpr.br/ontobras/en/19th-seminar-on-ontology-research-in-brazil-ontobras-2026/>.

увлечённых наукой, стремящихся к знаниям позволили совместными усилиями на малую толику расширить горизонт познания, найти возможность описать, формализовать и представить воспринимаемый нами мир в цифровой среде. *Но это ещё далеко не середина пути!*

К юбилейному номеру журнала ИИ (<https://chatgpt.com>) «приготовил» коллаж, изобразив работу над выпуском журнала коллег из Самары (редакция и члены редколлегии из самарских организаций имеют такую возможность оперативно физически собраться вместе).



Картина «Самарская школа онтологов и проектантов» фиксирует виртуальную ситуацию текущей работы редакции и представителей самарской части редколлегии журнала, демонстрируя устремлённость и сплочённость коллег в познании возможности формализации накопленных знаний с благородной целью проектирования будущего, в котором есть место гармонии и балансу человека с природой и «золотой середине» Аристотеля!

### В номере

В разделе «Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование» рассмотрены: интеграция контуров управления в многоуровневой архитектуре цифровых систем (**Москва, Дубна**); формализация понятий «диагностическая ситуация» и «диагностическая деятельность» (**Хабаровск**); онтология преобразований информации (**Санкт-Петербург, Москва**).

В разделе «Прикладные онтологии проектирования» рассмотрены: онтологическое моделирование нормативных знаний в строительной отрасли (**Владивосток**); онтологические модели систем управления технологическими процессами нефтеперерабатывающих производств (**Уфа**); автоматизация управления беспилотными транспортными средствами в точном земледелии (**Ульяновск**); онтологическое моделирование компонентов цифровой компетентности преподавателя высшей школы (**Уфа**).

В разделе «Инжиниринг онтологий» рассмотрены: онтологический подход к формализации знаний при проектировании сверхбольших интегральных схем (**Таганрог**); онтология методов машинного обучения при управлении проектами (**Томск, Санкт-Петербург, Москва**).

В разделе «Методы и технологии принятия решений» рассмотрены: проектирование конфигурации оборудования производственного участка на основе генетического алгоритма (**Оренбург**); построение правовой онтологии для поддержки принятия решений (**Воронеж**); построение графа знаний предметной области на основе открытых электронных словарей (**Москва**).

*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！**

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.89:004.94:165.9

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-189-203



### Интеграция контуров управления в многоуровневой архитектуре цифровых систем

© 2026, А.Н. Аверкин<sup>1</sup>, В.Н. Добрынин<sup>1</sup>, А.А. Миловидова<sup>1,2</sup> ✉

<sup>1</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

#### Аннотация

Многоуровневые цифровые системы управления характеризуются высокой структурной сложностью, динамичностью и наличием неоднородных контуров принятия решений. Существующие подходы характеризуются недостаточной формализацией согласования решений между уровнями системы в условиях неопределённости. Целью исследования является разработка формализованной трёхуровневой архитектуры управления на основе когнитивно-смысловой интеграции. В работе использованы системный анализ, когнитивное моделирование, онтологическое проектирование и гибридные технологии искусственного интеллекта. Предложена архитектурная модель, объединяющая семантический, когнитивный и вычислительный уровни в едином контуре управления, где вычислительный уровень рассматривается как подчинённый операциональный механизм реализации смысловых и когнитивных структур. Показано, что использование разработанной архитектуры обеспечивает согласование управленческих решений, снижение конфликтов между уровнями управления и повышение адаптивности системы. Новизна работы заключается в формализации принципов межуровневого согласования и самообучения в многоуровневых системах управления. Практическая значимость связана с возможностью применения предложенной архитектуры при разработке интеллектуальных платформ и систем поддержки принятия решений.

**Ключевые слова:** когнитивная архитектура, когнитивно-смысловая интеграция, цифровые системы, управление, адаптивность, когнитивное моделирование.

**Цитирование:** Аверкин А.Н., Добрынин В.Н., Миловидова А.А. Интеграция контуров управления в многоуровневой архитектуре цифровых систем. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.189-203. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-189-203.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124112200072-2).

**Вклад авторов:** Аверкин А.Н. – разработка структуры статьи и подбор источников; Добрынин В.Н. – обоснование теоретических положений, подготовка примеров; Миловидова А.А. – формулировка концепции исследования, разработка методологии, анализ результатов.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Введение

Искусственный интеллект (ИИ) выходит за пределы вычислительных задач и аналитических процедур, превращаясь в активного партнёра человека в процессах познания, творчества и принятия решений [1, 2]. При этом возникает методологическая проблема согласования машинной точности и человеческого мышления, проблема интерпретируемости и объяснимости результатов работы ИИ. Несмотря на прогресс в области объяснительного ИИ (*XAI – eXplainable AI*), современные подходы ограничиваются ретроспективными и частными

объяснениями (ХАИ 1.0), которые не учитывают динамический контекст, ценностные ограничения и коллективную природу принятия решений. Возникает потребность в переходе к парадигме ХАИ 2.0 – системам проактивной, диалоговой и смысло-центричной объяснимости, встроенной в архитектуру интеллектуального агента [3-5]. В разрабатываемой концепции *когнитивно-смысловой интеллектуальной оболочки* (КСИО) предлагается модель, в которой объяснимость рассматривается как фундаментальное системное свойство, обеспечивающее согласование между семантическим, когнитивным и коммуникативным уровнями. Под коммуникативным уровнем понимается уровень диалогового и междисциплинарного согласования смыслов, интерпретаций и целей между человеком, междисциплинарным коллективом и интеллектуальной оболочкой (а не только интерфейсное взаимодействие).

Цель настоящего исследования состоит в разработке концепции КСИО – архитектурной модели, интегрирующей семантические, когнитивные и коммуникативные уровни в человеко-машинной системе. В этой концепции материально-технологическое обеспечение рассматривается как инфраструктурная основа, а смысловые и коммуникативные контуры определяют адаптивность и способность цифровых процессов к саморазвитию.

Для построения трёхуровневой архитектуры управления использованы гибридные технологии ИИ, включая большие языковые модели (БЯМ) и механизмы хрономоделирования. В качестве инструментов синтеза и проверки применялись семантическое моделирование, сценарное прогнозирование и методы мультиагентной имитации.

## 1 Методологические основы

Методологический каркас КСИО формируется на пересечении системного анализа, когнитивных наук, философии сознания, технологий ИИ [6-10].

Инструментальное ядро КСИО включает совокупность взаимосвязанных средств, обеспечивающих формализацию, согласование и объяснимость управленческих и проектных решений в условиях смысловой неоднородности и неопределённости. К числу таких средств относятся: многослойные модели хрономоделирования, иерархическая система метрических концептуальных шаблонов (ИСМКШ), а также БЯМ, используемые для обработки и интерпретации слабоформализованной информации [11, 12]. Под многослойными моделями хрономоделирования в КСИО понимаются формализованные модели представления, анализа и согласования управленческих процессов во времени. Эти модели позволяют согласовывать краткосрочные, среднесрочные и стратегические решения в едином когнитивно-смысловом контуре управления. ИСМКШ предназначена для формализованного описания и согласования понятий, моделей и отношений между уровнями управления на основе заданных метрик и шкал оценивания. ИСМКШ рассматривается как набор доменно-независимых *мета-шаблонов* для описания целей, ограничений, методов и критериев оценки в различных контекстах деятельности междисциплинарных коллективов.

Примером такого шаблона может служить метрический концептуальный шаблон «Задача», используемый для формализованного описания и согласования задач различной природы. Здесь задача трактуется как процесс преобразования исходного состояния  $X$  (материального, информационного или их сочетания) в результат  $Y$ , соответствующий заданной цели  $C$ , при наличии ограничений  $G(X, Y) = 0$ . Цель  $C$  понимается как мысленное желаемое состояние результата, представленное в материальной, информационной или иной форме. Преобразование  $X \rightarrow Y$  осуществляется с использованием метода  $F$ , задающего способ, инструкцию или правило получения результата. Для оценки достижения цели в шаблоне вводится система критериев  $K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ , для которых определяются соответствующие шкалы измерения  $H$ , методы измерения  $M_k$  и методы оценки  $M_{1k}$ . Результат задачи представляется в заданной форме  $R$  (графической, текстовой, мультимедийной и др.), после чего выполняется его интерпретация  $P$  в нотации цели и аргументация  $E$  степени соответствия полученного результата поставленной цели. Уровень соответствия результата цели фиксируется показателем  $W$ , а итоговая оценка  $S$  может формироваться с учётом позиции и ожиданий целевой аудитории.

Шаблон «Задача» рассматривается как мета-шаблон, допускающий частичное заполнение и адаптацию в зависимости от предметной области (ПрО), уровня управления и характера решаемой задачи. Он обеспечивает единый понятийный и метрический каркас для согласования целей, методов, критериев и интерпретаций между участниками многодисциплинарного коллектива и КСИО.

Важным элементом инструментального ядра КСИО является связка ИСМКШ – БЯМ – промпт. ИСМКШ задаёт онтологическую структуру анализа, промпт формализует предъявление требований шаблона, БЯМ используется как вычислительно-когнитивный интерпретатор – как средство аргументированного выделения смысловых атрибутов.

На рисунке 1 представлена диаграмма, отражающая иерархическую структуру КСИО. Каждый уровень встроен в общую систему через механизмы диалога, адаптации и смыслообразования и выполняет свою функцию.

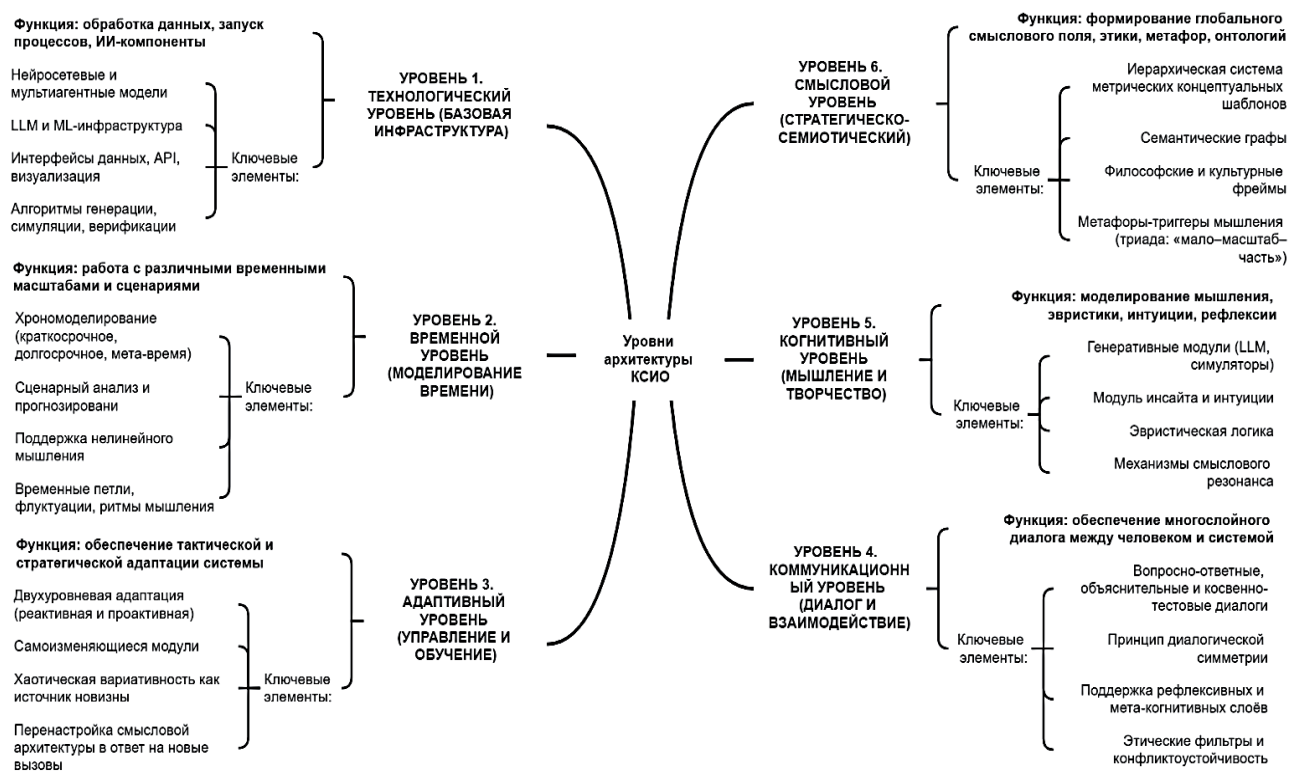


Рисунок 1 – Иерархическая структура когнитивно-смысловой интеллектуальной оболочки (КСИО)

Базовый (технологический) уровень обеспечивает работу ИИ и алгоритмов. Временной уровень управляет сценариями и хрономоделированием. Адаптивный уровень позволяет системе обучаться, перестраиваться и саморазвиваться. Коммуникационный уровень позволяет организовать диалог с пользователем. Когнитивный уровень обеспечивает моделирование мышления, творчества и интуиции. Смысловой уровень задаёт философское, культурное и стратегическое ядро всей архитектуре. КСИО ориентирована на интеграцию технических и гуманитарных форм мышления в едином смысловом пространстве, позволяющем решать частные задачи в их связи со стратегическими целями и ценностными основаниями деятельности многодисциплинарного коллектива.

КСИО проектируется на основе набора *фундаментальных принципов*, определяющих требования к её устойчивости, адаптивности и смысловой глубине в условиях неопределённости, междисциплинарности и этически ответственного взаимодействия с человеком.

*Принцип смысловой комплементарности* обеспечивает согласование понятийных структур, терминов, интерпретаций и ценностных оснований между участниками с различной профессиональной и дисциплинарной подготовкой. Этот принцип осуществляется через ИСМКШ, включающую: общие структурные и метрические

основания описания задач; семантические графы, обеспечивающие установление и анализ связей между понятиями и моделями; коммуникативные и рефлексивные модули, поддерживающие диалоговую корректировку смыслов. В операциональном контуре КСИО ИСМКШ задаёт нормативную структуру согласования, промпты и обеспечивает её предъявление в процессе анализа конкретных информационных объектов, а БЯМ используются для реконструкции смыслов (явных и неявных) с последующей интерпретацией в коммуникативном контуре. В результате формируется смысловое пространство, в котором различные подходы дополняют друг друга.

*Принцип диалогической симметрии и проактивной объяснимости* задаёт требования к организации коммуникации в виде проактивного процесса совместного смыслообразования. КСИО проектируется таким образом, чтобы выявлять потенциальные смысловые разрывы, конфликты интерпретаций и этические дилеммы, возникающие в процессе принятия решений [3]. Реализация данного принципа предполагает использование адаптивных интерфейсов, ориентированных на порождение контрастных и каузальных нарративов, а также модулей концептуального обогащения, фиксирующих эволюцию понимания и интерпретаций в ходе диалога.

*Принцип распределённого интеллекта* ориентирован на многоуровневую когнитивную кооперацию, в контексте которой интеллектуальные ресурсы распределяются между человеком, интеллектуальными модулями и коллективным субъектом деятельности. Под смысловым резонансом понимается взаимодействие когнитивно-семантических контуров, обеспечивающее взаимное усиление и переосмысление частных интерпретаций в коллективном контексте. Такое взаимодействие создаёт условия для проявления творческих эффектов и эмерджентных форм коллективного поведения [13-15].

*Принцип адаптивности* обеспечивает способность изменять функционал КСИО (аналитик, модератор, генератор идей, критик), адаптируясь к контексту и задачам коллектива.

*Принцип устойчивого развития* задаёт требования к обеспечению жизнеспособности, этической ответственности и согласованию технологических, гуманитарных и экологических ограничений. Устойчивое развитие встраивается в КСИО посредством: стратегического хрономоделирования, позволяющего рассматривать решения в различных временных горизонтах и выявлять отложенные эффекты; смыслового прогнозирования, ориентированного на анализ возможных интерпретаций и использования решений в социальном и профессиональном контекстах; контекстуального аудита сценариев с целью проверки согласованности предлагаемых решений с ценностными основаниями, этическими требованиями и ограничениями ПрО.

*Принцип этической ответственности* задаёт требования к гуманитарной рефлексии в процессе принятия решений. Этическая ответственность встраивается в когнитивно-смысловой контур КСИО на уровне формирования, анализа и согласования сценариев действий. Анализ этических аспектов осуществляется через формализованный контур, включающий ценностные и культурные ограничения, сопоставление альтернативных сценариев с этими ограничениями и обоснование допустимости получаемых решений. В качестве инструментальных средств используются: фильтры ценностей, задающие нормативные ограничения допустимых решений; модули оценки допустимости, осуществляющие проверку сценариев на соответствие этическим и культурным требованиям; процедуры этического обоснования, направленные на выявление конфликтов ценностей.

*Принцип диалоговой многослойности* задаёт требования к организации коммуникации в виде многоуровневого диалога, ориентированного на совместное смыслообразование и объяснимость. Диалог в КСИО трактуется как совокупность взаимосвязанных уровней – от кратких вопросно-ответных обменов до развёрнутых объяснительных диалогов, используемых в зависимости от контекста задачи и стадии её осмысления. Принцип осуществляется через использование сценарных диалоговых шаблонов, задающих тип и структуру взаимодействия, и когнитивных настроек, определяющих форму и глубину диалога с учётом роли участника.

Приведённые принципы ориентированы на формирование гибкой и устойчивой когнитивной среды, способной поддерживать человека в условиях концептуальной новизны, смысловой неопределённости и этической сложности.

В КСИО принципы объяснимости нового поколения *XAI 2.0* осуществляются через следующие инструментальные механизмы.

- *Контекстно-зависимые и многоформатные объяснения.* Система адаптирует глубину, форму (текст, семантический граф, нарратив, метафора) и терминологию объяснения в зависимости от роли пользователя (эксперт, менеджер, регулятор), этапа задачи и ПрО.
- *Диалоговая объяснимость.* КСИО поддерживает итеративный диалог-уточнение, позволяя пользователю задавать вопросы типа «почему?», «а что, если?» и «как это соотносится с целью X?», углубляясь в логику решения.
- *Контрастные и каузальные объяснения.* КСИО генерирует объяснения через сравнение: «Решение А было выбрано вместо В, потому что в данном контексте критерий У имел больший вес, чем критерий Z».
- *Объяснение на основе динамических онтологий.* Смысловые структуры ИСМКШ служат основой для построения объяснений, которые эволюционируют вместе с накоплением опыта и уточнением ценностных рамок.

## 2 Методологическая триада метафор

Методологическая триада метафор задаёт основу для осмысления КСИО (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Обобщённый философско-технологический каркас триады

Метафора	Философская основа	Функциональная реализация
1 «Чтобы достичь большего – надо начать с малого»	Диалектика, синергетика, прагматизм	Инкрементное обучение, микро-смыслы, итеративная архитектура
2 «Чтобы начать с малого – надо объять картину маслом»	Феноменология, системное мышление, гештальт	Многоуровневое планирование, шаблоны, диалоги прогнозирования
3 «Часть больше целого»	Системная философия, теория сложных сетей, когнитивная наука	Интеллектуальный анализ узлов, стратегическая трансформация

Данные метафоры выполняют функцию философско-технологических принципов, которые направляют архитектуру, функционирование и саморазвитие КСИО.

*Метафора 1* указывает на необходимость эволюционного, поэтапного подхода к развитию сложных систем. В КСИО она осуществляется через выделение микро-смыслов – частных задач, смысловых фрагментов и сценариев, через их включение в стратегические структуры, через масштабирование локальных решений на уровень системы. Каждый микро-смысл в КСИО рассматривается как потенциальный катализатор изменений всей структуры – при условии его связи с глобальным смысловым контекстом [16].

Инструментальная реализация в КСИО базируется на когнитивно-смысловом моделировании, обратной связи в режиме реального времени, иерархической системе шаблонов, сценарном прогнозировании с помощью БЯМ и многоагентных моделей, обучении с подкреплением, смысловом резонансе и инкрементной когнитивной сборке.

*Метафора 2* раскрывает принцип целостности как необходимое условие эффективного действия: частное приобретает смысл лишь в контексте общего. Это означает, что каждая операция и каждый модуль должны быть встроены в формализованное представление стратегических целей, приоритетов, ограничений, ключевых понятий, их взаимосвязей и метрик, используемых для согласования локальных решений со стратегией системы [17].

Технологическая реализация в КСИО строится на принципах системного анализа, многоуровневого управления и формализованного согласования решений и включает иерархическую структуру смыслов. В настоящей работе под *смыслом* понимается формализованное представление интерпретации объекта, процесса или решения, зафиксированное в виде совокупности понятий, связей, ограничений и целевых установок, используемых в управлении.

*Метафора 3* является парадоксальной формулой, выражающей феномен эмерджентности, когда отдельная часть системы обладает системообразующим потенциалом. В контексте КСИО это означает, что локальный модуль может изменить архитектуру системы, а частный сценарий способен стать ядром стратегической трансформации. Философская база метафоры опирается на широкий спектр идей от античной мысли до культурно-семиотических и когнитивных теорий [18] и теорий сложных систем [19].

## 3 Формирование и развитие творческих способностей

КСИО предназначена для создания условий формирования и развития творческих способностей индивидуальных участников и коллективных субъектов [20–22]. КСИО совместно с человеком выполняет функции смыслового партнёра, который инициирует альтернативные интерпретации, выявляет противоречия и поддерживает концептуальные сдвиги. Основные механизмы такой интеграции и способы их реализации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Механизмы поддержки творчества в КСИО

Компонент творческого процесса	Как реализуется в КСИО (механизм)	Инженерная реализация	Результат / эффект
<i>Интуиция</i>	Создание условий для предварительной, недоопределённой интерпретации задачи	Ослабление жёстких ограничений на ранних этапах анализа; генерация альтернативных формулировок задачи; сценарное ветвление	Выявление неочевидных направлений поиска
<i>Эвристика</i>	Управляемый эвристический поиск решений	Наборы эвристических правил, шаблонов рассуждения и эвристических операторов в диалоговом контуре	Ускорение поиска допустимых решений
<i>Инсайт</i>	Реконфигурация смысловых связей	Перестройка когнитивных графов; выявление скрытых связей и противоречий; контрастные сопоставления гипотез	Резкий переход к новым концептуальным решениям
<i>Эмпатия (когнитивная)</i>	Учёт альтернативных точек зрения	Многопозиционный диалог; моделирование ролей участников; переключение перспектив	Повышение полноты и устойчивости решений
<i>Трансцендентное мышление</i>	Выход за рамки текущих интерпретаций	Провокационные вопросы; парадоксальные сценарии; намеренное нарушение привычных рамок	Расширение пространства допустимых идей
<i>Комбинирование идей</i>	Интеграция слабых и сильных гипотез	Смысловая комплементарность; автоматическое сопоставление и скрещивание концептов	Усиление потенциально перспективных идей
<i>Преодоление когнитивного зависания</i>	Восстановление смысловой динамики	Введение альтернативных интерпретаций; реструктуризация когнитивных связей; смена роли системы	Выход из тупиковых состояний мышления
<i>Коллективное творчество</i>	Распределённая генерация и согласование идей	Сеть когнитивных узлов; механизмы согласования через ИСМКШ и диалог	Эмерджентные коллективные решения
<i>Рефлексия и оценка</i>	Осмысление и отбор результатов	Метрики согласованности; обратная связь; трассировка решений	Повышение воспроизводимости и качества
<i>Интеграция в стратегию</i>	Включение идей в архитектуру управления	Каскадные ИСМКШ; сценарное и хрономоделирование	Переход от идеи к реализуемым решениям

КСИО включает механизмы, которые создают пространство генерации новых смыслов и идей и обеспечиваются следующими компонентами:

- *конструктивный хаос*, инициирующий нестабильные и провоцирующие шаблоны мышления;
- *парадоксальные механизмы*, направленные на постановку вопросов, подрывающих исходные когнитивные рамки;
- *модели смысловой фрустрации*, задерживающие очевидные решения ради углубления анализа.

Технологическая реализация КСИО включает использование режимов когнитивной динамики, сочетающих стабильные и дестабилизирующие состояния, направленные на расширение пространства решений и их формализацию. На рисунке 2 представлена архитектура функциональных модулей и режимов когнитивной обработки, используемых в КСИО для формирования и развития творческих способностей в условиях управляемой неопределённости. Здесь используется режим конструктивного хаоса, под которым понимается ограниченный по времени и параметрам режим когнитивной дестабилизации, предназначенный для генерации альтернативных смысловых и проектных конфигураций.

Данный режим характеризуется временным ослаблением жёстких когнитивных и логических ограничений, появлением противоречивых интерпретаций и повышенной чувстви-

тельностью системы к малым изменениям входных данных. В терминах теории динамических систем данный режим соответствует областям повышенной неустойчивости, в которых возможен переход системы на новые траектории развития.



Рисунок 2 – Архитектура функциональных модулей и режимов когнитивной динамики в КСИО

Использование режима конструктивного хаоса в КСИО является контролируемым и обратимым. Генерация хаотических смысловых флуктуаций допускается в рамках заданных ограничений и завершается при достижении формализованных критериев выхода, обеспечивающих восстановление управляемости и интеграцию полученных результатов в архитектуру управления. К таким критериям относятся:

- формирование устойчивых смысловых конфигураций, интерпретируемых в терминах ИСМКШ;
- снижение уровня противоречивости и неопределённости ниже установленных пороговых значений;
- согласование полученных решений со стратегическими целями и метриками системы;
- возможность трассируемого перехода от смысловых конфигураций к локальным сценариям и операционным решениям;
- восстановление устойчивых контуров принятия решений и воспроизводимости результатов.

В научных коллаборациях КСИО способна согласовывать позиции участников, находящихся в разных культурных и концептуальных контекстах. В инженерных проектах она обеспечивает баланс между оптимизацией ресурса и учётом этических и экологических последствий.

В культурных взаимодействиях КСИО становится «переводчиком смыслов» между традициями, обеспечивая ценностное взаимопонимание.

В таблице 3 показана взаимосвязь модулей творческого мышления в КСИО. Каждый модуль отвечает за конкретный способ генерации нового знания, а режимы определяют стиль участия КСИО в творческом процессе. Их сочетания образуют матрицу, где система может стимулировать нестандартные комбинации, провоцировать инсайты, усиливать интуицию или поддерживать философское переосмысление.

#### 4 Механизмы коллективного творчества

В концепции КСИО коллектив рассматривается как распределённая сеть взаимодействующих когнитивных узлов, в которой каждый участник вносит индивидуальные знания, интерпретации и гипотезы. Объединение этих локальных фрагментов в общее когнитивно-смысловое пространство осуществляется через совокупность методологических механизмов, включающих семантическое соотнесение понятий и аргументов, сопоставление идей с целями и контекстами деятельности, согласование интерпретаций в коммуникативном контуре

КСИО. Результатом является формирование когнитивной карты, в которой различные точки зрения сохраняют различимость, но становятся взаимосвязанными.

Таблица 3 – Матрица формирования и развития творческих способностей в КСИО

Модуль → Режим КСИО ↓	Эвристические нетривиальные комбинации	Инсайт	Интуиция	Трансцендентное мышление
<i>Провокатор</i>	Подбирает неожиданные связи между идеями разных областей	Построение парадоксальных метафор	Ставит вопросы, которые интуитивно кажутся важными	Способствует выходу за пределы системы
<i>Навигатор</i>	Предлагает смысловые траектории между концепциями	Выстраивает причинно-смысловые цепочки до «вспышки понимания»	Предлагает направление на основе неполных данных	Связывает текущую задачу с глобальными концепциями
<i>Партнёр</i>	Совместно комбинирует элементы идеи с участником	Помогает проговорить идею до момента «озарения»	Дополняет догадки пользователя предиктивной логикой	Участствует в обсуждении философских гипотез и гиперицей
<i>Отзеркаливатель</i>	Возвращает нестандартные элементы, которые пользователь ввёл раньше	Резонирует с частично сформулированными мыслями	«Подсвечивает» слабые, «сырые» формулировки и предлагает развитие	Трансформирует логическую структуру высказываний в образно-смысловые конструкции

Когнитивная карта КСИО трактуется как многослойная структура представления идей, в которой узлами выступают гипотезы, аргументы и интерпретации, а связями — отношения влияния, согласования, трансформации и происхождения. Карта включает индивидуальные, групповые и интегральные уровни, позволяя отслеживать эволюцию идей от отдельных предложений к коллективным стратегическим моделям.

Преимственность коллективного творчества обеспечивается за счёт сохранения в карте исходных гипотез с их контекстами и аргументацией в подготовке решений. Стратегические модели формируются путём связывания, переосмысления и укрупнения с возможностью возврата к альтернативным интерпретациям. Функционирование механизмов коллективного творчества возможно с применением комплекса технологий (см. таблицу 4).

Таблица 4 – Механизмы коллективного творчества и обеспечивающие технологии

Механизм	Ключевые технологии	Основные функции
Распределённый интеллект	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Многоагентные системы</li> <li>▪ Децентрализованные базы знаний</li> <li>▪ Алгоритмы коллективного консенсуса и фильтрации</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Моделирование сети участников</li> <li>▪ Интеграция фрагментов знаний</li> <li>▪ Выявление и усиление значимых идей</li> </ul>
Смысловая комплементарность	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Онтологии и семантические сети</li> <li>▪ Нейросемантические модели</li> <li>▪ Концептуальные карты</li> <li>▪ Диалоговые интерфейсы</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Перевод между дисциплинарными языками</li> <li>▪ Согласование терминологии</li> <li>▪ Визуализация точек пересечения</li> <li>▪ Поддержка многоуровневых диалогов</li> </ul>
Эмерджентность	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Генеративные модели</li> <li>▪ Имитационное моделирование</li> <li>▪ Алгоритмы эволюционного проектирования</li> <li>▪ Виртуальная и дополненная реальности и когнитивная визуализация</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Порождение новых гипотез и смыслов</li> <li>▪ Проверка идей в виртуальных средах</li> <li>▪ Создание инновационных решений</li> <li>▪ Усиление эффекта совместного открытия</li> </ul>

Технологии распределённого интеллекта позволяют моделировать коллектив как сеть взаимодействующих когнитивных узлов.

Технологии смысловой комплементарности устраняют барьеры междисциплинарного общения. Существенную роль играют диалоговые интерфейсы, которые позволяют вести общение в разных режимах [23-26].

Технологии эмерджентности направлены на порождение новых смыслов, которые несводимы к индивидуальным вкладам участников.

Синтез указанных технологий формирует системную основу для коллективного творчества в КСИО: распределённый интеллект задаёт сетевую организацию; смысловая комплементарность снимает терминологические и когнитивные барьеры; механизмы эмерджентности обеспечивают условия для рождения новых идей и смыслов, выходящих за пределы индивидуальных когнитивных горизонтов.

## 5 Применение в научной, инженерной и образовательной практике

КСИО разрабатывается как практико-ориентированная среда, способная функционировать в условиях высокой смысловой, временной и дисциплинарной сложности. Её архитектура обеспечивает интеграцию технических и гуманитарных компонентов в коллективной деятельности, превращая её в интеллектуальный медиатор между человеком и высокотехнологичной средой.

Современные научные коллаборации всё чаще организуются как междисциплинарные сети, объединяющие специалистов из различных Про. Подобные коллективы сталкиваются с рядом вызовов: различием языков, методов и целей; утратой целостного стратегического контекста; трудностями согласования локальных задач с общими целями<sup>1,2</sup> [27]. КСИО выполняет роль интегративного посредника, способна синхронизировать терминологии, выработать совместную когнитивно-смысловую модель исследуемого объекта и поддерживать её эволюцию в течение жизненного цикла проекта.

В инженерной разработке КСИО, как адаптивная интеллектуальная надстройка, позволяет учитывать техническую строгость, этические ограничения и социально-пользовательский контекст.

В сфере образования и междисциплинарной подготовки КСИО открывает возможности для построения индивидуальных образовательных траекторий, организации адаптивного диалога обучающегося с системой и интеграции научных, культурных и философских знаний в единое когнитивное пространство. КСИО становится средой, в которой обучающиеся могут самостоятельно конструировать свои образовательные маршруты в зависимости от стиля мышления и индивидуальных целей.

В области стратегического управления и принятия решений КСИО может функционировать как интеллектуальный партнёр, способный работать в условиях высокой неопределённости, конфликтующих интересов и технологических изменений. Используются генеративные языковые модели, диалоговые интерфейсы, нейросетевые предиктивные системы и динамически корректируемые ИСМКШ.

Особенностью КСИО является способность к онтологической и культурной адаптации. В таблице 5 представлено применение КСИО в научной, инженерной и междисциплинарной практиках.

<sup>1</sup> CERN Projects. CERN, 2025. <https://cerneu.web.cern.ch/projects-cern>.

<sup>2</sup> Human Brain Project ends: what has been achieved? Human Brain Project, 2023. <https://www.humanbrainproject.eu/en/follow-hbp/news/2023/09/28/human-brain-project-ends-what-has-been-achieved/>.

Таблица 5 – Применение КСИО в различных практиках

Сфера применения	Функции КСИО	Примеры использования
Научная практика	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Формирование исследовательских вопросов и гипотез</li> <li>▪ Интеграция знаний из разных областей</li> <li>▪ Интерпретация и переосмысление данных</li> <li>▪ Поддержка философской рефлексии науки</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Создание междисциплинарных моделей в биоинформатике</li> <li>▪ Диалог с исследователем для уточнения гипотез</li> <li>▪ Концептуализация новых парадигм</li> </ul>
Инженерная практика	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Генерация нестандартных решений</li> <li>▪ Системное проектирование</li> <li>▪ Интеграция технических и гуманитарных аспектов</li> <li>▪ Моделирование и проверка идей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Проектирование интерфейсов «человек–машина» с учётом культурных факторов</li> <li>▪ Создание виртуальных полигонов</li> <li>▪ Разработка инновационных архитектурных решений</li> </ul>
Междисциплинарная практика	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Построение коллективных смысловых карт</li> <li>▪ Обеспечение диалога между разными дисциплинами</li> <li>▪ Поддержка долгосрочного сотрудничества</li> <li>▪ Создание новых интегративных парадигм</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Экотехнологии: объединение данных экологии, инженерии и гуманитарных наук</li> <li>▪ Междисциплинарные исследования в области искусственного интеллекта</li> <li>▪ Культурно-технологические проекты</li> </ul>

## Заключение

В статье показано, что реализация КСИО создаёт возможности для:

- объединения когнитивных, этических и инженерных компонентов в единой архитектуре управления;
- использования формализованной методологической логики перехода от локальных действий и решений к глобальным представлениям и к интегральным системным моделям;
- развития творческих способностей участников за счёт поддерживаемых механизмов генерации, согласования и переработки идей;
- проявления двухуровневой адаптивности, включающей оперативную адаптацию к текущим изменениям условий и задач и стратегическую адаптацию, связанную с перестройкой собственной архитектуры и смысловых оснований;
- применения в различных контекстах – от научных коллабораций и инженерного проектирования до стратегического управления и сопровождения интеллектуальных систем.

Адаптивность КСИО реализуется в её трёхуровневой архитектуре, что обеспечивает согласование реактивных и рефлексивных механизмов управления. Вычислительный уровень отвечает за обработку данных и выполнение алгоритмов; когнитивный уровень – за формирование, согласование и перестройку когнитивных паттернов; семантический уровень – за работу с целями, ценностями и смысловыми основаниями системы.

Представленная архитектура КСИО соответствует ключевым требованиям объяснимого ИИ (ХАИ 2.0). Её трёхуровневая структура обеспечивает:

- глубинную объяснимость, реализуемую как переход от причинно-следственных зависимостей на вычислительном уровне через когнитивные паттерны на среднем уровне к ценностно-смысловым обоснованиям на семантическом уровне;
- коллективную и социальную приемлемость, достигаемую за счёт механизмов смысловой комплементарности и распределённого интеллекта, позволяющих формировать объяснения, понятные для разнородных групп участников;
- адаптивность объяснений, как способность системы изменять роли участников и стиль коммуникации в зависимости от стадии проекта и контекста взаимодействия.

КСИО может рассматриваться как методологическая платформа для создания систем ХАИ 2.0, в которых доверие к ИИ формируется на основе прозрачного, конструктивного и смысло-ориентированного диалога между человеком и машиной [27, 28].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Young G.O.** Synthetic structure of industrial plastics (book style with paper title and editor). *Plastics*. 2nd ed. Vol.3 / Ed. J. Peters. New York: McGraw-Hill, 1964. P.15–64.
- [2] **Vaccaro M., Almaatouq A., Malone T.** When combinations of humans and AI are useful: A systematic review and meta-analysis. *Nat. Hum. Behav.* 2024. Vol.8. P.2293–2303. DOI: 10.1038/s41562-024-02024-1.
- [3] **Longo Luca; et al.** Explainable Artificial Intelligence (XAI) 2.0: A manifesto of open challenges and interdisciplinary research directions. *Information Fusion*. 2024. 106. DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102301.
- [4] **Dolgikh S.** The trap of presumed equivalence: Artificial General Intelligence should not be assessed on the scale of human intelligence. *Discov. Artif. Intell.* 2025. Vol.5. P.70. DOI: 10.1007/s44163-025-00317-6.
- [5] **Файзуллаева И.Г.** Влияние искусственного интеллекта на жизнь человека. *Academic Research in Educational Sciences*. 2024. № 5, С.520-538.
- [6] **Gupta S., Modgil S., Bhattacharyya S., et al.** Artificial intelligence for decision support systems in the field of operations research: Review and future scope of research. *Ann. Oper. Res.* 2022. Vol.308. P.215–274. DOI: 10.1007/s10479-020-03856-6.
- [7] **Савин С.В., Мурзин А.Д.** Системы поддержки принятия решений на базе искусственного интеллекта: интеграция, адаптация и оценка эффективности. *Экономика и управление*. 2024. №12, С.1521-1534.
- [8] **Ао С.-И., Hurwitz M., Palade V.** Cognitive Computing and Business Intelligence Applications in Accounting, Finance and Management. *Big Data Cogn. Comput.* 2025. Vol.9, no.3. P.54. DOI: 10.3390/bdce9030054.
- [9] **Kapetanidou I.A., Nizamis A., Karanastasis E., et al.** Cognitive Computing Continuum: State-of-the-Art Review and ENACT Vision & Approach. *J. Grid Comput.* 2025. Vol.23. Art.23. DOI: 10.1007/s10723-025-09810-9.
- [10] **Orynbay L., Bekmanova G., Yergesh B., Omarbekova A., Sairanbekova A., Sharipbay A.** The role of cognitive computing in NLP. *Front. Comput. Sci.* 2025; 6:1486581. P.1-17. DOI: 10.3389/fcomp.2024.1486581
- [11] **Аверкин А.Н., Волков Е.Н., Ярушев С.А.** Большие языковые модели в гибридных интеллектуальных медицинских системах. *Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте (ИММВ-2024)*: сб. науч. трудов XII Междунар. науч.-практ. конф., Коломна, 14–17 мая 2024 г. В 2 т. Смоленск: Универсум, 2024. С.237–245. EDN: FQVOVD.
- [12] **Миловидова А.А.** Хрономодель процесса переработки в условиях нечёткой и неполной информации о качестве сырья. *Перспективы науки*. 2019. № 6(117). С.25–28. EDN: ZSTOUD.
- [13] **Зайцев Е. И., Нурматова Е. В.** О подходе к управлению знаниями и разработке мультиагентной системы представления и обработки знаний. *Russian Technological Journal*. 2023. Т.11, №4. С.16–25. DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-16-25. EDN: PKAAAX.
- [14] **Добрынин В.Н., Эндерев В.А., Миловидова А.А.** Многоагентное имитационно-событийное моделирование управления качеством дискретно-непрерывных технологических процессов: проблемы, концепция, задачи, методы. *Системный анализ в науке и образовании*. 2014. Вып.1. С.1–26.
- [15] **Halpin H.** Artificial intelligence versus collective intelligence. *AI Soc.* 2025. DOI: 10.1007/s00146-025-02240-x.
- [16] **Князева Е.Н.** Между временем и вечностью: С.П. Курдюмов о темпоральных свойствах сложных структур. *Труды Объединенного научного центра проблем космического мышления*. 2007. Вып.1. С.45–64.
- [17] **Lakoff G., Johnson M.** *Metaphors We Live By*. Chicago: University of Chicago Press, 2008. 242 p.
- [18] **Князева Е.Н.** Figures of Time in Evolution of Complex Systems. *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie*. 2005. Vol.36(2). P.289–304. DOI: 10.1007/s10838-005-9003-0.
- [19] **Еськов В.В., Филатова О.Е., Гудкова С.А., Джумагалиева Л.Б.** Насколько близко И.Р. Пригожин, Н. Накен и С.П. Курдюмов подошли к пониманию неизбежности ТХС? *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2013. №4, С.28-34.
- [20] **Wienkamp H.** Intelligence Research and Intelligence Models. In: *Creativity Diagnostics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2025. P.3-10. DOI: 10.1007/978-3-662-70432-5\_2.
- [21] **Orbik Z.** Husserl’s concept of transcendental consciousness and the problem of AI consciousness. *Phenom. Cogn. Sci.* 2024. Vol. 23. P.1151–1170. DOI: 10.1007/s11097-024-09993-8.
- [22] **Hegde K., Jayalath H.** Emotions in the Loop: A Survey of Affective Computing for Emotional Support // arXiv preprint. 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2505.01542>.
- [23] **Цветков В.Я., Курдюков Н.С.** Информационное онтологическое моделирование. *Russian Technological Journal*. 2025. Т.13, № 2. С.18–26. DOI: 10.32362/2500-316X-2025-13-2-18-26. EDN: PJVWFG.
- [24] **Osman N.** Value-Aware Multiagent Systems. *Coordination, Organizations, Institutions, Norms, and Ethics for Governance of Multi-Agent Systems XVII (COINE 2024)* / Eds. S. Cranefield, L. G. Nardin, N. Lloyd. Cham: Springer, 2025. Vol. 15398. P.33–46. DOI: 10.1007/978-3-031-82039-7\_3.
- [25] **Vorel R.** Autonomous Multiagent Systems. *NoOps*. Berkeley, CA: Apress, 2025. P.183-195. DOI: 10.1007/979-8-8688-1694-9\_10,

- [26] **Edelkamp S.** Multiagent Systems. *Algorithmic Intelligence*. Cham: Springer, 2023. P.297–308. DOI: 10.1007/978-3-319-65596-3\_16,
- [27] **Аверкин А.Н.** Объяснимый искусственный интеллект ХАИ 2.0: манифест открытых задач и междисциплинарных направлений. *Речевые технологии*. 2025. № 1. С.3-8.
- [28] **Аверкин А.Н., Волков Е.Н.** Объяснительный ИИ 2.0: концептуальные сдвиги и новые требования. *XXVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2025)*. Сборник докладов. Санкт-Петербург. 28 – 30 мая 2025 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С.215-218.
- 

## Сведения об авторах



**Аверкин Алексей Николаевич**, 1949 г. рождения. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1971 г., к.ф.-м.н. (1985). Доцент кафедры информатики Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, руководитель Центра искусственного интеллекта Государственного университета «Дубна». Член Научного совета Российской ассоциации ИИ (РАИИ), вице-президент Российской ассоциации нечётких систем и мягких вычислений. В списке научных трудов более 200 работ в области ИИ, нечётких систем и мягких вычислений. Author ID (РИНЦ): 1896; SPIN-код:

5787-6138; Author ID (Scopus): 57192557075; ORCID: 0000-0003-1571-3583; Researcher ID (WoS): L-6541-2013. [averkin2003@inbox.ru](mailto:averkin2003@inbox.ru).

**Добрынин Владимир Николаевич**, 1940 г. рождения. Окончил механико-математический факультет Харьковского государственного университета в 1965 г., к.т.н. (1984). Профессор кафедры системного анализа и управления Института системного анализа и управления Государственного университета «Дубна». В списке научных трудов около 90 работ. Author ID (РИНЦ): 541833; Author ID (Scopus): 56004991500. [arbatsolo@yandex.ru](mailto:arbatsolo@yandex.ru).



**Миловидова Анна Александровна**, 1987 г. рождения. Окончила магистратуру Международного университета природы, общества и человека «Дубна» в 2011 г., к.т.н. (2021). Доцент кафедры системного анализа и управления Института системного анализа и управления Государственного университета «Дубна», доцент кафедры цифровой трансформации Института информационных технологий МИРЭА – Российский технологический университет. Член РАИИ. В списке научных трудов более 50 работ в области имитационного моделирования, нечёткой логики, создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений. ORCID: 0000-0002-6646-4508; Author ID (РИНЦ): 1052443; Author ID (Scopus): 56509476100.

[milanna@uni-dubna.ru](mailto:milanna@uni-dubna.ru). ✉

---

Поступила в редакцию 15 декабря 2025 г., после рецензирования 18.02.2026. Принята к публикации 10.03.2026.

---



## Integration of control loops in the multilevel architecture of digital systems

© 2026, A.N. Averkin<sup>1</sup>, V.N. Dobrynin<sup>1</sup>, A.A. Milovidova<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Dubna State University, Dubna, Russia

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

### Abstract

Multilevel digital control systems are characterized by high structural complexity, dynamic behavior, and heterogeneous decision-making loops. Existing approaches demonstrate insufficient formalization of decision alignment across system levels under conditions of uncertainty. The aim of this study is to develop a formalized three-level control architecture based on cognitive-semantic integration. The study employs systems analysis, cognitive modeling, ontological design, and hybrid artificial intelligence technologies. An architectural model is proposed that integrates semantic, cognitive, and computational levels within a unified control loop, where the computational level is treated as a subordinate operational mechanism for implementing semantic and cognitive structures. It is demonstrated that the proposed architecture ensures alignment of managerial decisions, reduces conflicts between control levels, and improves system adaptability. The novelty of the study lies in the formalization of the principles of interlevel coordination and self-learning in multilevel control systems. The practical significance of the work is associated with the potential application of the proposed architecture in the development of intelligent platforms and decision-support systems.

**Keywords:** *cognitive architecture, cognitive-semantic integration, digital systems, control, adaptability, cognitive modeling.*

**For citation:** Averkin A.N., Dobrynin V.N., Milovidova A.A. Integration of control loops in the multilevel architecture of digital systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 189-203. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-189-203.

**Financial Support:** The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. 124112200072-2).

**Authors' contributions:** Averkin A.N. – development of the article structure and selection of source; Dobrynin V.N. – theoretical justification and preparation of examples; Milovidova A.A. – formulation of the research concept, development of methodology, analysis of results.

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

### List of figures and tables

Figure 1 – Hierarchical structure of the cognitive-semantic intelligent shell (CSIS)

Figure 2 – Architecture of functional modules and modes of cognitive dynamics in the CSIS

Table 1 – Generalized philosophical and technological framework of the triad

Table 2 – Mechanisms for supporting creativity within the CSIS

Table 3 – Matrix for the formation and development of creative abilities within the CSIS

Table 4 – Mechanisms of collective creativity and supporting technologies

Table 5 – Applications of the CSIS in various practices

### References

- [1] Young GO. Synthetic structure of industrial plastics (book style with paper title and editor). *Plastics*. 2nd ed. Vol.3 / Ed. J. Peters. New York: McGraw-Hill, 1964. P.15–64.
- [2] Vaccaro M, Almaatouq A, Malone T. When combinations of humans and AI are useful: A systematic review and meta-analysis. *Nat. Hum. Behav.* 2024; 8: 2293–2303. DOI: 10.1038/s41562-024-02024-1.

- [3] **Longo L. et al.** Explainable Artificial Intelligence (XAI) 2.0: A manifesto of open challenges and interdisciplinary research directions. *Information Fusion*. 2024; 106. DOI:10.1016/j.inffus.2024.102301.
- [4] **Dolgikh S.** The trap of presumed equivalence: Artificial General Intelligence should not be assessed on the scale of human intelligence. *Discov. Artif. Intell.* 2025; 5: 70. DOI: 10.1007/s44163-025-00317-6.
- [5] **Fayzullaeva IG.** The impact of artificial intelligence on human life [In Russian]. *Academic Research in Educational Sciences*. 2024; 5: 520-538.
- [6] **Gupta S, Modgil S, Bhattacharyya S, et al.** Artificial intelligence for decision support systems in the field of operations research: Review and future scope of research. *Ann. Oper. Res.* 2022; 308: 215–274. DOI: 10.1007/s10479-020-03856-6.
- [7] **Savin SV, Murzin AD.** Artificial intelligence-based decision support systems: Integration, adaptation, and performance evaluation [In Russian]. *Economics and Management*. 2024; 12: 1521-1534.
- [8] **Ao S-I, Hurwitz M, Palade V.** Cognitive computing and business intelligence applications in accounting, finance and management. *Big Data Cogn. Comput.* 2025; 9(3): 54. DOI: 10.3390/bdcc9030054.
- [9] **Kapetanidou IA, Nizamis A, Karanastasis E, et al.** Cognitive computing continuum: State-of-the-art review and ENACT vision & approach. *J. Grid Comput.* 2025; 23. Art. 23. DOI: 10.1007/s10723-025-09810-9.
- [10] **Orynbay L, Bekmanova G, Yergesh B, Omarbekova A, Sairanbekova A** and Sharipbay A (2025) The role of cognitive computing in NLP. *Front. Comput. Sci.* 6:1486581. doi: 10.3389/fcomp.2024.1486581, P. 1-17.
- [11] **Averkin AN, Volkov EN, Yarushev SA.** Large language models in hybrid intelligent medical systems [In Russian]. *Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence (IMMV-2024)*: Proc. 12th Int. Sci. and Pract. Conf., Kolomna, 14–17 May 2024. In 2 vols. Smolensk: Universum, 2024. P.237–245. EDN: FQVOVD.
- [12] **Milovidova AA.** Production Process Chronological Model in Conditions of Fuzzy and Incomplete Information about the Quality of Raw Materials [In Russian]. *Prospects of Science*. 2019; 6(117): 25–28. EDN: ZSTOUD.
- [13] **Zaitsev EI, Nurmatova EV.** Approach to knowledge management and the development of a multi-agent knowledge representation and processing system [In Russian]. *Russian Technological Journal*. 2023; 11(4): 16–25. DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-16-25. EDN: PKAAAX.
- [14] **Dobrynin VN, Enderev VA, Milovidova AA.** Multi-agent imitative event simulation of discrete and continuous technological processes quality management: problems, concept, tasks, methods [In Russian]. *System Analysis in Science and Education*. 2014; 1: 1–26.
- [15] **Halpin H.** Artificial intelligence versus collective intelligence. *AI Soc.* 2025. DOI: 10.1007/s00146-025-02240-x.
- [16] **Knyazeva EN.** Between time and eternity: S.P. Kurdyumov on the temporal properties of complex structures [In Russian]. *Proceedings of the Joint Scientific Center for Problems of Cosmic Thinking*. 2007; 1: 45–64.
- [17] **Lakoff G., Johnson M.** *Metaphors We Live By*. Chicago: University of Chicago Press, 2008: 242 p.
- [18] **Knyazeva H.** Figures of time in evolution of complex systems. *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie*. 2005; 36(2): 289–304. DOI: 10.1007/s10838-005-9003-0.
- [19] **Eskov VV, Filatova OE, Gudkova SA, Dzhumagalieva LB.** How close I.R. Prigogine, H. Hacken and S.P. Kurdyumov approached to understanding of inevitability of TCS? [In Russian]. *Complexity. Mind. Post-nonclassics*. 2013; 4: 28-34.
- [20] **Wienkamp H.** Intelligence research and intelligence models. *Creativity Diagnostics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2025. P.3-10. DOI: 10.1007/978-3-662-70432-5\_2.
- [21] **Orbik Z.** Husserl’s concept of transcendental consciousness and the problem of AI consciousness. *Phenom. Cogn. Sci.* 2024; 23: 1151–1170. DOI: 10.1007/s11097-024-09993-8.
- [22] **Hegde K, Jayalath H.** Emotions in the loop: A survey of affective computing for emotional support // arXiv preprint. 2025. [Online]. <https://arxiv.org/abs/2505.01542>.
- [23] **Tsvetkov VYa, Kurdyukov NS.** Information ontological modeling [In Russian]. *Russian Technological Journal*. 2025; 13(2): 18–26. DOI: 10.32362/2500-316X-2025-13-2-18-26. EDN: PJVWFG.
- [24] **Osman N.** Value-aware multiagent systems. *Coordination, Organizations, Institutions, Norms, and Ethics for Governance of Multi-Agent Systems XVII (COINE 2024)* / Eds. S. Cranefield, L.G. Nardin, N. Lloyd. Cham: Springer, 2025; 15398: 33–46. DOI: 10.1007/978-3-031-82039-7\_3.
- [25] **Vorel R.** Autonomous multiagent systems. *NoOps*. Berkeley, CA: Apress, 2025. P.183-195. DOI: 10.1007/979-8-8688-1694-9\_10.
- [26] **Edelkamp S.** Multiagent systems. *Algorithmic Intelligence*. Cham: Springer, 2023. P.297–308. DOI: 10.1007/978-3-319-65596-3\_16.
- [27] **Averkin AN.** Explicable artificial intelligence XAI 2.0: a manifesto of open tasks and interdisciplinary directions [In Russian]. *Speech technology*. 2025; 1: 3-8.
- [28] **Averkin AN, Volkov EN.** Explanatory AI 2.0: conceptual shifts and new requirements [In Russian]. *XXVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM-2025)*. Collection of reports. St. Petersburg. May 28 – 30, 2025. St. Petersburg: St. Petersburg State Technical University "LETI". P.215-218.

## About the authors

**Alexey Nikolaevich Averkin** (b. 1949) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1971, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (1985). He is an Associate Professor at the Department of Informatics of Plekhanov Russian University of Economics, a Leading Researcher at the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, and Head of the Artificial Intelligence Center at Dubna State University. He is a member of the Scientific Council of the Russian Association for Artificial Intelligence and Vice-President of the Russian Association of Fuzzy Systems and Soft Computing. He is the author and a co-author of more than 200 publications in the fields of artificial intelligence, fuzzy systems, and soft computing. Author ID (RSCI): 1896; SPIN code: 5787-6138; Author ID (Scopus): 57192557075; ORCID: 0000-0003-1571-3583; Researcher ID (WoS): L-6541-2013. [averkin2003@inbox.ru](mailto:averkin2003@inbox.ru)

**Vladimir Nikolaevich Dobrynin** (b. 1940) graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of Kharkov State University in 1965, Candidate of Technical Sciences (1984). He is a Professor at the Department of Systems Analysis and Control of the Institute of Systems Analysis and Management at Dubna State University. He is the author and a co-author of about 90 scientific publications. Author ID (RSCI): 541833; Author ID (Scopus): 56004991500. [arbatso-lo@yandex.ru](mailto:arbatso-lo@yandex.ru).

**Anna Aleksandrovna Milovidova** (b. 1987) graduated from the International University of Nature, Society and Man "Dubna" with a Master's degree in 2011, Candidate of Technical Sciences (2021). She is an Associate Professor at the Department of Systems Analysis and Control of the Institute of Systems Analysis and Management at Dubna State University, and an Associate Professor at the Department of Digital Transformation of the Institute of Information Technologies at MIREA – Russian Technological University. She is a member of the Russian Association for Artificial Intelligence. She is the author and a co-author of more than 50 publications in the fields of simulation modeling, fuzzy logic, and the development of intelligent decision support systems. ORCID: 0000-0002-6646-4508; Author ID (RSCI): 1052443; Author ID (Scopus): 56509476100. [milanna@uni-dubna.ru](mailto:milanna@uni-dubna.ru) ✉.

---

*Received December 15, 2025. Revised February 18, 2026. Accepted March 10, 2026.*

---



## Формализация понятий «диагностическая ситуация» и «диагностическая деятельность»

© 2026, В.В. Воронин

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

### Аннотация

Предметом исследования являются основные элементы понятийного аппарата технической диагностики в контексте их использования в концептуальной диагностической модели. Предлагаются онтологические определения для ключевых категорий диагностическая ситуация и диагностическая деятельность. Диагностическая ситуация определяется как структурированный набор фактов и условий, позволяющий оценить состояние объекта в конкретных условиях. Диагностическая деятельность формализуется как процесс устранения неопределённости в техническом состоянии объекта. Основным научным результатом – разработка начального фрагмента концептуальной диагностической модели на основе фреймового описания. Модель объединяет статический контекст ситуации (объект, субъект, надсистема) и процедурную составляющую деятельности (контроль, поиск дефектов, прогнозирование) в единую формальную структуру. Практическое значение исследования состоит в том, что предложенная формализация создаёт концептуальный каркас для построения алгоритмов работы интеллектуальных диагностических систем. Приведены примеры применения понятий диагностическая ситуация и диагностическая деятельность в описании технического состояния двигателя внутреннего сгорания.

**Ключевые слова:** объект диагностирования, техническое состояние, субъект диагностической деятельности, диагностическая ситуация, диагностическая деятельность, фреймы, концептуальная диагностическая модель.

**Цитирование:** Воронин В.В. Формализация понятий «диагностическая ситуация» и «диагностическая деятельность». *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.204-212. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-204-212.

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

### Введение

В любой определённой деятельности анализ сложившейся ситуации должен предшествовать принятию решения о последующих действиях [1]. Современная техническая диагностика, составляющая информационную основу обеспечения надёжности сложных систем, нуждается в чётком разграничении и формализации базовых понятий. Ключевыми из них являются понятие диагностическая ситуация (ДС) как структурированное описание технического состояния (ТС) объекта и соответствующего контекста, и диагностическая деятельность (ДД), как процесс целеполагания, анализа и принятия решений по оценке ТС. Декларативное описание ДС задаёт контекст, в котором будет реализована процедурная составляющая этой ДС. Оценив существенные особенности предметной области, специалист получает необходимые данные, ограничивает множество возможных методов и инструментальных средств, а также определяет границы интерпретации экспериментальных результатов [2].

Отсутствие формализованной модели, устанавливающей отношения между контекстом (ДС) и алгоритмом действий (ДД), создаёт барьер для создания диагностических экспертных систем (ДЭС). В ДЭС важно наличие концептуальной диагностической модели (КДМ), способной объединить все элементы комплекса знаний, которые используются экспертами в практических задачах.

В работах по медицинской диагностике (см. например, в [3]) и диагностированию технических систем (см. например, [4]) используются онтологии для описания ДС и ДД.

Настоящая статья посвящена разработке формализованных дефиниций понятий ДС и ДД с целью их включения в концептуальное ядро ДЭС. В настоящем исследовании и в ряде предшествующих работ автора (например, [5, 6]), в качестве базовой применена методология [7], включающая последовательность этапов: систематизация, формализация, автоматизация.

## 1 Формализация начальной части концептуальной диагностической модели

Для развития ДЭС необходима адекватная формализация экспертного опыта, которая выходит за рамки логических правил и находится в области взаимоотношения понятий ДС и ДД. ДЭС включает три элемента: сертифицированный субъект эксплуатационной деятельности (СЭД); допустимые внешние условия эксплуатации объекта диагностирования (ОД); допустимые внутренние состояния ОД. Последний элемент – это допустимое ТС, оценку допустимости которого предстоит получить субъекту ДД (СДД). Описание этих элементов представляет собой сущность, которую предлагается характеризовать понятием ДС.

ДС – это структурированный набор наблюдаемых или мыслимых фактов и условий, который даёт возможность оценить текущее ТС ОД в данных корпоративных условиях и принять решение о дальнейших возможных действиях (продолжение эксплуатации, техническое обслуживание, ремонт, реновация и др.).

Под корпоративными условиями понимается совокупность внутренних и внешних факторов, условий и регламентов, сложившихся в рамках конкретного предприятия (например, многообразие видов ОД, сложность и количество экземпляров каждого вида ОД, принятая система технического обслуживания (СТО), перечень технических средств диагностирования, квалификация персонала и др.).

В конкретной ДС участвует конкретный экземпляр ОД. Этот экземпляр является носителем текущего ТС, которое в процессе ДД предстоит определить.

В качестве примера типовой схемы описания ДС можно привести следующую последовательность. Фиксация СЭД внешних органолептических диагностических показателей; интуитивное сопоставление их текущих значений с допустимыми пределами; выявление отклонений или их отсутствие (например, температура выше нормы или в пределах нормы); формирование СЭД сообщения для СДД о возможных аномалиях; совместный (СЭД и СДД) анализ контекста – учёт предыстории и внешних факторов; формулировка СДД предварительных гипотез о возможных причинах и локализациях неисправностей в пределах заданной глубины поиска.

*Пример* ДС двигателя внутреннего сгорания легкового автомобиля. При запуске холодного двигателя на приборной панели автомобиля загорается лампочка «Контроль двигателя». ОД в данном случае можно считать систему управления двигателем. СЭД является автовладелец. СДД (автомеханик) подключает сканер к бортовому компьютеру автомобиля и определяет код ошибки (например, P0420 – неэффективность системы каталитического нейтрализатора). Полученный код указывает на возможную причину: неисправность или старение катализатора, отказ одного из кислородных датчиков или проблемы в системе выпуска отработавших газов. Эта ДС обуславливает дальнейшие проверки конкретных узлов, на которые указал код ошибки. Таким образом, имеется структурированный процесс перехода от внешнего признака ТС к его технической причине с помощью определённых инструментов и знаний.

ДД на этапе эксплуатации – это мыслительная, органолептическая или инструментальная активность СДД по устранению неопределённости относительно вида текущего ТС данного экземпляра ОД и оценки перспектив изменения этого состояния с целью обоснования возможности использования технической системы по назначению. Поскольку ДС представляет собой объективную данность, которая выступает причиной и предметом ДД, постольку понятия ДС и ДД предлагается положить в основу КДМ на начальном этапе её построения.

Для формализации концептуальных моделей используются различные нотации и инструментальные средства. Например, в [3] – это редактор онтологий. При использовании фреймовой нотации для описания КДМ начальным фреймом является ДС. ДС – это объективно существующее состояние независимо от того, приступил ли СДД к его осмыслению. Неисправность возникает и развивается до и вне ДД.

Начальным фреймом КДМ выбран **Фрейм ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ\_СИТУАЦИЯ( $t$ )** с параметром текущего времени и с четырьмя слотами. Параметр  $t$  предназначен для фиксации моментов возникновения нештатных ситуаций в процессе эксплуатации каждого экземпляра ОД, учёта предыстории технических воздействий на указанные экземпляры в рамках их деградационного представления, а также для регистрации положительных и отрицательных случаев, характеризующих профессиональную пригодность различных СЭД.

	<b>Фрейм ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ_СИТУАЦИЯ(<math>t</math>):</b>	(1)
ОД	(Фрейм ТЕХНИЧЕСКАЯ_СИСТЕМА);	
Субъект	(Фрейм СДД);	
Надсистема	(Фрейм ЭСр, Фрейм СЭД, Фрейм СТО);	
Технология	(Фрейм ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ_ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ).	

Слоты *ОД*, *Субъект*, *Надсистема* моделируют предметную область (декларативное описание), а слот *Технология* – проблемную область (процедурное описание). Сущность слота *ОД* в фрейме (1) очевидна, а именно: ДС всегда объективно обусловлена текущим ТС ОД в некотором контексте.

ДЭС и их КДМ проектируются и предназначаются не для одного конечного пользователя, а являются инструментальным средством коллективного пользования в рамках определённой корпоративной системы (КС). Поэтому в декларативную часть КДМ необходимо включить множество СДД (*Субъект*), характеризую их идентификационные и профессиональные сведения, а также накапливать информацию о результатах их ДД (например, об ошибках первого и второго родов – «ложная тревога» и «пропуск неисправности»).

Характеризуя сущность и состав слота *Надсистема*, необходимо отметить следующее. ДД реализуется в рамках системы диагностирования (СД). Целью данной СД является оценка ТС ОД и определение возможности его дальнейшей эксплуатации. СД организационно и функционально входит в СТО, задачей которой является поддержание и обеспечение требуемого уровня надёжности ОД. СТО является частью КС, обеспечивающей бизнес-процессы с использованием данного ОД. Перечисленные системы находятся в иерархических отношениях (см. рисунок 1). СД занимает позицию системы третьего уровня в общей корпоративной иерархии: КС → СТО → СД. Представителем первого уровня в слот *Надсистема* фрейма (1) включён СЭД соответствующим фреймом (**Фрейм СЭД**), а СТО представляет здесь второй уровень иерархии (**Фрейм СТО**). В описание надсистемы включена эксплуатационная среда (ЭС) (**Фрейм ЭС**). Таким образом, ЭС и СЭД, как объективная и субъективная составляющие, предназначаются для описания особенностей ДС в отношении надсистемы первого уровня иерархии.

Учитывая то, что ДС является первичной для ДД, в содержательную часть слота *Технология* включён **Фрейм ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ\_ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ**.

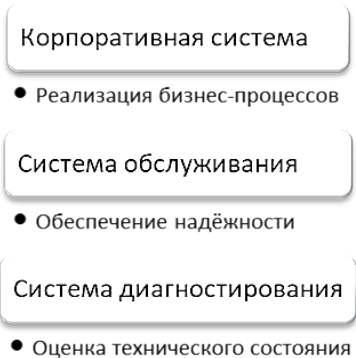


Рисунок 1 – Корпоративная иерархия систем

## 2 Формализация понятия диагностическая деятельность

Процесс эксплуатации большинства технических систем происходит циклически (существуют также непрерывные процессы – например, непрерывное производство или автономные объекты [4]). Цикличность включает два вложенных цикла – эксплуатационный (периодическая последовательность рабочих смен) и обслуживающий (регламентное техническое обслуживание либо внеплановый ремонт), переключение между которыми осуществляется по результатам периодической оценки ТС. Положительный результат оценки активирует очередной эксплуатационный цикл, а отрицательный – обслуживающий цикл.

Оценка ТС входит составной частью в ДД и её принято называть задачей контроля ТС (КТС). В комплекс задач ДД включаются также задачи: поиск дефектов (ПД) – обнаружение дефектов и установление их причин; прогнозирование ТС (ПТС).

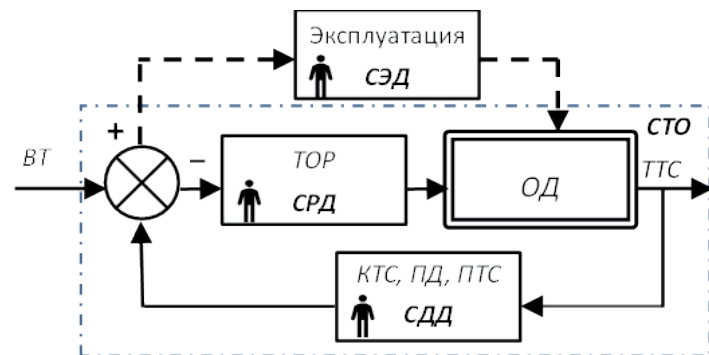
Особенность цикличности диагностических задач на этапе эксплуатации заключается в том, что они решаются регулярно, в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, а также при возникновении сбоев, неисправностей и отказов.

Задача КТС в зависимости от условий использования ОД по назначению в пределах каждого возможного варианта обслуживающего цикла реализуется с учётом требований безопасности, функциональности, эффективности или в любом их сочетании (внешние требования). Задача ПТС также многовариантна (например, прогнозы остаточного ресурса, безопасного состояния, нарушения функциональности, степени эффективности или их сочетания).

Обслуживающий цикл в явном виде не содержит СЭД, но знания о поведении ОД в момент утраты им, например, функциональности или информация о показаниях встроенных средств диагностирования важны для СДД в будущих экземплярах цикла. В субъектный контекст ДД следует также включить субъекта по техническому обслуживанию и ремонту. Этот субъект организационно относится к СТО и включён в *Фрейм СТО*.

Схема взаимоотношений основных субъектов деятельности в рамках эксплуатационного и обслуживающего циклов приведена на рисунке 2.

Количественные оценки диагностических показателей образуют информационную базу для принятия решений СДД, а его решения в форме «текущий вид ТС или прогноз этого вида» в обслуживающем цикле образуют основу задания для субъекта по техническому обслуживанию и ремонту на определённые технические воздействия, а для СЭД – на планирование очередного эксплуатационного цикла.



ВТ - внешние требования; ТТС - текущее ТС; СЭД - субъект эксплуатационной деятельности; СРД - субъект по техническому обслуживанию и ремонту; СДД - субъект диагностической деятельности; КТС - контроль ТС; ПД - поиск дефектов; ПТС - прогнозирование ТС; СТО - система технического обслуживания; ТОР - техническое обслуживание и ремонт.

Рисунок 2 – Схема циклического взаимоотношения субъектов на этапе эксплуатации технической системы

Начальным элементом каждого цикла считается задача КТС. В [8] термин КТС определяется как проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов ТС в данный момент времени.

Классификация видов ТС для определённого объекта не является строго регламентированной, за исключением двух очевидных видов – нормальный и аномальный виды ТС, сущ-

ность которых определяется возможностью и невозможностью использования объекта по назначению. Эти виды образуют верхний уровень иерархии в классификации. Количество и сущность других подвидов ТС в области «возможности» зависит от особенностей данной КС (организации её службы эксплуатации), а в области «невозможности» – от особенностей её СТО. В области аномальности выделяют следующие виды ТС: неисправное, неработоспособное, критическое и т.п.. В [9] предлагается это делать по критерию существующей корпоративной специфики ремонтных бригад в СТО. В данной работе предлагается выделять ряд видов в области нормальности ТС, а в качестве критерия использовать уровни допустимости (количественные или качественные ограничения) на возможность использования ОД по назначению по критериям: безопасность, функциональность, экономичность.

*Пример нормального вида ТС.* Заключение по результатам контроля ТС автомобиля Toyota Camry.

На основании анализа данных, полученных в ходе компьютерной диагностики, визуального осмотра и инструментальных замеров ТС автомобиля признано *нормальным*, но с ограничением по экономичности. Транспортное средство соответствует критериям безопасной эксплуатации, все системы функционируют в штатном режиме, однако зафиксировано устойчивое превышение нормируемого расхода топлива (средний расход топлива при смешанном цикле – 9.8 л/100 км; по паспорту – 8.2 л/100 км; отклонение+19.5%)

*Нормальное ТС:* коды неисправностей отсутствуют, двигатель запускается устойчиво, динамические характеристики соответствуют ожидаемым, состав отработавших газов в допустимых пределах. Это исключает наличие критических неисправностей.

*Отклонение по экономичности:* повышенный расход топлива свидетельствует о хроническом обеднении топливовоздушной смеси. Наиболее вероятные причины: загрязнение элементов системы впуска; снижение производительности топливных форсунок; неоптимальное состояние воздушного фильтра; падение компрессии в цилиндрах в пределах допуска. Рекомендованы сервисные операции по восстановлению экономичности двигателя: очистка дроссельной заслонки, замена воздушного фильтра, проверка/очистка топливных форсунок. Контроль расхода топлива после проведения обслуживания. Следующий плановый диагностический контроль установить через 15 000 км.

Отклонения должны быть прописаны в заключительном диагнозе. Перечню допустимых эксплуатационных отклонений в данной КС предлагается ставить в соответствие множество видов нормального ТС с отклонениями. Подобные уровни отклонений можно использовать и для области аномальности ТС. Однако недопустимый вид ТС влечёт ремонтное, регулировочное или другое воздействие в рамках СТО.

КТС – это первая часть процесса диагностирования, предназначенная для определения принадлежности текущего ТС  $S(t)$  к множеству нормальных видов состояний ОД  $S(t) \in \{S_n(i)\}$  либо к множеству аномальных видов состояния  $S(t) \in \{S_a(j)\}$  из множества  $S$  его возможных состояний  $S = \{\{S_n(i)\}, \{S_a(j)\}\}, i=1, n, j=1, m$ .

Все возможные варианты отнесения текущего ТС к областям нормальности и аномальности моделируются посредством логической операции сложения по модулю 2. Результаты моделирования представлены в таблице 1. Варианты одновременной принадлежности и непринадлежности являются недопустимыми.

Если истинно  $S(t) \in \{S_n(i)\}$ , то дальнейшая фиксация  $S(t)$  должна быть выполнена службой эксплуатации КС, а если истинно  $S(t) \in \{S_a(j)\}$ , то дальнейшая фиксация  $S(t)$  выполняется в СТО в рамках задачи поиска дефектов.

В задаче поиска дефектов (вторая часть процесса диагностирования) происходит локализация состояния  $S(t)$  до заданной глубины поиска и результат отождествляется с определённым дефектом или с подмножеством множества возможных дефектов.

Третья часть – это ПТС. Его целью является либо определение  $T[S_n(i) \setminus p]$  – интервала времени  $T$ , в течение которого сохранится состояние  $S_n(i)$  с заданной вероятностью  $p$  (или

Таблица 1 – Возможные варианты отнесения текущего технического состояния к областям нормальности и аномальности

$S(t) \in \{S_n(i)\}$	$S(t) \in \{S_a(j)\}$	$S(t) \in \{S_n(i)\} \oplus S(t) \in \{S_a(j)\}$
.F.	.F.	.F.
.F.	.T.	.T.
.T.	.F.	.T.
.T.	.T.	.F.

вероятности  $p[S_n(i)\backslash T]$  сохранения состояния  $S_n(i)$  объекта на заданный интервал времени  $T$ , либо определение  $T[S_a(j)\backslash p]$  – интервала времени  $T$ , в течение которого сохранится состояние  $S_a(j)$  с заданной вероятностью  $p$ .

При положительном исходе КТС прогнозируется текущий вид нормального ТС  $S_n(i)$ , а при отрицательном исходе (анормальный текущий вид ТС) после оценки в цикле качества выполненного технического воздействия прогнозируется вид анормального ТС  $S_a(j)$ . Разница горизонтов прогнозирования  $T[S_n(i)\backslash p]$  –  $T[S_a(j)\backslash p]$  даёт СЭД дополнительную информацию для принятия управленческих решений в текущем эксплуатационном цикле [10].

Принимая во внимание свойство цикличности эксплуатационного процесса ОД, множества нормальных и анормальных видов ТС и возможные исходы в задаче КТС, можно формализовать понятие ДД в виде следующего фрейма.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Фрейм } \text{ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ\_ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ}(Y, X, Ps) : & (2) \\
 \text{Контроль\_ТС} & (\text{Фрейм } \text{КОНТРОЛЬ\_}S_n(X, Y, Ps), \text{ IF}(Ps), \\
 & \text{Фрейм } \text{ПОИСК\_}S_a(X, Y)); \\
 \text{Прогноз\_ТС} & (\text{Фрейм } \text{ПРОГНОЗ\_}S_n(X, Y), \text{ IF}(Ps), \\
 & \text{Фрейм } \text{ПРОГНОЗ\_}S_a(X, Y)); \\
 \text{Текущее\_ТС} & (\text{ЗАПРОС\_INSERT(ДИАГНОЗ\_КАРТА, Z)); \\
 \text{Цикл} & (\text{Фрейм } \text{ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ\_ЗАДАЧИ}(Y, X, Ps)); \\
 \text{Техн\_состояние} & (\text{Фрейм } \text{ДИАГНОЗ}(Y, X, t, Res)).
 \end{array}$$

В фреймовой модели цикл можно организовать с помощью рекурсии. В данном случае предлагается *Фрейм ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ\_ЗАДАЧИ*( $Y, X, Ps$ ) вызывать внутри самого себя, при этом он передаёт управление самому себе и выполняет определённые действия текущей итерации. Последовательность действий в рамках каждой итерации определяется логикой решения текущей диагностической задачи и значением переменной  $Ps \in \{true, false, null\}$ . Управление выходом из цикла осуществляется посредством этой логической переменной. В начальный момент рекурсии ей присваивается значение *true*; в процессе выполнения текущей итерации СЭД с использованием интерфейсного приложения ДЭС принимает решение о завершении процесса, что формально фиксируется установкой  $Ps=null$ .

В (2) переменные  $Y, X$  используются как входные параметры с идентификационными номерами соответственно СДД и ОД. В результате каждой итерации в текущую диагностическую карту функцией *ЗАПРОС\_INSERT(ДИАГНОЗ\_КАРТА, Z)* заносится соответствующая запись. Здесь параметр  $Z$  – это идентификационный номер текущей записи диагностической карты. После выхода из рекурсии окончательный вариант диагностической карты (её номер  $Res$ ) сохраняется в цифровой истории данного ОД.

Формализация понятия ДД в виде фрейма (2) обеспечивает её системное, структурированное и алгоритмически интерпретируемое представление. Данная модель явно выделяет ключевые процедуры (контроль, поиск, прогноз) и устанавливает между ними формальные отношения, определяемые условиями предикатов  $IF(Ps)$ . Введение слота *Цикл* отражает итеративную природу диагностического процесса, а функция *ДИАГНОЗ\_КАРТА* обеспечивает связь с конкретными данными и результатами. Предложенная формализация устраняет терминологическую неоднозначность, создавая строгий концептуальный каркас для последующей алгоритмической реализации КДМ.

## Заключение

Проведённое исследование позволило решить поставленную задачу, а именно:

- чётко разграничить и формализовать понятия технической диагностики – ДС и ДД;
- построить начальный фрагмент КДМ в виде взаимосвязанных фреймов (1) и (2);

- сформулировать общий подход к классификации видов ТС с учётом корпоративных условий.

Полученные результаты имеют ограничения, связанные с необходимостью экспертной настройки модели в отношении различных классов технических систем как ОД и со сложностью автоматической классификации видов ТС из-за пересечения их областей определения.

В методологии онтологического проектирования распространённой практикой является проведение ретроспективного анализа [11, 12], подразумевающего возврат к ранним этапам разработки для формализации и обоснования решений, принятых ранее. Фреймы (1) и (2) представляют собой более совершенный результат в сравнении с [5, 6].

## Список источников

- [1] **Рубашкин В.Ш.** Онтологическая семантика. Знания. Онтологии. Онтологически ориентированные методы анализа текстов. М.: Физматлит, 2012. 348 с.
- [2] **Загоруйко Ю.А.** Семантическая технология разработки интеллектуальных систем, ориентированная на экспертов предметной области. *Онтология проектирования*. 2015. Т.5. №1(15). С.30-46.
- [3] **Грибова В.В., Шалфеева Е.А., Окунь Д.Б., Шевченко О.Н.** Онтологический комплекс представления знаний для реабилитации травматолого-ортопедических пациентов. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С. 509-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-509-522.
- [4] **Тимошенко А.А., Зуев А.В., Мурсаимов Э.Ш., Грибова В.В., Инзарцев А.В.** Описание и диагностирование неисправностей в автономных необитаемых подводных аппаратах на основе онтологий. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12. № 3(45). С.310-324. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-3-310-324.
- [5] **Воронин В.В.** Субъект эксплуатационной деятельности в концептуальной диагностической модели. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2023. № 1(68). С.39-46.
- [6] **Воронин В.В.** Систематизация и формализация базовых понятий технической диагностики. *Информатика и системы управления*. 2024. №1(79). С.60-71. DOI: 10.22250/18142400\_2024\_79\_1\_60.
- [7] **Микони С.В.** Улучшение познавательной функции понятий технической диагностики с применением системного подхода и собственных свойств модели. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, № 2(36). С.163-175. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-2-163-175.
- [8] ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. 11 с.
- [9] **Воронин В.В.** Виды технического состояния в прагматическом аспекте. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2022. № 1(64). С.29-38.
- [10] **Китаев М.В., Суков О.Э., Кулеш В.А., Новосельцев И.А.** Прогнозирование технического состояния ледового пояса судов в эксплуатации. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2025; 1(411): 63–70.
- [11] **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2015. №1(162). С.8–18.
- [12] **Курашов В.И., Курашов Я.В.** Динамика взаимодействия естествознания и техники в истории развития научно-технического знания: философско-методологический анализ. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Философия*. 2023. Т.5. №3. С.61-74. DOI: 10.17673/vsgtu-phil.2023.3.6.

## Сведения об авторе

**Воронин Владимир Викторович**, 1957 г. рождения. Окончил Хабаровский политехнический институт в 1980 г., д.т.н. (2007). Профессор высшей школы кибернетики и цифровых технологий Тихоокеанского государственного университета. В списке научных трудов более 250 работ в области технической диагностики и интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Author ID (РИНЦ): 783008; Author ID (Scopus): 57202476262; Researcher ID (WoS): ACR-9830-2022. 004183vvv@mail.ru.



Поступила в редакцию 15.01.2026, после рецензирования 30.03.2026. Принята к публикации 30.04.2026.



## Formalization of the concepts of diagnostic situation and diagnostic activity

© 2026, V.V. Voronin

*Pacific National University, Khabarovsk, Russia*

### Abstract

The subject of the research is the basic elements of the conceptual framework of technical diagnostics in the context of their use in a conceptual diagnostic model. Ontological definitions are proposed for the key categories of “diagnostic situation” and “diagnostic activity”. A diagnostic situation is defined as a structured set of facts and conditions that makes it possible to assess the state of an object under specific conditions. A diagnostic activity is formalized as a process of reducing uncertainty regarding the technical condition of the object. The main scientific result of the study is the development of an initial fragment of a conceptual diagnostic model based on a frame representation. The model integrates the static context of a situation (object, subject, supersystem) and the procedural component of activity (control monitoring, defect detection, forecasting) into a unified formal structure. The practical significance of the work lies in the fact that the proposed formalization creates a conceptual framework for the development of algorithms for intelligent diagnostic systems. Examples are provided of the application of the concepts of diagnostic situation and diagnostic activity in describing the technical condition of an internal combustion engine.

**Keywords:** *diagnostic object, technical condition, subject of diagnostic activity, diagnostic situation, diagnostic activity, frames, conceptual diagnostic model.*

**For citation:** *Voronin V.V. Formalization of the concepts of diagnostic situation and diagnostic activity [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 204-212. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-204-212.*

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

### List of figures and table

Figure 1 – Corporate hierarchy of systems

Figure 2 – Scheme of the cyclic interaction of subjects at the operational stage of a technical system

Table 1 – Possible variants of assigning the current technical condition to the domains of normality and abnormality

### References

- [1] **Rubashkin VSh.** Ontological Semantics. Knowledge. Ontologies. Ontologically oriented methods of text analysis [In Russian]. Moscow: Fizmatlit, 2012. 348 p.
- [2] **Zagorul'ko YuA.** Semantic technology for development of intelligent systems oriented to experts in subject domain [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2015; 5(1): 30-46.
- [3] **Gribova VV, SHalfeeva EA, Okun' DB, SHEvchenko ON.** Ontological knowledge representation framework for rehabilitation of traumatology and orthopedic patients [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2025; 15(4): 509-522. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-509-522.
- [4] **Timoshenko AA, Zuev AV, Mursalimov ESh, Gribova VV, Inzartsev AV.** Description and diagnosis of malfunctions in autonomous uninhabited underwater vehicles based on ontologies [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2022; 12(3): 310-324. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-3-310-324.
- [5] **Voronin VV.** The subject of operational activities in the conceptual diagnostic model [In Russian]. *Bulletin of the Pacific State University*. 2023; 1(68): 39-46.
- [6] **Voronin VV.** Systematization and formalization of basic concepts of technical diagnostics [In Russian]. *Computer science and management systems*. 2024; 1(79): 60-71. DOI: 10.22250/18142400\_2024\_79\_1\_60.
- [7] **Mikoni SV.** Improving the cognitive function of the concepts of technical diagnostics using the system approach and the model's own properties [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2020; 10(2): 163-175. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-2-163-175.
- [8] GOST 20911–89. Technical Diagnostics. Terms and Definitions [In Russian]. Moscow, 2009. 11 p.

- [9] **Voronin VV**. Types of technical condition in a pragmatic aspect [In Russian]. *Bulletin of the Pacific State University*. 2022; 1(64): 29-38.
- [10] **Kitaev MV, Surov OE, Kulesh VA, Novosel'tsev IA**. Forecasting the technical condition of the ice belt of ships in service [In Russian]. *Proceedings of the Krylov State Research Center*. 2025; 1(411): 63–70.
- [11] **Okhtilev MYu, Sokolov BV, YUsupov RM**. Theoretical and technological foundations of the concept of proactive monitoring and management of complex objects [In Russian]. *Izvestiya of the Southern Federal University. Technical Sciences*. 2015; 1(162): 8–18.
- [12] **Kurashov VI, Kurashov YaV**. Dynamics of Interaction of Natural Science and Technology in the History of the Development of Scientific and Technical Knowledge: Philosophical and Methodological Analysis [In Russian] *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Philosophy*. 2023; 5(3): 61-74. DOI: 10.17673/vsgtu-phil.2023.3.6.
- 

### About the author

**Vladimir Viktorovich Voronin** (b. 1957) graduated from Khabarovsk Polytechnic Institute in 1980, Doctor of Technical Sciences (2007). Professor at the Higher School of Cybernetics and Digital Technologies of Pacific State University. The list of scientific papers includes more than 250 works in the fields of technical diagnostics and intelligent decision support systems. Author ID (RSCI): 783008; Author ID (Scopus): 57202476262; Researcher ID (WoS): ACR-9830-2022. 004183vv@mail.ru.

---

*Received January 15, 2026. Revised March 30, 2026. Accepted April 30, 2026.*

---



## К онтологии преобразований информации

© 2026, В.Н. Волкова<sup>1</sup> ✉, А.В. Логинова<sup>1</sup>, Е.В. Романова<sup>2</sup>, Ю.Ю. Черный<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия.

<sup>3</sup> Институт научной информации по общественным наукам РАН (ИНИОН РАН), Москва, Россия.

### Аннотация

В статье с позиции онтологии рассматриваются фундаментальные принципы, сущностные формы, свойства информации как категории парной материи. Приводится анализ процесса чувственного познания (отражение, восприятие, представление), проблемы преобразования представления в понятие и последующих этапов рационального (логического) познания с точки зрения философии и психологии. Предлагается модель преобразования «данные – информационный потенциал – знание» и трактовка роли информации в переходных процессах. Для понимания процессов отражения, восприятия и представления информационного пространства, перехода от чувственного восприятия к логическому и их взаимосвязи применены формализованные представления на основе теории информационного поля А.А. Денисова, в которой вводятся понятия чувственной и логической информации. Предлагается модель пространства для преобразования чувственно воспринятой информации в информационный потенциал для принятия решений, основанная на применении формализованного представления законов диалектической логики. В исследовании сделана попытка расширить понимание информации как инструмента познания и преобразования данных в информационный потенциал и знания.

**Ключевые слова:** информация, онтология, восприятие, информационное пространство, отражение, представление, чувственная информация.

**Цитирование:** Волкова В.Н., Логинова А.В., Романова Е.В., Черный Ю.Ю. К онтологии преобразований информации. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.213-225. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-213-225.

**Вклад авторов:** Волкова В.Н. – анализ понятия информации; Логинова А.В. – анализ исследований процесса отражения и восприятия материальных объектов; Романова Е.В. – трактовка роли информации в переходных процессах; Черный Ю.Ю. – исследование понятия информации с точки зрения философских представлений.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Введение

Существует много определений понятия «информация» (см. например, [1-4]). Так, в [1, с.311]: «Информация (от лат. *informatio* – разъяснение, изложение) – осведомление, сообщение о каком-либо событии, о чьей-либо деятельности и т.д. ... Жанры информации разнообразны – заметки, корреспонденции, хроника, интервью, отчёты ... и т.д.». В стандартах по информационным системам, защите информации, искусственному интеллекту и др. приводятся определения этого термина с учётом задач этих документов.

Впервые разницу между познанием, разумом и чувствами оценил Парменид. Его онтологическая концепция: «Всё, что ты видишь, слышишь и ощущаешь — это обман. Настоящее бытие — вечно, неподвижно и едино» [5].

В древнегреческой философии для названия того, что означает «конкретную явленность, данную визуально», использовалось понятие «эйдос», которое первоначально обозначало «видимое», «то, что видно», но постепенно получило более глубокий смысл – «конкретная

явленность абстрактного». В поздней философии эйдос – это категориальная структура, интерпретирующая исходную семантику какого-либо понятия [6]. В настоящее время понятие эйдос трактуется как информационная матрица [7]. Ещё Аристотель обосновал единство содержания и формы (*In-form*, т.е. в форме, фактически корень слова «информация») [8], но термин «информация» в то время не возник.

При появлении возможности долговременного сохранения воспринятого и понятого (мыслей) вводится понятие «документоведение», «документация» [9].

Термины – *эйдос, идея, форма, мысль, документация* и т.п. – вводились, видимо, для того, чтобы понять нечто, сопутствующее материи. Термин «информация» получил распространение после выхода книг Н. Винера, который считал, что «*Информация – это не материя и не энергия*» [10], и К. Шеннона [11], который понимал под термином «информация» нечто фундаментальное, и полагал, что *информация имеет содержание*.

В [12] понятие информации определено как *объективное содержание связи между взаимодействующими материальными объектами, проявляющееся в изменении состояний этих объектов*, обосновав при этом суть и роль научной информации: «*Научная информация – это получаемая в процессе познания логическая информация, которая адекватно отображает закономерности объективного мира и используется в общественно-исторической практике*» [12, с. 55].

Логико-семантическая концепция информации предложена в [13, 14 и др.], а в [15] информация представлена как функция определённым образом организованной материи, где каждому уровню организации материи соответствует своя информационная функция. В современной *атрибутивной теории информации* [16-18] информация рассматривается как неотъемлемое свойство материи, и поэтому она может проявлять себя во всех объектах, процессах и явлениях как живой, так и неживой природы. В [19, 20] на основе математической теории поля показано, что информация – категория, парная материи, структура материи.

## 1 Анализ процесса отражения и воспроизведения действительности

В философии существует противопоставление *чувственного и рационального (логического) познания*. Чувственное познание осуществляется в формах: *ощущение* (с помощью органов чувств или измерительных устройств) [21]; *восприятие* – сумма ощущений, образующая *целостный* чувственный образ объекта [22, 23]; *представление* – чувственно-наглядный образ предмета, воздействовавшего на органы чувств в прошлом, т.е. то, что сохранено в памяти после того, как освоено ранее [24]. В чувственных образах фиксируется *внешняя сторона* явлений. При рациональном познании с помощью процесса *логического мышления* происходит формирование: *понятия, суждения, умозаключения*. Формирование *понятия* — это переход на более высокий уровень познания – рациональное (логическое) познание.

Процесс познания может включать и внерациональные формы (*предвидение, фантазию, мечту, эмоции, интуицию*), для которых характерна неосознаваемость причин возникновения связи понятия с первоначальными данными. Для понимания процессов преобразования информации, т.е. перехода от чувственного восприятия к логическому и их взаимосвязи, предлагается применить формализованное представление этих процессов с применением теории информационного поля [19, 20]. Элементы этой теории в виде законов чувственного и логического отражения, записанные с использованием интегрального представления и в дифференциальной форме с использованием понятия дивергенции приведены в таблице 1.

Результатом действия закона чувственного отражения является *чувственная информация*  $J_i$  или *информации восприятия, которая фиксируется в форме*  $J_i = R_k(M) M_i$ , или в линейном приближении:  $J_i = R_k M_i$ , где  $R_k$  – информационная проницаемость среды;  $M_i$  – материальный

объект. Полученное *восприятие* превращается в *представление* – чувственно-наглядный образ предмета, *образное представление о воспринимаемых свойствах* объекта, соответствующее интегральному представлению, которое отображается вектором  $\mathbf{J}$  в форме, подобной теореме Гаусса:

$$\mathbf{J} = \oint_S \mathbf{O}_v d\mathbf{S}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{O}_v = R_k \mathbf{O}$  – вектор интенсивности отражения потока.

Таблица 1 – Законы чувственного и логического отражения

Закон чувственного отражения	Закон логического отражения
$R_k \mathbf{M} = \oint_S \mathbf{O}_v d\mathbf{S}, \operatorname{div} \mathbf{O} = R_k \rho,$ <p>где <math>\mathbf{M}</math> – материальное свойство;  <math>\mathbf{O}</math> – вектор интенсивности потока существования;  <math>\rho = dM_i/dV</math> – объёмная плотность <math>i</math>-го материального свойства;  <math>\mathbf{S}</math> – замкнутая поверхность, охватывающая изучаемое явление или объект;  <math>R_k</math> – информационная проницаемость среды. В общем случае <math>R_k</math> зависит от <math>\mathbf{O}</math>.</p>	$R \mathbf{M} = \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S}, \operatorname{div} \mathbf{E} = R \rho$ <p>где <math>\mathbf{M}</math> – материальное свойство;  <math>\mathbf{E}</math> – вектор напряжённости поля логики;  <math>\rho = dM_i/dV</math> – объёмная плотность <math>i</math>-го материального свойства;  <math>R = R_k R_o</math> – безразмерная константа, характеризующая логическую реакцию (поведение) субъекта, отражающего объект, на поток <math>\mathbf{O}</math>. В общем случае <math>R_o</math> зависит от <math>\mathbf{O}</math>.</p>

На основе чувственного познания формируется множество, которое называют *элементной базой (данными)*. При рациональном познании должно возникнуть понимание воспринятых данных, *понятие*, отражающее общие связи, существенные стороны, признаки воспринимаемых объектов / процессов, которые закрепляются в их определениях.

Средства рационального познания (действие, образы), методы индукции и дедукции, формальная логика и т.п. помогают выполнять операции *суждения* и *умозаключения*.

Согласно [19, 20] *понятие* – это *логическая информация, сущность* воспринимаемой информации или *информационный потенциал H*:

$$\mathbf{H} = \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \mathbf{H}$  – результат действия закона логического отражения, вектор напряжённости поля.

Поскольку существуют два закона отражения действительности (1) и (2), то можно получать информацию об объектах на основе обоих законов. Например, можно воспринимать объект на основе отражения его свойств (размер, вес, объём или других параметров, измеряемых количественно или экспертно органами чувств или соответствующими рецепторами робота,) и делать заключение об объекте на основе алгоритма (если такой существует). А можно на основе *целостного восприятия*, состоящего в том, что всякий объект воспринимается как устойчивое системное целое, даже если некоторые его части в данный момент нельзя наблюдать.

## 2 Преобразование информации восприятия в информационный потенциал

Зависимость информационного потенциала  $H$  от информации восприятия  $J$  имеет вид [20]:

$$H = \int f(J) dJ \Rightarrow H = f(J). \quad (3)$$

Процесс отражения и преобразования информации от чувственной к логической иллюстрируется рисунком 1. Чувственное отражение и восприятие представлено измерительным блоком I, обеспечивающим *ощущение* с помощью органов чувств или измерительных прибо-

ров. Преобразование восприятия в представление осуществляется в блоке II. Первично полученное чувственное отражение, воспринятая чувственная информация и полученный в результате суммирования вектор  $J$ , характеризующий представление, преобразуются в *сущность, понятие*  $H$ , т.е. осмысление, преобразование *представления* в *понятие* происходит в блоке III.

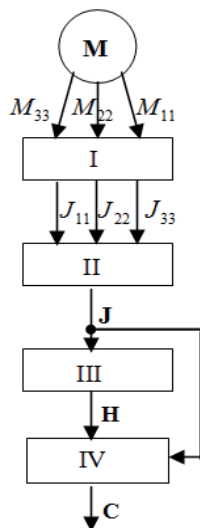


Рисунок 1 – Процесс отражения и преобразования информации

Принято считать, что процесс познания обычно начинается с чувственного познания. Вместе с тем, чувственные восприятия осмысленны. Любой чувственный образ обусловлен понятиями, логическими образами. Таким образом, чувственное и логическое познание взаимосвязаны, объединены в их общий результат – *знание* [24] (на рисунке 1 – блок IV).

В качестве аналога *содержания, смысла* в теории информационного поля [19, 20] введено понятие «*информационная сложность*», которая определяется пересечением (логическим произведением):

$$C = J \cap H \text{ или } C = J \times H. \quad (4)$$

Таким образом, формируется преобразование:

$$\text{данные (J)} \Rightarrow \text{информация (H)} \Rightarrow \text{знания (C)}. \quad (5)$$

В этом преобразовании – три «лика» информации [25], что понятию эмпирически и анализируется в работах [26, 27]. Начало преобразования (5) можно представить зависимостью (3). Алгоритм такого преобразования пока не найден.

Для преобразования *представления* (полученного на основе чувственного познания) в *понятие* (логическое, рациональное познание), видимо, необходимо *особое информационное пространство* естественного или искусственного интеллекта, в котором должны быть образы, сходные с воспринимаемым. В живых организмах такое внутреннее пространство, вероятно, «выращивается» на основе накопления опыта наблюдений логических взаимодействий в природе.

В философии развивается *теория социальных эстафет*, которые являются базовыми механизмами социальной памяти. «*Воспроизводя образцы живой речи, мы учимся говорить, на базе образцов рассуждения усваиваем правила логики, находясь в среде других людей, перенимаем формы их поведения, элементарные трудовые навыки, типы реакций на те или иные события. Всё сказанное с некоторыми поправками можно отнести и к сфере творческой деятельности*» [28].

В искусственных системах модель такого пространства для конкретных приложений можно «вырастить» на основе обучаемой нейронной сети, используя аналог понятия «гиперсеть», предложенного в [29]. В этом пространстве формируются образы, понятия, язык, благодаря чему становится возможным логическое отражение реальных процессов.

В [19] отражение материального мира названо *информационным полем*. Пространство для преобразования *представлений* в *понятия* можно считать локальным информационным полем соответствующей предметной области, поскольку, существующие исследования доказывают, что живые существа мыслят не нейронами, а полями [30].

Преобразование данных  $J$  (чувственное восприятие) в информационный потенциал  $H$ , т.е. в семантическую (или прагматическую) информацию для практических приложений можно выполнить путём введения детерминированных и вероятностных оценок  $J$  и  $H$ .

При детерминированном способе

$$J = A/\Delta A, \quad (6)$$

где  $A$  – общее количество компонентов, воспринимаемых измерительными приборами или органами чувств;  $\Delta A$  – «квант», с точностью до которого воспринимается информация (в физике – это разрешающая способность прибора).

Для преобразования  $J$  в  $H$  предлагаются два способа [20].

*Детерминированная мера*, обобщающая способы усреднения в физике, для чего вводится параметр  $\gamma$ , который может выбирать постановщик задачи

$$H = \sqrt[\gamma]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_i^\gamma}, \quad (7)$$

где  $J_i$  – результаты измерения  $A_i$  согласно (6);  $n$  – объём понятия, т.е. число охватываемых понятием объектов;  $\gamma$  — параметр логики усреднения.

При  $\gamma = 1$  получается среднеарифметическое усреднение, соответствующее закону классической логики Аристотеля, согласно которому собственная сущность (суть) системы обратна объёму понятия  $n$  о ней  $H = J/n$ . При других значениях  $\gamma$  получаются другие виды усреднений:

среднегеометрическое ( $\gamma = 0$ )  $H = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n J_i}$ ; среднегармоническое ( $\gamma = -1$ )  $H = n / \sum_{i=1}^n \frac{1}{J_i}$ .

В математических теориях, описывающих механические процессы, в основном, используется среднеарифметическое усреднение. Есть теории, в которых применяются другие способы усреднения. Например, в методе иерархий используется среднегеометрическое усреднение [31]; в математическом представлении процессов сочинения музыки использовано среднегармоническое усреднение [32]. Обобщённая мера (7) может быть основой для разработки методов анализа данных.

*Вероятностная мера* (выведена из теории информационного поля [19, 20]):

$$H = \int f(J_i) dJ_i \Rightarrow H = \sum_{i=1}^n q_i J_i \Rightarrow H = - \sum_{i=1}^n q_i \log p_i \quad (8)$$

где  $p_i$  – вероятность события;  $J = -\log p_i$  – информация восприятия события;  $q_i$  – вероятность использования  $J$ .

При  $q_i = p_i$  
$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i. \quad (9)$$

При использовании информации для достижения цели соотношение (8) можно превратить в прагматическую меру:

$$H_u = - \sum_{i=1}^n q_i \log(1 - p_i'), \quad (10)$$

где  $p_i'$  – вероятность достижения цели,  $q_i$  – вероятность использования  $J$ .

В частном случае  $p_i'$  может быть статистической вероятностью. В общем случае вероятность достижения цели  $p_i'$  и вероятность использования оцениваемой компоненты (свойства) при принятии решения  $q_i$  могут иметь более широкую трактовку (см., например, [33]).

С учётом рассмотренного процесс преобразования (5) можно представить таблицей 2, где приведено сопоставление преобразований информации в терминах философии (вторая строка сверху) и формализованного представления с использованием детерминированного и вероятностного способов измерения информации.

### 3 Информация как переходное состояние

Принято термин «информация» использовать для названия информационного потенциала, значимого для принятия решений, который формируется в результате анализа данных.

При отражении материальных объектов  $M_i$ , и при преобразованиях  $J$  в  $H$  и  $H$  в  $C$  происходят процессы преобразования с использованием термина «информация» до тех пор, пока не появляется термин, соответствующий состоянию, в которое переходит информация.

Таблица 2 – Преобразование информации

Данные (J) ⇒			Информация (H) ⇒		Знания (C).	
Ощущение	Восприятие Измерение	Представление	Понятие		Анализ значимости	Умозаключение
Детерминированно	$J_i = A_i/\Delta A_i$	$J = \sum_i J_i$	$H = \sqrt[\gamma]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_i^\gamma}$	$H = J/n.$	Для данной задачи	$C = J \cap H$
				$H = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n J_i}$	Для других задач ⇒	
				$H = n / \sum_{i=1}^n \frac{1}{J_i}$		
Вероятностно	$J_i = \log p_i$	$J = \sum_i J_i$	$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$ $H_u = -\sum_{i=1}^n q_i \log(1 - p_i')$	Для данной задачи	$C = J \cap H$	
				Для других задач ⇒		

Если в результате *отражения* и *восприятия* различных, разнородных, не связанных между собой материальных объектов человеком собирается *информация*, то после получения *представлений* и помещения их в общий информационный массив собранную информацию начинают называть *данными*, *базами данных* (БД). По мере анализа «сырых данных» получается *информация*, *необходимая для принятия решений*, которая названа *информационным потенциалом*. Рассмотрение любой материальной среды происходит на синтаксическом, семантическом, прагматическом уровнях, каждый из которых может быть соотнесён с понятиями данные, информация, знания. Соотношения понятий имеют значение для теории информационных систем, формирования БД и баз знаний (БЗ). Материальная среда порождает большое число информационных потоков, которые могут содержать все три вида отражения. Так, данные формируются в материальной среде, как набор утверждений, фактов или цифр о её объектах, лексически и синтаксически связанных между собой, тогда как информация создаётся посредством анализа отношений и взаимосвязей между фрагментами данных.

Знания получаются в результате синтеза полученной информации с хранящимися данными об объектах материальной среды для дальнейшего целенаправленного применения.

С точки зрения познания материальной среды для отражения протекающих процессов в информационных средах можно выделить несколько слоёв [34]. Слои возникают на теоретическом уровне и показывают связи понятийного аппарата, определяемые восприятием материальной среды, способности для улучшения отбора и сохранения данных, их взаимного влияния (см. рисунки 2 и 3). Слой восприятия материальной среды направлен на выявление её информационного потенциала.



Рисунок 2 – Слой информационного поля

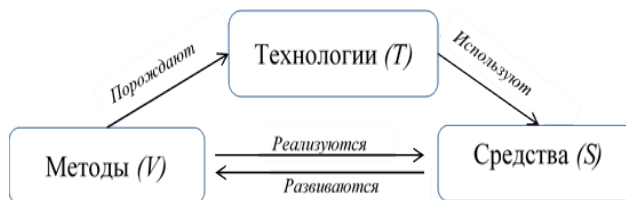


Рисунок 3 – Слой технологического отображения информации в практическое поле

Воспринимая материальный объект  $M_i$ , человек получает информацию, которую вначале называют *данными*. По мере преобразования данных вначале используется термин «получение *информации*», а затем, после оценки её практической значимости, вводится понятие

«информационный потенциал». Наиболее значимая информация преобразуется в знания, а знания, перенесённые на материальные носители (книги, файлы и т.п.), снова используются как источники информации, называемой до её осмысления и оценки *данными*.

Сходимость *данных* и *знаний* даёт возможность создавать новые ресурсы и технологии, увеличивая информационный потенциал.

Расширение на слои позволяет получить аналогичные преобразования понятий.

Для слоя физического сохранения данных: факт (события, сведения) ⇒ документ (книга, статья) ⇒ артефакт (сохранённый электронный вид).

Для слоя процессного управления: процессы ⇒ ситуации ⇒ персоналии.

Таким образом, термин «информация» используется в переходных процессах: от данных – к информационному потенциалу (пониманию воспринятой информации и на практике называемому информацией в прикладном значении термина), и от этого состояния – к знаниям. При осмыслении воспринятого вводят названия конкретных материальных объектов, а понятие «информация» помогает вводить эти названия.

#### 4 Модель преобразования информации на основе диалектической логики

Формализованное представление законов диалектической логики [20] приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Законы диалектической логики

Закон	Обоснование	Формализованное представление
<b>Первый закон</b> – основной закона логики справедлив для классической логики и диалектики.	Получается из (7) при $\gamma = 1$ – среднearифметическое усреднение, соответствующее основному закону классической логики Аристотеля: <i>собственная сущность (суть) системы обратна объёму понятия о ней</i> .	Из $H = \gamma \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_i^\gamma}$ при $\gamma = 1$ следует $H = J/n$ , где $J$ – воспринятая информация; $n$ – объём понятия.
<b>Второй закон</b> – « <i>Всё течёт и всё изменяется</i> ».	Вводится символ $d$ , отображающий отрицание «не».	$H_\tau = \tau dJ / dt$ , где $\tau$ – информационное сопротивление объекта изменениям; $d$ – символ отрицания «не»; $t$ – время.
<b>Третий закон</b> – закон отрицания отрицания.	Если $J$ есть $A$ , то $\Delta_1 J$ есть «не $A$ », а $\Delta_2 J$ есть «не не $A$ », это в отличие от классической логики не возврат к $A$ , а развитие по спирали.	$H_1 = L_{11} d^2 J_1 / dt^2$ , где $L_{11} = \tau_0^2$ – ригидность процесса, инерционность; $\tau_0$ – собственное информационное сопротивление объекта.
<b>Четвёртый закон</b> – закон единства и борьбы противоположностей.	С учётом этого закона итоговая сущность в случае одного объекта формируется как сумма противоположностей $H = H_n \cup H_\tau \cup H_L$	$H = J/n + \tau dJ / dt + L d^2 J / dt^2$ , где $n$ – объём понятия об объекте; $\tau$ – информационное сопротивление объекта изменениям; $L$ – ригидность объекта (сопротивляемость изменениям, инертность).
<b>Пятый закон</b> – закон перехода количественных изменений в качественные.	Из этого закона следует, что сумма свойств частей не есть свойство целого, а отрицание целого не обязательно означает отрицание частей. Формально этот закон требует учёта нелинейности исследуемых процессов.	$n$ , $\tau$ и $L$ являются константами в ограниченном диапазоне эволюционных изменений объекта, но при существенных изменениях они не сохраняют свои значения, т.е. в общем случае $n$ , $\tau$ и $L$ – функции $H, J, dJ/dt, d^2 J/dt^2$ .
<b>Шестой закон</b> – закон всеобщей взаимосвязи и взаимозависимости явлений.	С учётом этого закона можно получить систему соотношений: $H_i = f(H_{ii}, H_{ij})$ $H_i = H_{ii} \cup H_{ij}$	С учётом всех законов: $H_i = f(J_i/n_{ii}, \tau_{ii} dJ_i/dt, L_{ii} d^2 J_i/dt^2,$ $J_1/n_{i1}, \tau_{i1} dJ_1/dt, L_{i1} d^2 J_1/dt^2,$ $J_2/n_{i2}, \tau_{i2} dJ_2/dt, L_{i2} d^2 J_2/dt^2, \dots,$ $J_j/n_{ij}, \tau_{ij} dJ_j/dt, L_{ij} d^2 J_j/dt^2, \dots) \dots$

Полную систему уравнений, отображающих пространство, учитывающую все законы, в случае линейной аппроксимации можно получить на основе модели (7):

$$\begin{aligned}
 H_1 &= J_1/n_{11}+J_2/n_{12}+\dots+\tau_{11}dJ_1/dt+\tau_{12}dJ_2/dt+L_{11}d^2J_1/dt^2+L_{12}d^2J_2/dt^2+\dots, \dots, \\
 H_2 &= J_1/n_{21}+J_2/n_{22}+\dots+\tau_{21}dJ_1/dt+\tau_{22}dJ_2/dt+L_{21}d^2J_1/dt^2+L_{22}d^2J_2/dt^2+\dots, \dots \\
 H_i &= J_i/n_{ii}+J_j/n_{ij}+\dots+\tau_{ii}dJ_i/dt+\tau_{ij}dJ_j/dt+L_{ii}d^2J_i/dt^2+L_{ij}d^2J_j/dt^2+\dots, \dots \\
 H_m &= J_1/n_{m1}+J_2/n_{m2}+\dots+J_m/n_{mm}+\tau_{m1}dJ_1/dt+\tau_{m2}dJ_2/dt+\dots+\tau_{mm}dJ_m/dt+ \\
 &\quad +L_{m1}d^2J_1/dt^2+L_{m2}d^2J_2/dt^2+\dots+L_{mm}d^2J_m/dt^2
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

где  $J_i = A_i/\Delta A_i$ , – информация об  $i$ -м параметре пространства;  $A_i$  – материальная сущность параметра;  $\Delta A$  – единица измерения (6);  $d$  – отрицание «не»;  $n_{ii}$  – объём влияния  $i$ -го параметра;  $n_{ij}$  – изменение объёма при взаимном влиянии  $i$ -го и  $j$ -го параметров;  $\tau_{ii}$  – собственное информационное сопротивление  $i$ -го параметра изменениям;  $\tau_{ij}$  – изменение информационных сопротивлений при взаимодействии  $i$ -го и  $j$ -го параметров;  $L_{ii}$  – собственная ригидность, инерционность  $i$ -го параметра;  $L_{ij}$  – взаимные ригидности  $i$ -го и  $j$ -го параметров;  $dJ/dt$  и  $d^2J/dt^2$  – скорость и ускорение изменения параметра.

Модель (11) позволяет учесть скорость и ускорение изменения параметров, т.е. учесть кинематику и динамику моделируемых процессов. Можно вначале формировать информационную базу как пространство для преобразования  $J$  в  $H$  без учёта кинематики и динамики её развития на основе применения первого и шестого законов диалектики:  $H_i = f(H_{ii}, H_{ij})$ , или  $H_i = f(J_i / n_{ii}, J_j / n_{ij})$ . В случае линейной аппроксимации  $H_i = f(J_i / n_{ii} + J_j / n_{ij})$ .

Такая информационная база представляет собой не набор данных, которые в терминах информационной теории [19] получены в результате применения закона чувственного отражения (чувственная информация  $J$ ), а сохраняет структуру отображаемого объекта в виде связей между отражаемыми компонентами. Структура, не расчлѐнная на элементы, сохраняет информационный потенциал компонентов информационной базы.

Сформированные таким образом базы могут стать источником получения скрытых закономерностей при анализе БД. Применение средств интеллектуального анализа данных и извлечения знаний может позволить получить полезные результаты для управления и принятия решений. Для относительно небольших БД можно поставить задачу преобразования существующей БД на основе оценки значимости компонентов БД для решаемой задачи или для исследуемой сферы деятельности, используя вероятностную меру  $H_u$  (10) и определяя взаимосвязи между компонентами.

На основе модели (11) можно «выращивать» информационное пространство для исследуемой области на основе опроса специалистов с применением информационных оценок (7), (10) и автоматизированных диалоговых процедур [35, 36].

Пример алгоритма «выращивания пространства» [35].

- 1) вначале можно формировать модель с использованием только константы  $n$ . Если такие оценки затруднены, то предлагается принять аксиому, в соответствии с которой считать, что оба способа оценки потенциала  $H$  одинаково отражают предпочтения лиц, принимающих решение. Тогда вначале следует определить оценку  $H$ , используя меру (10), а затем, подставив её в детерминированную модель (7), вычислить константу  $n$ , считая её постоянной в течение определённого периода времени.
- 2) расширить модель, включив в неё  $\tau_i dJ_i/dt$ , и вновь оценить потенциал  $H$  с использованием вероятностной меры (10); по этой оценке в детерминированной модели вычислить  $\tau$ .
- 3) аналогично можно определить  $L$ .

Таким образом, вначале будет получена модель с учётом параметров  $n$ ,  $\tau$ ,  $L$ , но без учёта их изменений при взаимном влиянии компонентов модели, а затем, при необходимости, можно включать взаимные влияния компонент.

В (11) не все компоненты могут быть взаимосвязаны. Такое пространство отличается от информационной базы накапливаемых ключевых слов, словосочетаний, параметров. В нём

будут отражены взаимосвязи между информационными потенциалами, что важно для принятия решений и для развития информационного пространства, лучше «понимающего» воспринимаемую логическую информацию и/или процесс преобразования *представления* в *понятие*. Экспериментально подобное пространство можно получить на основе автоматизированной диалоговой процедуры с привлечением квалифицированных специалистов в области, для которой создаётся база.

Формируемая информационная база будет иметь сложный тезаурус. Если отразить в нём ещё и правила грамматики формирования смысловыражающих компонентов, то, возможно, такое пространство будет полезно для создания моделей искусственного интеллекта.

Перспективным представляется исследование получения на основе этого пространства восприятия возможностей не только отражения материального потока *O* и получения элементной БД *J* и преобразования *представления* в *понятие*, но и реализация логического отражения, т.е. отражения напряжённости поля логики *E*, на основе чего формируется информационный потенциал *H*.

Оригинальная концепция информационного пространства предлагается в [37], где в задаче формализации сознания определяются математические величины информационала когнитивного при когнитивно-интеллектуальных преобразованиях, используя идеи информационных оценок, подобных оценкам [20, 29].

## Заключение

Представленное в статье исследование подтверждает содержание термина «информация» как фундаментального понятия, наравне с понятием «материя». Информация понимается как отражение материи, как категория парной материи; как понятие, которое помогает вводить названия конкретных материальных объектов и конкретизированные понятия, удобные для практического применения. Термин «информация» используется в переходных состояниях при восприятии материальных объектов до тех пор, пока не определено конкретное название воспринятой информации.

Практическая значимость проведённого исследования заключается в том, что при применении термина информация необходимо оговаривать: в каком смысле он используется в конкретном контексте; в какой стадии познания находится информация – в стадии *восприятия* и *представления* (данные), *понятия* (информационный потенциал) или результата *умозаключения* (знание).

При исследовании преобразования «данные – информация – знания» показано, что содержательное *представление*, полученное в результате чувственного познания, может быть преобразовано в *понятие* в двух вариантах – вероятностном и детерминированном.

Вкладом в современную теорию анализа данных и отбора информации для формирования БЗ являются:

- обобщённое представление способов усреднения (7), которые нужно выбирать с учётом особенностей предметной области, для которой создаётся БЗ;
- применение информационной оценки (10), основанной на определении степени влияния полученной информации (информационного потенциала) на реализацию целей БЗ.

## Список источников

- [1] Большая советская энциклопедия. Второе издание. 1953. Т.18. С. 311.
- [2] *Паулин Г.* Малый толковый словарь по вычислительной технике / Г. Паулин. Пер. с нем., дополненный и переработанный М.Г. Гаазе-Рапопорта. Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Энергия, 1975. 296 с.
- [3] *Рыжов В.П.* О понятии "информация". *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2011. №1. С.3-8.

- [4] **Кулешов А.В.** Онтология возникновения информации. *Философские проблемы информационных технологий и киберпространства*. 2015. №2. С.27-41. DOI: 10.17726/philIT.2015.10.2.111.
- [5] **Лебедев А.В.** Парменид // *Античная философия: Энциклопедический словарь*. М.: Прогресс-Традиция, 2008. С.542-545.
- [6] **Новейший философский словарь** / Сост. А.А. Грицанов. Минск. 1998. 896 с.
- [7] **Тимошенко Л.В.** Глобальный культурный проект «Волна будущего». М., 2014. 120 с.
- [8] **Философский энциклопедический словарь** / Ред.-сост. Е.Ф.Губский и др., М., 2003.
- [9] **Отле П.** Труды по библиотековедению. Руководство для общественных библиотек. Организация умственного труда. Руководство к администрированию: Практ. пособие / Вступ. ст. и науч. ред. Ю.Н. Столярова. М.: Изд-во «Либерея», 2002. 232 с.
- [10] **Винер Н.** Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. М.: Советское радио, 1958. 344 с.
- [11] **Шеннон К.Э.** Работы по теории информации и кибернетике / Пер. С. Карпова. М.: ИИЛ, 1963. 830 с.
- [12] **Михайлов А.И., Черный А.И., Гиляревский Р.С.** Основы информатики. М.: Наука, 1968. 756 с.
- [13] **Шрейдер Ю.А.** Об одной модели семантической теории информации. *Проблемы кибернетики*. 1965. Вып.13. С.233-240.
- [14] **Финн В.К.** О семантической информации, в кн.: Джордж Ф. Мозг как вычислительная машина. М., 1963. С.479-485.
- [15] **Дубровский Д.И.** Информация, сознание, мозг: Монография. М., Высш. школа, 1980. 286 с.
- [16] **Урсул А.Д.** Информация. М.: Наука, 1971. 295 с.
- [17] **Урсул А.Д.** Проблема информации в современной науке. Философские очерки. М.: Наука, 1975. 88 с.
- [18] **Колин К.К.** Философия информации: структура реальности и феномен информации. *Метафизика*. 2013. №4. С.61-84.
- [19] **Денисов А.А.** Информационное поле. СПб.: Изд-во «Омена», 1998. 64 с.
- [20] **Денисов А.А.** Современные проблемы системного анализа. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 304 с.
- [21] **Зинченко В.П.** Восприятие // *Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. 3-е изд.* М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
- [22] **Лекторский В.А.** Восприятие // *Новая философская энциклопедия: в 4 т. / Под ред. В.С. Стёпина. 2-е изд., испр. и доп.* М.: Мысль, 2010. 2816 с.
- [23] **Шиффман Х.** Ощущение и восприятие. СПб.: Питер, 2003. 928 с.
- [24] **Кравченко А.И.** Общая психология. М.: Проспект. 2011. 432 с.
- [25] **Волкова В.Н., Козлов В.Н., Логинова А.В., Романова Е.В., Широкова С.В.** Три состояния информации: восприятие, сущность, смысл. *Прикладная информатика*. 2019. Т.14. №2(80). С.105–119.
- [26] **Москвитин А.А.** Данные, информация, знания: методология, теория, технологии. СПб.: Лань, 2019. 232 с.
- [27] **Палицын В.К.** К вопросу о соотношении понятий «знания», «информация», «данные». *Наука и инновации*. 2018. №180. С.44-49.
- [28] **Розов М.А.** Теория социальных эстафет и проблемы эпистемологии. Смоленск: Смол. гор. тип. 2006. 439 с.
- [29] **Анохин К.В., Новоселов К.С., Смирнов С.К. и др.** Искусственный интеллект для науки и наука для искусственного интеллекта. *Вопросы философии*. 2022. №3. С.93–106. DOI: 10.21146/0042-8744-2022-3-93-105.
- [30] **Коган А.Б.** Основы физиологии высшей нервной деятельности. М.: Высш. шк. 1988. 367 с.
- [31] **Saaty T.L., Kearns K.P.** Analytical Planning: The Organization of Systems. Frankfurt. Pergamon Press, 1985. 208 p.
- [32] **Марутаев М.А.** О гармонии мира. *Вопросы философии*. 1994. №6. С.71–81.
- [33] **Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник** / Под ред. В.Н. Волковой и В.Н. Козлова. М.: Высшая школа, 2004. 616 с.
- [34] **Романова Е.В.** Информация как переходное состояние / Сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции «Системный анализ в проектировании и управлении», 2021. Т.3. С.502-506.
- [35] **Волкова В.Н., Логинова А.В., Максимов М.С.** Модель пространства состояний подвижного равновесия. *Перспективы науки*. 2025. №2(185). С.26–29.
- [36] **Максимов М.С., Волкова В.Н.** Развитие системы информационного обеспечения административного органа территориального управления. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.363-375. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-363-375.
- [37] **Костюковский А.Г.** Когнитивно-интеллектуальные преобразования в открытой системе. *Системный анализ: сб. научных трудов XXVIII Международной научно-практической конференции, 27–29 июня 2024 г.* В 2 ч. Ч.1. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. С.303–315.

## Сведения об авторах



**Волкова Виолетта Николаевна**, 1936 г. рождения. Окончила Таганрогский радиотехнический институт в 1959 г. и аспирантуру МЭИ в 1970 г., к.т.н. (1973), д.э.н. (1993). Профессор Высшей школы компьютерных технологий и информационных систем СПбПУ. Заслуженный работник высшей школы РФ. Член Международной академии наук высшей школы. В списке научных трудов более 350 работ (в т.ч. 8 учебников и 12 монографий) в области теории систем и системного анализа. ORCID: 0000-0001-9658-5135; Author ID (РИНЦ): 73469; Author ID (Scopus): 57191609371; Researcher ID (WoS): Q-4085-2016. [violetta\\_volkova@list.ru](mailto:violetta_volkova@list.ru). ✉.

**Логинова Александра Викторовна** 1981 г. рождения, Окончила СПбПУ в 2003 г. к.э.н. (2007). Доцент Высшей школы компьютерных технологий и информационных систем СПбПУ. В списке трудов более 120 работ в области теории систем и системного анализа, математических методов в экономике, информационных систем. ORCID: 0000-0002-7783-7795; Author ID (РИНЦ): 493648; Scopus ID: 57191619232; Researcher ID: M-6637-2014. [loginova\\_av@spbstu.ru](mailto:loginova_av@spbstu.ru)



**Романова Елена Владимировна**, 1971 г.р. Окончила Московский государственный университет экономики, статистики и информатики (1993), магистратуру РГУ МИРЭА (2017). Старший преподаватель Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. Член РАИИ. В списке научных трудов более 100 работ в области проектирования и разработки информационных систем, системного анализа и управления проектами. ORCID: 0000-0002-4933-9422; Author ID (РИНЦ): 166880; Author ID (Scopus): 57205186427; [romanova.ev@rea.ru](mailto:romanova.ev@rea.ru).

**Черный Юрий Юрьевич**, 1967 г. рождения. Окончил Комсомольский-на-Амуре политехнический институт (1992) и аспирантуру философского факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (1997), к.филос.н. (1998). Руководитель Центра по изучению проблем информатики ИНИОН РАН. В списке научных трудов более 120 работ в области философии науки и техники, истории науки и техники, информатики, документологии, библиотековедения. ORCID 0000-0001-5790-9547; Author ID (РИНЦ): 194159; [yuri.chiorny@mail.ru](mailto:yuri.chiorny@mail.ru).



Поступила в редакцию 27.01.2026, после рецензирования 11.03.2026. Принята к публикации 25.03.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-213-225

## Towards the ontology of information transformations

© 2026, V.N. Volkova<sup>1</sup>✉, A.V. Loginova<sup>1</sup>, E.V. Romanova<sup>2</sup>, Yu.Yu. Chernyy<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Institute of Scientific Information for Social Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

### Abstract

This article examines the fundamental principles, essential forms, and properties of information as a category of paired matter from an ontological perspective. It analyzes the process of sensory cognition (reflection, perception, and representation), as well as the problem of transforming representation into concept, and the subsequent stages of rational (logical) cognition from the perspectives of philosophy and psychology. A model of transformation "data-information potential-knowledge" is proposed, along with an interpretation of the role of information in transition processes. To understand the processes of reflection, perception, and representation of information space, the transition from sensory to logical perception and their interrelationships, formalized representations based on A.A. Denisov's theory of the information field are applied. This theory introduces the concepts of sensory and logical information. The study proposes a model of a conceptual space for transforming sensorially perceived information into informational potential for decision-making, grounded in a formalized representation of the laws of dialectical logic. The research attempts to broaden the understanding of information as an instrument of cognition and as a means of transforming data into information potential and knowledge.

**Keywords:** information, ontology, perception, information space, reflection, representation, sensory information.

**For citation:** Volkova VN, Loginova AV, Romanova EV, Chernyy YuYu. Towards the ontology of information transformations [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 213-225. DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-2-213-225.

**Authors' contribution:** Volkova V.N. – analysis of the concept of information; Loginova A.V. – analysis of studies on the processes of reflection and perception of material objects; Romanova E.V. – interpretation of the role of information in transition processes; Chernyy Yu.Yu. – investigation of the concept of information from the point of view of philosophical ideas

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

### List of figures and tables

Figure 1 – Process of reflecting and transformation of information

Figure 2 – Layer of the information field

Figure 3 – Layer of technological representation of information in the practical field

Table 1 – Laws of sensory and logical reflection

Table 2 – Transformation of information

Table 3 – Laws of dialectical logic

### References

- [1] The Great Soviet Encyclopedia. Second edition [In Russian]. 1953. Volume 18.
- [2] **Paulin G.** Small explanatory dictionary of computer technology [In Russian]. Translated from German by MG. Gaaze-Rapoport. Ed. DA. Pospelov. Moscow: Energiya. 60 p.
- [3] **Ryzhov VP.** On the Concept of "Information" [In Russian]. *News of Russian Universities. Radio Electronics*. 2011; 1: 3-8.
- [4] **Kuleshov AV.** Ontology of the Origin of Information [In Russian]. *Philosophical Problems of Information Technology and Cyberspace*. 2015; 2: 27-41. DOI: 10.17726/philIT.2015.10.2.111.
- [5] **Lebedev AV.** Parmenides [In Russian]. *New Philosophical Encyclopedia / Chairman of the Scientific Editorial Council VS. Stepin*. 2nd ed.. Moscow: Mysl, 2010.
- [6] The Newest Philosophical Dictionary [In Russian]. Comp. AA. Gritsanov. Minsk, 1998. 896 p.
- [7] **Timoshenko LV.** Global cultural project "Wave of the future" [In Russian]. Moscow, 2014. 120 p.
- [8] Philosophical encyclopedic dictionary [In Russian]. Ed. and compiled by EF. Gubsky et al., Moscow, 2003.
- [9] **Otle P.** Works on library science. Handbook for Public Libraries. Organization of Mental Work. Guide to Administration: Practical Manual [In Russian]. Moscow: Libereya Publishing House, 2002. 232 p.
- [10] **Wiener N.** Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine [In Russian]. Translated from English. Moscow: Sovetskoye Radio, 1958. 344 p.
- [11] **Shannon KE.** Works on information theory and cybernetics [In Russian]. Translated by S. Karpov. Moscow: IIL, 1963. 830 p.
- [12] **Mikhailov AI, Cherny AI, Gilyarevsky RS.** Fundamentals of computer science [In Russian]. Moscow: Nauka, 1968. 756 p.
- [13] **Shreider Yu.A.** On a model of semantic theory of information [In Russian]. *Problems of Cybernetics*. 1965; 13: 233-240.
- [14] **Finn VK.** On semantic information [In Russian]. In: *George F. The Brain as a Computing Machine*. Moscow, 1963. P.479–485.
- [15] **Dubrovsky DI.** Information, consciousness, brain: Monograph [In Russian]. Moscow, Higher School, 1980. 286 p.
- [16] **Ursul AD.** Information [In Russian]. Moscow: Nauka, 1971. 295 p.
- [17] **Ursul AD.** The problem of information in modern science [In Russian]. Moscow: Nauka, 1975. 288 p.
- [18] **Kolin KK.** Philosophy of information: the structure of reality and the phenomenon of information [In Russian]. *Metaphysics*. 2013; 4: 61–84.
- [19] **Denisov AA.** Information field [In Russian]. St. Petersburg: Omena Publishing House, 1998. 64 p.
- [20] **Denisov AA.** Modern problems of systems analysis: Textbook [In Russian]. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2008. 304 p.
- [21] **Zinchenko VP.** Perception [In Russian]. The Great Soviet Encyclopedia: in 30 volumes / Ed. AM. Prokhorov. 3rd ed. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1969-1978.
- [22] **Lektorsky VA.** Perception [In Russian]. The New Philosophical Encyclopedia: in 4 volumes / Ed. VS. Stepin. 2nd ed., corrected and enlarged. Moscow: Mysl', 2010. 2816 p.
- [23] **Shiffman H.** Sensation and perception [In Russian]. St. Petersburg: Piter, 2003. 928 p.
- [24] **Kravchenko AI.** General psychology: Textbook [In Russian]. Moscow: Prospect. 2011. 432 p.

- [25] **Volkova VN, Kozlov VN, Loginova AV, Romanova EV, Shirokova SV.** Three states of information: Perception, essence, meaning [In Russian]. *Applied Informatics*. 2019; 14(2): 105–119.
- [26] **Moskvitin AA.** Data, information, knowledge: methodology, theory, technologies [In Russian]. St. Petersburg: Lan', 2019. 232 p.
- [27] **Palitsyn VK.** On the relationship between the concepts of “knowledge”, “information”, and “data” [In Russian]. *Nauka i innovacii*. 2018; 180: 44–49.
- [28] **Rozov MA.** Theory of social relay races and problems of epistemology [In Russian]. Smolensk: Smolensk city press, 2006. 439 p.
- [29] **Anokhin KV, Novoselov KS, Smirnov SK et al.** Artificial intelligence for science and science for artificial intelligence [In Russian]. *Questions of Philosophy*. 2022; 3: 93–105. DOI: 10.21146/0042-8744-2022-3-93-105.
- [30] **Kogan AB.** Fundamentals of the physiology of higher nervous activity: Textbook for biological specialists of universities [In Russian]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Higher School, 1988. 367 p.
- [31] **Saaty TL, Kearns KP.** Analytical planning: The organization of systems. Frankfurt: Pergamon Press. 1985. 208 p.
- [32] **Marutaev MA.** On the harmony of the world [In Russian]. *Questions of Philosophy*. 1994; 6: 71–81.
- [33] **Systems Analysis and decision making: A dictionary and reference book / Ed. by VN. Volkova and VN. Kozlov.** - Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 616 p.
- [34] **Romanova EV.** Information as a transitional state [In Russian]. Proc. of the XXV International scientific and educational-practical conference “System analysis in engineering and control”. St. Petersburg, 2021. Vol.3: 502–506.
- [35] **Volkova VN, Loginova AV, Maksimov MS.** Model of the state space of a mobile equilibrium [In Russian]. *Prospects of Science*. 2025; 2(185): 23–27.
- [36] **Maksimov MS, Volkova VN.** Development of the information support system for a territorial administration body [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 363-375. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-363-375.
- [37] **Kostyukovsky AG.** Cognitive-intellectual transformations in an open system [In Russian]. Proc. of the XXVIII International Scientific and Practical Conference “System analysis in engineering and control”. St. Petersburg, June 27–29, 2024. In 2 parts. Part 1. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2024: 303–315.

## About the authors

**Violetta Nikolaevna Volkova** (b. 1936) graduated from Taganrog Radio Engineering Institute in 1959 and completed her postgraduate studies at Moscow Power Engineering Institute in 1970. She holds a Candidate of Technical Sciences degree (1973) and a Doctor of Economic Sciences degree (1993). She is a Professor at the Higher School of Computer Technologies and Information Systems, SPbPU. She is an Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation and a member of the International Academy of Sciences of Higher Education. Her publication record includes more than 350 works (including 8 textbooks and 12 monographs) in the fields of systems theory and systems analysis. ORCID: 0000-0001-9658-5135; Author ID (RSCI): 73469; Author ID (Scopus): 57191609371; Researcher ID (WoS): Q-4085-2016. [violetta\\_volkova@list.ru](mailto:violetta_volkova@list.ru). ✉

**Aleksandra Viktorovna Loginova** (b. 1981) graduated from SPbPU in 2003 and received the degree of Candidate of Economic Sciences in 2007. She is an Associate Professor at the Higher School of Computer Technologies and Information Systems, SPbPU. Her list of scientific publications includes more than 120 works in the fields of systems theory and systems analysis, mathematical methods in economics, and information systems. ORCID: 0000-0002-7783-7795; Scopus ID: 57191619232; Author ID (RSCI): 493648; Researcher ID: M-6637-2014. [loginova\\_av@spbstu.ru](mailto:loginova_av@spbstu.ru).

**Elena Vladimirovna Romanova** (b. 1971) graduated from the Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics in 1993 and completed a Master's degree at RTU MIREA in 2017. She is a Senior Lecturer at the Plekhanov Russian University of Economics. She is a member of the Russian Association of Artificial Intelligence. Her list of scientific publications includes over 100 papers in the fields of information systems design and development, systems analysis, and project management. ORCID: 0000-0002-4933-9422; Author ID (RSCI): 166880; Author ID (Scopus): 57205186427. [Romanova.ev@rea.ru](mailto:Romanova.ev@rea.ru).

**Yuri Yuryevich Chernyy** (b. 1967) graduated from Komsomolsk-on-Amur Polytechnic Institute in 1992 and completed postgraduate studies at the Faculty of Philosophy of Lomonosov Moscow State University in 1997. He holds a Candidate of Philosophical Sciences degree (1998). He is Head of the Center for the Study of Informatics Problems at the Institute of Scientific Information on Social Sciences of the Russian Academy of Sciences. The list of scientific publications includes more than 120 works in the fields of philosophy of science and technology, history of science and technology, computer science, document management, and library science. ORCID ID 0000-0001-5790-9547; Author ID (RSCI): 17628; Author ID (Scopus): 57205017287. [yuri.chiorny@mail.ru](mailto:yuri.chiorny@mail.ru).

Received January 21, 2026. Revised March 14, 2026. Accepted March 25, 2026.

## ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-226-239



### Онтологическое моделирование нормативных знаний в строительной отрасли

© 2026, В.В. Грибова<sup>1</sup>, Д.В. Жданов<sup>2</sup>✉, Е.Е. Помников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (ИАПУ ДВО РАН), Владивосток, Россия

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), Владивосток, Россия

#### Аннотация

Исследуется применение онтологического моделирования для создания интеллектуальных систем управления нормативными знаниями в строительной отрасли в условиях цифровой экономики. Новизна исследования – в разработке и обосновании двухуровневой онтологической модели, формализующей структуру и содержательные зависимости строительных правил с учётом их логико-семантических связей. Предложен онтологический паттерн нормативных требований в машиночитаемом виде, обеспечивающий их интеграцию в цифровые сервисы. Модель включает формализацию сущностей, отношений, ограничений, а также правила перевода текстовых норм в элементы базы знаний. Практическая ценность работы показана на примере модели свода правил «Нагрузки и воздействия». Онтологическое представление позволяет автоматизировать поиск нормативных положений (например, выбор формул и коэффициентов в зависимости от параметров объекта) и выявлять взаимосвязи между ними. В качестве примера выполнен расчёт нагрузок для деревянного купольного здания в VII климатическом районе и показано, что предложенный подход обеспечивает подбор релевантных нормативных зависимостей. Поддержка принятия инженерных и управленческих решений выполняется за счёт автоматизированной проверки проектных решений на соответствие требованиям свода правил и предоставления рекомендаций. Полученные результаты показывают, что онтологический подход может создать основу для формирования «умных» документов и повышения качества управления нормативной информацией.

**Ключевые слова:** нормативные знания, онтологическое моделирование, проектная документация, свод правил, строительная отрасль.

**Цитирование:** Грибова В.В., Жданов Д.В., Помников Е.Е. Онтологическое моделирование нормативных знаний в строительной отрасли. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.226-239. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-226-239.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFWF-2026-0008).

**Вклад авторов:** Грибова В.В. – постановка задачи и оценка результатов; Жданов Д.В. – построение модели; Помников Е.Е. – проведение тестирования, обработка результатов.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Введение

Строительная отрасль претерпевает значительные изменения в условиях цифровой трансформации, что обуславливает необходимость разработки новых подходов к управлению знаниями и обработке нормативной документации (НД). Отмечается рост объёма и сложности НД, обусловленный появлением новых строительных материалов, технологий и методов проектирования [1-3]. В крупных проектах требуется одновременное применение

множества взаимосвязанной НД для обеспечения необходимого уровня согласованности требований, а существующая НД слабо структурирована, характеризуется множественностью интерпретаций и скрытыми противоречиями между различными её положениями [4].

Важное место в системе нормативного регулирования занимает свод правил (СП) «Нагрузки и воздействия», который оказывает влияние на формирование архитектурно-планировочных решений, проектирование инженерных сетей, разработку конструктивных элементов, и его выполнение обязательно при подготовке проектной документации (ПД).

Динамика изменений НД создаёт дополнительные риски отклонения проектов на стадии государственной экспертизы. Ситуация усложняется, когда несоответствие даже одного положения СП требует переработки пакета документов. Параллельная разработка различных разделов ПД разными проектными организациями может приводить к возникновению ошибок и противоречий.

Цель настоящей работы заключается в применении онтологического моделирования, обеспечивающего машиночитаемость НД и их интеграцию в системы автоматизированные проектирования для снижения рисков несоответствия ПД установленным требованиям.

## 1 Подходы к формализации нормативной документации

Основные сложности процесса создания ПД в строительной отрасли связаны с большим объёмом действующих НД (ГОСТ, СП) и необходимостью координации работы участников проектирования.

На рынке присутствуют инструменты, облегчающие доступ к нормативной информации:

- Техэксперт<sup>1</sup> предоставляет быстрый доступ к базе НД с возможностью интеграции в цифровую среду;
- Консультант Плюс<sup>2</sup>, Гарант<sup>3</sup> предоставляют решения для работы с нормативно-правовой базой;
- NormaCS<sup>4</sup> позволяет отслеживать изменения и проводить проверку актуальности ссылок в ПД.

Недостаток подобных систем – неспособность преодолеть разобщённости нормативных данных<sup>5</sup>.

Технологии информационного моделирования зданий (*Building Information Model, BIM*) позволяют создать цифровую модель объекта с детализацией по материалам, инженерным системам, стоимости и срокам строительства. Такие модели обеспечивают взаимодействие между участниками проекта (архитекторами, проектировщиками, строителями), но преимущественно используются на стадии проектирования, слабо связаны с этапами эксплуатации и не интегрированы в контуры цифрового документооборота и нормативной проверки [5]. Известны средства для автоматизации процессов управления техническим документооборотом:

- 1С: Документооборот – система автоматизации документооборота (<https://v8.1c.ru/doc8/>);
- ТЕЗИС – платформа корпоративного уровня на базе CUBA<sup>6</sup> для ведения документооборота (<https://www.tezis-doc.ru/>);
- Такском – оператор электронного документооборота (<https://taxcom.ru/>).

Эти системы позволяют формализовать процессы хранения, согласования и распределения строительной документации, но координация проектных работ между организациями-участниками остаётся недостаточной.

Разнородность программных решений, используемых разными проектными организациями, приводит к дублированию данных, сложностям в определении первоисточников информации и актуальных версий документов, корректных нормативных ссылок, а также к от-

<sup>1</sup> Техэксперт — профессиональная справочная система «Техэксперт». – <https://xn--e1aaougdegv4f.xn--80aswg/>.

<sup>2</sup> КонсультантПлюс — справочно-правовая система «КонсультантПлюс». – <https://www.consultant.ru/>.

<sup>3</sup> Гарант — информационно-правовая система «Гарант». – <https://www.garant.ru/>.

<sup>4</sup> NormaCS — единая база нормативов и стандартов. – <https://www.normacs.com/>.

<sup>5</sup> Горелова О.А. Проблемы технического нормирования в строительстве РФ. Единый реестр застройщиков. – <https://erzrf.ru/publikacii/problemy-tehnicheskogo-normirovaniya-v-stroitelstve-rf>.

<sup>6</sup> Платформа CUBA. Руководство по разработке приложений. – <https://doc.cuba-platform.com/manual-latest-ru/manual.html>.

сутствию эффективного взаимодействия между различными программными платформами. Анализ НД показывает значительные трудности, связанные с их обработкой. В [6, 7] отмечается сложность интерпретации НД из-за различий формальных языков и необходимости извлечения смысловых взаимосвязей между различными разделами НД.

В [8] рассматривается онтологическое моделирование для формализации знаний из НД, показана эффективность применения онтологий для автоматизированного анализа требований, отмечается недостаточность учёта контекстуальных связей между документами.

В [9] обоснована эффективность применения графов знаний (ГЗ) для систематизации строительных НД. В [10] представлены принципы построения и применения ГЗ в технических и правовых системах. Построение онтологий и ГЗ в значительной мере опирается на участие экспертов предметной области. Большие языковые модели (БЯМ) рассматриваются для [10, 11]: формирования компетентностных вопросов; разработки онтологии на основе этих вопросов; построения ГЗ с использованием разработанной онтологии; оценки полученного ГЗ с минимальным участием человека.

В [12] предложена методология, основанная на онтологическом подходе в сфере аддитивного строительства и включающая:

- формализацию набора модульных онтологий для отдельных доменов;
- разработку прототипа инструмента для документирования, который преобразует информацию и *ВМ* в ГЗ;
- интеграцию ГЗ с БЯМ для эффективного ответа на вопросы и извлечения знаний.

В [13, 14] рассмотрено применение машинного обучения и семантического анализа для поиска нормативных положений, отмечаются проблемы верификации и валидности автоматически извлекаемых знаний, а в [15] рассмотрены способы интеграции онтологических моделей с БЯМ для повышения точности анализа.

Постоянное обновление и увеличение количества стандартов ведёт к необходимости обработки НД. Стандарты типа [16] содержат сложные взаимосвязи между различными положениями, что делает их трудными для автоматического анализа. Цифровизация и переход на электронные формы НД [17] открывает возможности для их более быстрого и точного анализа с помощью автоматических систем [18].

Создание системы интеллектуального анализа НД отрасли с использованием онтологического паттерна и БЯМ и представление информации в форме ГЗ позволит повысить эффективность работы с НД [19]. Разработка стандартов является неотъемлемой частью Индустрии 4.0 [20, 21].

Приведённый обзор показывает, что существующий инструментарий ориентирован либо на информационный доступ, либо на частичную семантическую обработку данных, но не обеспечивает целостную формализацию логико-семантической структуры конкретного СП. Системы поиска нормативной информации ограничиваются навигацией и выдачей фрагментов текста, но не предназначены для выполнения расчётов на основе найденных требований.

## 2 Процесс разработки строительной документации

Процесс разработки строительной документации для объекта представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, каждый из которых имеет собственные задачи, регламентированные СП и стандартами. Эти этапы могут выполняться параллельно для сокращения общего срока создания объекта, что повышает риск возникновения несоответствий между разделами документации. Источником сложности является значительная длительность цикла разработки, в течение которого строительные нормы могут изменяться несколько раз [22, 23]. Разработка документации включает следующие этапы:

- 1) проведение инженерных изысканий (определяются исходные данные о геологии, гидрологии, климате и других условиях участка строительства; результаты этапа влияют на расчёт нагрузок и выбор конструктивных решений);
- 2) подготовка генерального плана (формируется размещение объекта и инфраструктуры на участке с учётом норм зонирования, санитарных и экологических требований; этап связан с архитектурными, инженерными и эксплуатационными параметрами проекта);
- 3) подготовка объёмно-планировочных решений (определяются форма, размеры и функциональное зонирование здания, закладывается основа для конструктивных и инженерных решений);
- 4) подготовка конструктивных решений объекта (разрабатывается несущая система здания с учётом нагрузок и воздействий: ветровых, снеговых, сейсмических и др.; этап критически зависит от актуальной редакции СП «Нагрузки и воздействия»);
- 5) подготовка документации по инженерным сетям (проектируются системы водоснабжения, канализации, электроснабжения и др.; требуется согласование с архитектурными решениями и расчётами нагрузок в сетях);
- 6) корректировки после государственной экспертизы (вносятся изменения в проект по результатам обязательной проверки на соответствие нормам; этап может включать перерасчёт нагрузок при выявлении несоответствий);
- 7) корректировки в ходе строительства возникают из-за изменений условий на площадке, материалов или требований заказчика.

На рисунке 1 представлена последовательность этапов разработки строительной документации для объекта. Выделены этапы актуализации документации в данном процессе.

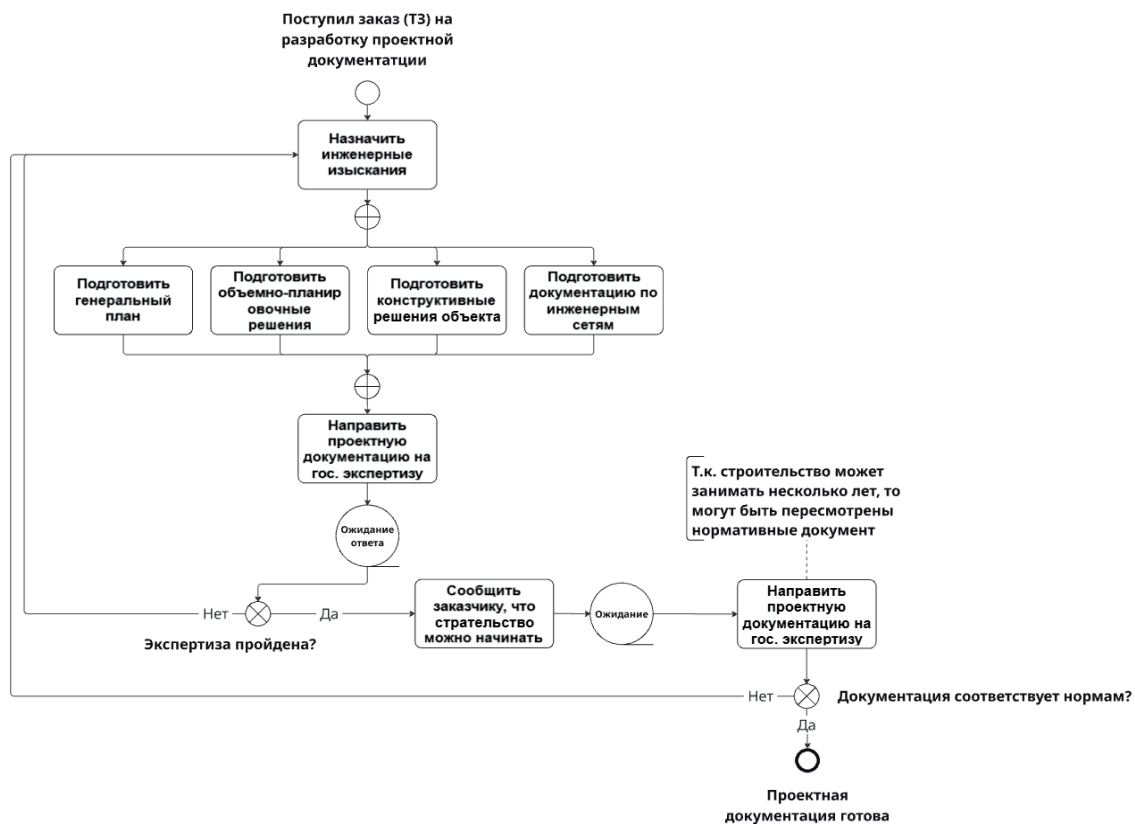


Рисунок 1 – Этапы разработки и актуализации строительной документации проектной организацией

ПД должна оставаться актуальной в течение всего периода подготовки и строительства, который может составлять несколько лет.

При разработке строительной документации применяются различные СП.

- 1) СП «Инженерные изыскания для строительства» определяет требования к проведению геологических, гидрологических и др. исследований. Данный СП:
  - связан с СП «Нагрузки и воздействия» (данные изысканий используются для расчёта несущих конструкций с учётом возможных природных и техногенных нагрузок);
  - взаимодействует с СП «Инженерные сети» (инженерные изыскания необходимы для правильного проектирования коммуникаций и инженерных сетей).
- 2) СП «Нагрузки и воздействия» устанавливает нормы расчётных нагрузок на строительные конструкции. Данный СП:
  - тесно связан с СП «Архитектурно-планировочные решения» (требования к прочности зданий должны учитываться при выборе архитектурных решений);
  - влияет на СП «Инженерные сети» (нагрузки на сети и коммуникации зависят от конструкции здания).
- 3) СП «Архитектурно-планировочные решения» регламентирует требования к проектированию зданий, их функциональности, эргономике и безопасности. Данный СП:
  - связан с СП «Инженерные сети» (размещение инженерных систем должно учитывать планировку здания);
  - влияет на СП «Инженерные изыскания» (тип здания определяет необходимость дополнительных изысканий, например, сейсмических).
- 4) СП «Инженерные сети» устанавливает нормы проектирования систем водоснабжения, водоотведения, электроснабжения и других инженерных коммуникаций. Данный СП:
  - взаимодействует с СП «Нагрузки и воздействия» (инженерные сети должны выдерживать соответствующие нагрузки);
  - связан с СП «Архитектурно-планировочные решения» (системы должны быть встроены в общую планировочную концепцию здания).

Кроме указанных используются и другие СП и ГОСТы, например:

- СП «Пожарная безопасность зданий и сооружений» регулирует требования к огнестойкости конструкций и путям эвакуации, связан с СП «Архитектурно-планировочные решения»;
- ГОСТ 21.101-2020 «Основные требования к проектной и рабочей документации» определяет стандарты оформления ПД, связан со всеми основными СП;
- ГОСТ 27751-2014 «Надёжность строительных конструкций и оснований» используется при расчёте прочности конструкций, связан с СП «Нагрузки и воздействия».

Пример взаимосвязей между документами показан на рисунке 2.

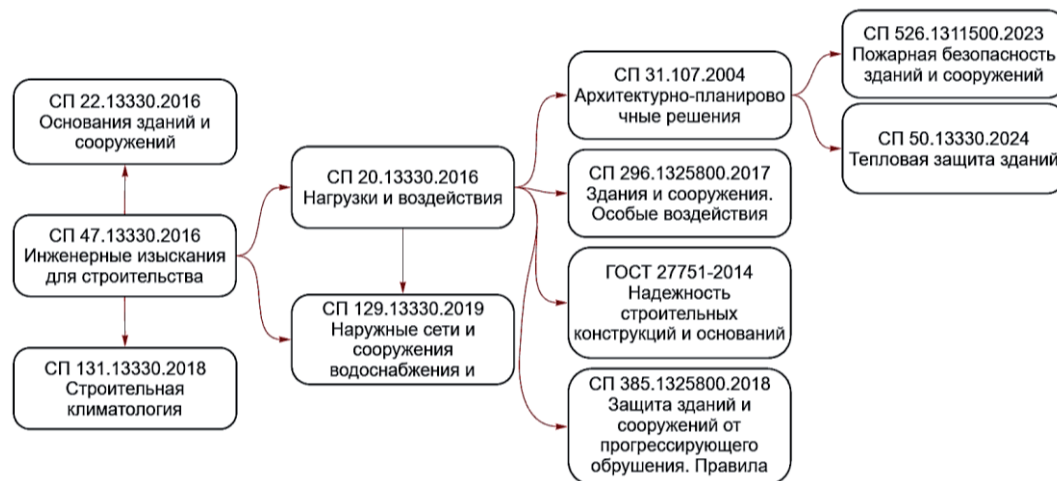


Рисунок 2 – Пример связей строительных правил и других документов

### 3 Требования к онтологии сводов правил

В исследовании использован СП «Нагрузки и воздействия» [24], который регламентирует виды нагрузок и воздействий, их расчётные значения, а также методы их определения с учётом различных факторов (климатические условия, высота и конструктивные особенности зданий и сооружений и др.). СП включает классификацию нагрузок (постоянные, временные,

особые), формулы и коэффициенты для расчёта, а также ограничения, обеспечивающие надёжность и безопасность строительных объектов. СП предоставляет методики расчёта, которые необходимы для точного представления знаний и построения семантической модели. Информация из СП использована для формирования сущностей, их атрибутов и логических связей в разрабатываемой онтологии.

Каждый СП имеет определённую структуру, которая включает:

- общие положения – вводные разделы, описывающие область применения и основные принципы;
- технические требования – конкретные нормы, параметры и ограничения, обязательные для выполнения;
- методики расчёта – формулы, таблицы и алгоритмы, используемые для определения нагрузок, материалов или других характеристик;
- приложения – дополнительные данные, примеры расчётов, региональные особенности.

Эти элементы влияют на сущности и отношения, которые включаются в онтологию.

Например, для рассматриваемого СП ключевыми сущностями являются типы нагрузок, их характеристики и зависимости от внешних условий.

СП содержат ссылки на другие НД, что требует учёта:

- взаимосвязей между документами, включая ссылки на ГОСТы и другие СП;
- иерархий нормативных требований, где одни правила являются общими, а другие уточняющими;
- версий документов, так как СП периодически обновляются, что может изменять состав требований.

В онтологии должны учитываться разные типы данных:

- качественные данные – описания, термины, определения;
- количественные данные – числовые параметры, пределы, формулы;
- логические зависимости – условия и ограничения, например, «нагрузка применяется только к зданиям высотой до 50 м».

СП ориентированы на практическое использование, что влияет на состав онтологии:

- цели использования – проектирование, проверка соответствия, расчёты, обучение;
- интерпретация правил – онтология должна учитывать вариативность формулировок.

При формировании онтологии учитываются:

- принципы семантической ясности – сущности и их отношения должны быть понятными и не допускать двусмысленности;
- гранулярность – уровень детализации сущностей и их связей (например, нагрузка может быть описана как «ветровая» или конкретизирована с указанием расчётных параметров);
- поддержка автоматизации – онтология должна быть пригодной для работы в системах автоматизированных расчётов и анализа.

Каждый СП имеет особенности, которые должны быть учтены в онтологии:

- область применения – жилые здания, промышленные объекты, инженерные сооружения;
- региональные особенности – климатические зоны, сейсмические параметры, материалы;
- комплексность норм – наличие сложных взаимосвязей между требованиями, таких как зависимость нагрузок от нескольких факторов (ветровой район, высота здания и др.).

СП периодически обновляются, поэтому онтология должна быть:

- адаптивной, т.е. поддерживать обновления с минимальными затратами;
- версионной, т.е. сохранять возможность работы с различными версиями документов, если они используются в конкретных проектах.

Для создания онтологии должны быть определены входные параметры, которые влияют на состав НД и его содержание (формулы или значения величин, необходимые для расчёта нагрузок).

#### 4 Онтология свода правил

Разработана двухуровневая онтологическая модель, которая состоит из:

- базового уровня, включающего универсальные сущности (типы нагрузок, характеристики материалов, зависимости от климатических и региональных факторов и др.);
- предметного уровня, на котором детализируются требования СП, описываются конкретные сущности, методы расчёта и ограничения, указанные в документе.

На рисунке 3 приведён фрагмент онтологии СП. Здесь символ  $\rightarrow$  отражает структурную связность между орграфами моделей онтологий; символ  $\updownarrow$  – терминологическую связность между вершинами орграфов моделей онтологий, а также между вершинами орграфов целевой информации. Символ  $*$ , стоящий рядом с меткой вершины, означает, что эта метка заимствуется некоторым множеством вершин. Символ  $\ll$  означает, что в вершину рядом с меткой, которой он отображается, входит более одной дуги. Вершина такой дуги может принадлежать как этому, так и другому орграфу.

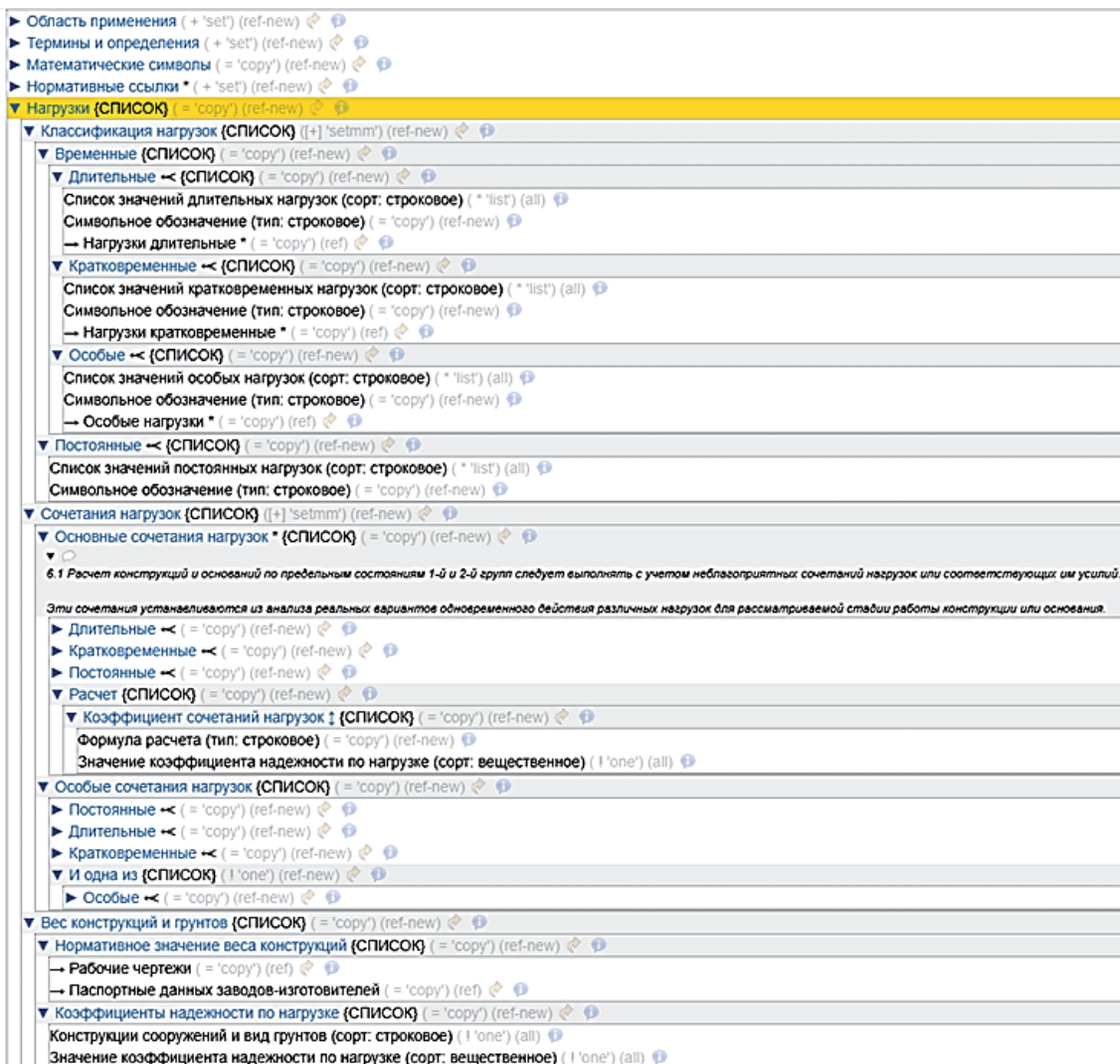


Рисунок 3 – Онтология свода правил (фрагмент)

{СПИСОК} обозначает, что соответствующий узел метауровня порождает в целевом орграфе совокупность однотипных информационных единиц. Семантически это конструкция множественной вложенности: элемент может повторяться произвольное число раз и формирует агрегированную структуру (контейнер) для подчинённых экземпляров.

(= 'copy') создаёт правило копирования структуры метаузла в целевой орграф без изменения типа связи. При генерации информационной базы соответствующий фрагмент метаописания транслируется в результирующий граф с сохранением структурных характеристик. Используется для тиражирования типовой структуры.

(+ 'set') определяет множественное включение элементов без фиксированного порядка. В отличие от простой копии, данная разметка подчёркивает семантику множества: допускается добавление нескольких экземпляров сущностей одного типа, каждый экземпляр является самостоятельным элементом целевого графа.

(ref-new) указывает на создание нового экземпляра информационной единицы с одновременным формированием ссылки на него. В целевом орграфе генерируется новый узел, который получает собственную идентичность, и устанавливается ссылка из исходного контекста (контролируемое порождение новых сущностей).

(ref) задаёт правило ссылочного включения без создания нового экземпляра. В результирующем графе формируется ссылка на существующую информационную единицу. Данная разметка обеспечивает повторное использование сущностей и поддержание связности графа без дублирования данных.

(! 'one') фиксирует ограничение «ровно один». При формировании целевого орграфа допускается единственный экземпляр соответствующей информационной единицы в заданном контексте. Это средство задания обязательных и уникальных атрибутов или связей в структуре модели.

(all) задаёт правило полного распространения связи или свойства на все допустимые элементы соответствующего класса в пределах заданного контекста. В терминах двухуровневой модели это означает, что при генерации целевого орграфа связь формируется не с одним и не с подмножеством элементов, а со всеми экземплярами сущностей, удовлетворяющими условиям метаописания.

(\* 'list') задаёт правило формирования множественной структуры с сохранением порядка следования элементов. Это означает, что соответствующий метаузел порождает в целевом орграфе последовательность экземпляров информационных единиц, для которых существенна позиционная организация.

Прочие присутствующие в орграфах моделей онтологий разметки ([=] 'sorumm'), ([!] 'onemmm'), ([=] 'setmm'), (~'proxy'), (new), (clone) и т.д. задают правила формирования орграфов целевых информационных баз и справочников. Семантика данной разметки описана в [25, 26].

Для создания онтологии, основанной на СП, учтены основные компоненты и их характеристики, которые являются важными для применения НД в проектировании.

СП классифицирует нагрузки, которые должны быть представлены в онтологии:

- *постоянные нагрузки*: вес несущих конструкций, отделочных и облицовочных материалов, постоянные технологические нагрузки;
- *временные нагрузки*: кратковременные (например, снеговые и ветровые нагрузки), длительные (например, нагрузка от оборудования);
- *особые нагрузки*: сейсмические, взрывные, аварийные.

Климатические параметры влияют на расчёты нагрузок и должны быть учтены в онтологии. Это: снеговой район, ветровой район, температурные параметры (сезонные и суточные колебания температуры), климатические зоны для расчёта обледенения и осадков.

Конструктивные элементы должны быть учтены с соответствующими параметрами:

- материалы (бетон, сталь, дерево и их физико-механические характеристики);
- размеры элементов (толщина, длина, ширина);
- геометрическая форма конструкций;
- способ опирания и закрепления.

Онтология должна содержать параметры, которые учитываются при расчётах.

- 1) коэффициенты надёжности по нагрузке.
- 2) коэффициенты сочетания нагрузок.
- 3) поправки на нестандартные условия эксплуатации.
- 4) логические зависимости между нагрузками:
  - сочетание нагрузок: сочетания постоянных, временных и особых нагрузок;
  - зависимости между нагрузками и характеристиками конструкции (например, влияние температуры на прочность материалов).
- 5) сценарии применения:
  - условия нормальной эксплуатации;
  - особые условия эксплуатации (например, при реконструкции или капитальном ремонте).
- 6) географическая привязка:
  - карты ветровых и снеговых районов, привязка к регионам;
  - зоны сейсмической активности.
- 7) формулы и методики расчётов:
  - расчётные формулы для каждого типа нагрузок;
  - примерные значения нагрузок для типовых случаев;
  - уравнения зависимости нагрузки от климатических или конструктивных факторов.
- 8) нормативные ограничения и пределы:
  - максимальные и минимальные значения нагрузок для разных конструкций;

- ограничения на допустимые деформации.
- 9) атрибуты временных нагрузок:
  - продолжительность действия нагрузки;
  - частота появления (например, для аварийных нагрузок).
- 10) ссылки на нормативы и таблицы:
  - указания на таблицы и приложения СП, которые содержат уточнения и дополнительные параметры;
  - ссылки на другие документы (например, СП, не утратившие актуальность НД).

Связи между перечисленными сущностями в онтологии заданы явно и отражают нормативные зависимости, присутствующие в СП. В частности, расчётные формулы связаны с типами нагрузок и условиями их применения, а также с климатическими и конструктивными параметрами. Такое представление позволяет перейти от текстового описания нормативных требований к их формализованной обработке. Использование модели делает возможным автоматизированное определение применимых нормативных положений на основе заданных условий проектирования (тип конструкции, регион строительства, вид нагрузки и т.д.).

Формализация таких зависимостей снижает неоднозначность интерпретации требований и обеспечивает их согласованное применение с учётом контекстных связей между параметрами и расчётными схемами.

## 5 База знаний на основе свода правил

В качестве примера выполнены расчёты устойчивости и напряжённо-деформированного состояния купольного здания. Материал конструкции – дерево, здание находится в VII климатическом районе. С использованием технологии извлечения структур из текста построена база знаний (БЗ) с расчётами нагрузок (см. рисунок 4). БЗ представляет собой формальную модель СП «Нагрузки и воздействия» в виде ГЗ, включающую:

- таксономию сущностей (типы нагрузок, конструктивные элементы, материалы, расчётные ситуации и др.);
- систему отношений между ними;
- набор формул и вычислительных правил, связывающих параметры из текстов НД с математическими выражениями;
- аксиомы и ограничения, обеспечивающие непротиворечивость знаний.

Особенностью разработанной БЗ является её структура, построенная по принципу «мета-модель – предметное наполнение». Верхний уровень (мета-онтология) содержит универсальный онтологический паттерн, который определяет типы сущностей, отношений и правил вывода. Нижний уровень содержит фактическое наполнение, то есть экземпляры сущностей, конкретные значения параметров и формульные зависимости. Благодаря такому разделению логический вывод и механизмы семантической обработки используются на уровне мета-модели и не зависят от конкретного содержания документа. Это означает, что при изменении нормативной базы (обновлении СП) достаточно модифицировать предметное наполнение БЗ, не затрагивая программный код, реализующий алгоритмы анализа, проверки и расчёта.

## Заключение

В работе использована концепция, основанная на применении онтологического моделирования и машинно-понимаемых документов. Разработанный подход позволяет осуществить формализацию нормативных знаний, структурировать взаимосвязи между требованиями различных документов и создать основу для семантического поиска и анализа данных.

Разработка и интеграция онтологических моделей в системы автоматизированного проектирования представляется важным направлением цифровой трансформации строительной

отрасли. Реализация данного подхода позволит ускорить подготовку документации, уменьшить риски несоответствия ПД нормативным требованиям, перейти к новому уровню управления нормативными знаниями и повысить качество проектных работ.

Нормативные ссылки (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

- Список ГОСТ-ов (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
  - ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
  - Термины применены согласно ГОСТ 27751 (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
- Список СП (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
  - СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
  - СП 14.13330.2018 "СНиП II-7-81" Строительство в сейсмических районах" (с изменениями № 2, № 3) (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
  - СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с изменениями № 1, № 2, № 3) (тип: строковое) ←
  - СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
- Архитектурные решения (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
  - Основные характеристики района строительства (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - Снеговой район ← (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Район VIII (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - Сейсмичность ← (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Расчетная сейсмичность района (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
        - 9 (тип: целое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Категория грунта ← (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
        - 3 (тип: целое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Расчетная сейсмичность площадки строительства (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
        - 10 (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - СП 14.13330.2018 "СНиП II-7-81" Строительство в сейсмических районах" (с изменениями № 2, № 3) (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
  - Основные характеристики здания (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с изменениями № 1, № 2, № 3) (тип: строковое) ←
    - ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - Тип объекта (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Купольное здания Z10HL (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - Этажность (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Наличие цокольного этажа (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
        - false (тип: логическое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - 2 (тип: целое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - Весовые данные установки здания Z10 ← (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Здание без второго этажа, кг (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
        - 8700.0 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Балки и настил второго этажа, кг ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
        - 11880.0 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
- Нагрузки (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
  - Классификация нагрузок (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
  - Временные (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - Длительные (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Вес нагрузки на балки пола второго этажа (Load), временное загрузеие (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
        - Балки и настил второго этажа, кг ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
    - Кратковременные (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
      - Снеговые (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
        - Нормативное значение снеговой нагрузки, п.10 (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
          - коэффициент сноса снега для купольных зданий (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
            - 0.85 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
            - СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
          - термический коэффициент (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
            - 1.0 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
            - СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
          - коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, принимаемый в соответствии с 10.4 (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
            - вес снегового покрова на 1 м²2 (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
              - Район-значение (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
                - Снеговой район ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
                  - 5.6 (тип: вещественное) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
                  - кН/м²2 (тип: строковое) (= 'copy') (ref-new) ⓘ
              - СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (тип: строковое) ← (= 'copy') (ref-new) ⓘ
            - Расчетное значение (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new) ⓘ

Рисунок 4 – Сформированная база знаний (фрагмент)

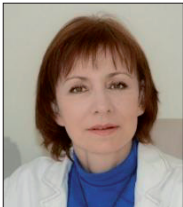
## Список источников

- [1] Каган П.Б., Бабушкин Е.С. Перспективы применения цифровых стандартов в строительстве. *Строительное производство*. 2023. № 2. С.106-110. DOI: 10.54950/26585340\_2023\_2\_106.

- [2] **Васильева Н.В., Бачуринская И.А.** Проблемные аспекты цифровизации строительной отрасли. *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2018. №7. С.39-46. DOI: 10.24411/2412-2025-2019-00041.
- [3] **Каган П.Б., Бабушкин Е.С.** Методика формирования цифровых нормативно-технических документов в строительстве. *Строительство и архитектура*. 2023. №4. С.29-29. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-29-29.
- [4] **Четыркина Н.Ю., Четыркина Е.Д., Стародубцева Н.Ю.** Перспективы применения смарт-стандартов на промышленном предприятии. *Общество: политика, экономика, право*. 2022. №5. С.60-65. DOI: 10.24158/per.2022.5.8
- [5] **Esetova A.M., Ismailova S.T., Emirbekova D.R.** Managing the information potential of a construction company in the transition to a digital economy. *Revista ESPACIOS*. 2019. Vol.40(14), 28.
- [6] **Kabzhan Z., Shakhnovich A., Shogelova N., Glyzno Y., Gorshkov S., Gorshkov F.** Semantic and ontology-based analysis of regulatory documents for construction industry digitalization. *Frontiers in Built Environment*. 2025. Vol. 11. Article 1575913. DOI: 10.3389/fbuil.2025.1575913.
- [7] **Abduladem A., Taha O., Dhavalkumar T.** A Semantic Knowledge-Based Framework for Information Extraction and Exploration, *International Journal of Decision Support System Technology*, Volume 13, Issue 2, 2021, DOI: 10.4018/IJDSST.2021040105.
- [8] **Муромцев Д.И., Шилин И.А., Плюхин Д.А., Баймуратов И.Р., Хайдарова Р.Р., Дементьева Ю.Ю., Ожигин Д.А., Малышева Т.А.** Построение графов знаний нормативной документации на основе семантического моделирования и автоматического извлечения терминов. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. №2. С.256-266. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-256-266.
- [9] **Peng J., Liu X.** Automated code compliance checking research based on BIM and knowledge graph. 2023. Vol.13(1). P. 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-023-34342-1.
- [10] **Kommineni V.K., König-Ries B., Samuel S.** From human experts to machines: An LLM supported approach to ontology and knowledge graph construction. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2403.08345.
- [11] **Li C., Petzold F.** Ontology-Driven Mixture-of-Domain Documentation: A backbone approach enabling question answering for additive construction. *Buildings*. 2025. T.15, №1. Article 133. DOI: 10.3390/buildings15010133.
- [12] **Mat A., Patrick B., Elizabeth C., Thomas G.** A Machine Learning Framework for Legal Document Recommendations. *Journal of Computer Science and Artificial Intelligence*. 2024. Vol.1(1). P.17-23. DOI:10.54097/omy1t737.
- [13] **Bommarito M.J., Katz D.M., Detterman E.M.** LexNLP: Natural language processing and information extraction for legal and regulatory texts. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1806.03688.
- [14] **Gui H., Bertaglia T., Annabell T., Goanta C., Dooper T., Spanakis G.** Evaluating LLM-Generated Legal Explanations for Regulatory Compliance in Social Media Influencer Marketing. 2025. Vol.4(2). P.956–971 DOI: 10.48550/arXiv.2510.08111.
- [15] **Миролюбова С.Ю.** Правовые онтологии в машиночитаемом формате – инструмент продвижения юридических знаний в семантической сети. *Мониторинг правоприменения*. 2022. №1. С.39-45. DOI: 10.21681/2226-0692-2022-1-39-45.
- [16] СП 539.1325800.2024 Научно-техническое сопровождение инженерных изысканий, проектирования и строительства. Общие положения. М.: Минстрой России, 2024.
- [17] ГОСТ Р 1.5-2021. Система стандартов проектирования. Требования к структуре и оформлению нормативных документов. М.: Стандартинформ, 2021.
- [18] **Травуш В.И., Гурьев В.В., Дмитриев А.Н., Дорофеев В.М., Волков Ю.С.** О концепции развития нормативно-технической базы строительных объектов в период их эксплуатации. *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. №1. С.121-133. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-1-121-133.
- [19] **Михеев Д. В.** Состояние нормативной базы технического регулирования строительства и задачи её развития. *Жилищное строительство*. 2016. №6. С.3-7.
- [20] **Степанов А.В., Матвеева М.В., Пешкова Е.С.** Цифровизация строительной отрасли: перспективы и вызовы. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2024. №2. С.356-366. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-2-356-366.
- [21] **Куделина А.А., Порошин А.А.** Перспективы развития стандартизации для Индустрии 4.0. *Вестник РХТУ им. Д.И. Менделеева*. 2020. №1. С.22-28.
- [22] СНиП 1.04.03–85. Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений. М.: Госстрой СССР, 1991.
- [23] СП 48.13330.2019. Организация строительства. М.: Минстрой России, 2019.
- [24] СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85. М.: Минстрой России, 2016.
- [25] **Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M., Timchenko V.A.** A Two-level model of information units with complex structure that correspond to the questioning metaphor. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2015. Vol.49(5). P.172-181. DOI: 10.3103/S0005105515050052.

- [26] *Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M., Timchenko V.A.* A Model for generation of directed graphs of information by the directed graph of metainformation for a two-level model of information units with a complex structure. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2015. Vol.49(6). P.221-231. DOI: 10.3103/S0005105515060059.

## Сведения об авторах



**Грибова Валерия Викторовна**, 1965 г. рождения. Окончила Ленинградский политехнический институт по специальности «Прикладная математика» в 1989 г. Заместитель директора по научной работе, научный руководитель лаборатории интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН, д.т.н. (2008), чл.-корр. РАН (2022). Научные интересы: онтологии и базы знаний, прикладные и проблемно-ориентированные системы, основанные на знаниях, управление базами знаний. В списке научных трудов более 300 работ. AuthorID (РИНЦ): 7400; ORCID: 0000-0001-9393-351X; AuthorID (Scopus): 7801667631; ResearcherID (WoS): Q-4250-2016. [gribova@iacp.dvo.ru](mailto:gribova@iacp.dvo.ru).

**Жданов Данил Викторович**, 1998 г. рождения. Окончил магистратуру в ДВФУ по специальности «Прикладная математика и информатика» в 2023 г. Аспирант ДВФУ по направлению 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика. AuthorID (РИНЦ): 6148-6753; ORCID: 0009-0002-6642-110X. [zhdanov.dv@dvfu.ru](mailto:zhdanov.dv@dvfu.ru) ✉.



**Помников Егор Евгеньевич**, 1987 г. рождения. К.т.н. (2012), профессор департамента морских арктических технологий Политехнического института ДВФУ, заведующий лабораторией ледовых исследований ДВФУ. AuthorID (РИНЦ): 626433; ORCID: 0000-0003-2165-3038; AuthorID (Scopus): 36458831000. [pomnikov.ee@dvfu.ru](mailto:pomnikov.ee@dvfu.ru)



Поступила в редакцию 10.11.2025, после рецензирования 23.03.2026. Принята к публикации 11.04.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-226-239

## Ontological modeling of regulatory knowledge in the construction industry

© 2026, V.V. Gribova<sup>1</sup>, D.V. Zhdanov<sup>2</sup>✉, E.E. Pomnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute for Automation Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok, Russia*

<sup>2</sup> *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

### Abstract

This paper explores the application of ontological modeling for the development of intelligent regulatory knowledge management systems in the construction industry in the context of the digital economy. The novelty of this study lies in the development and validation of a two-level ontological model that formalizes the structure and substantive dependencies of construction regulations with consideration of their logical and semantic relationships. An ontological pattern of regulatory requirements in machine-readable form is proposed, enabling their integration into digital services. The model includes formalization of entities, relationships, constraints, as well as rules for transforming textual regulations into knowledge base elements. The practical significance of this work is demonstrated through the example of an ontology model for the code of practice "Loads and Actions". The ontological representation makes it possible to automate the search of regulatory provisions (for example, the selection of formulas and coefficients depending on object parameters) and to identify relationships between them. As an example, load calculations were performed for a wooden dome-shaped building located in Climatic Region VII, demonstrating that the proposed approach ensures the selection of relevant regulatory dependencies. Support for engineering and managerial decision-making is achieved through automated verification of design solutions for compliance with code requirements and through the provision of recommendations.

The obtained results demonstrate that the ontological approach can provide a foundation for the development of "smart" documents and for improving the quality of regulatory information management.

**Keywords:** regulatory knowledge, ontological modeling, design documentation, code of practice, construction industry.

**For citation:** Gribova VV, Zhdanov DV, Pomnikov EE. Ontological modeling of regulatory knowledge in the construction industry [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 226-239. DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-2-226-239.

**Financial Support:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute for Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (project No. FFW-2026-0008).

**Authors' contributions:** Gribova V.V. – problem statement and evaluation of results; Zhdanov D.V. – model development; Pomnikov E.E. – testing and processing of results.

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

## List of figures

Figure 1 – Stages of development and updating of construction documentation by a design organization

Figure 2 – Example of relationships between construction regulations and other Documents

Figure 3 – Ontology of the code of practice (fragment)

Figure 4 – Generated knowledge base (fragment)

## References

- [1] **Kagan PB, Babushkin ES.** Prospects for Digital Standards in Construction [In Russian]. *Construction Production*. 2023; (2): 106–110. DOI: 10.54950/26585340\_2023\_2\_106.
- [2] **Vasilieva NV, Bachurinskaya IA.** Problematic Aspects of the Digitalization of the Construction Industry [In Russian]. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2018; (7): 39–46. DOI: 10.24411/2412-2025-2019-00041.
- [3] **Kagan PB, Babushkin ES.** The first practice of implementing digital normative and technical documents in construction [In Russian]. *Construction and Architecture*. 2023; (4): 29. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-29-29.
- [4] **Chetyrkina NYu, Chetyrkina ED, Starodubtseva NYu.** Possibilities of employment smart standards at production enterprise [In Russian]. *Society: Politics, Economics, Law*. 2022; (5): 60–65. DOI: 10.24158/pep.2022.5.8.
- [5] **Esetova A.M., Ismailova S.T., Emirbekov D.R.** Managing the information potential of a construction company in the transition to a digital economy. *Revista ESPACIOS*. 2019. Vol.40(14), 28.
- [6] **Kabzhan Z., Shakhovich A., Shogelova N., Glyzno Y., Gorshkov S., Gorshkov F.** Semantic and ontology-based analysis of regulatory documents for construction industry digitalization. *Frontiers in Built Environment*. 2025; 11: 1575913. DOI: 10.3389/fbuil.2025.1575913.
- [7] **Abduladem A, Taha O, Dhavalkumar T.** A Semantic Knowledge-Based Framework for Information Extraction and Exploration, *International Journal of Decision Support System Technology*, 2021; 13(2). DOI: 10.4018/IJDSST.2021040105.
- [8] **Mouromtsev DI, Shilin IA, Pliukhin DA, Baimuratov IR, Khaydarova RR, Demytyeva YuYu, Ozhigin DA, Malysheva TA.** Building knowledge graphs of regulatory documentation based on semantic modeling and automatic term extraction [In Russian]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2021; (2): 256-266. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-256-266.
- [9] **Peng J, Liu X.** Automated code compliance checking research based on BIM and knowledge graph. 2023; 13(1): 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-023-34342-1.
- [10] **Kommineni VK, König-Ries B, Samuel S.** From Human Experts to Machines: An LLM-Supported Approach to Ontology and Knowledge Graph Construction 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2403.08345.
- [11] **Li C, Petzold F.** Ontology-Driven Mixture-of-Domain Documentation: A Backbone Approach Enabling Question Answering for Additive Construction. *Buildings*. 2025; 15(1): Article 133. DOI: 10.3390/buildings15010133.
- [12] **Mat A, Patrick B, Elizabeth C, Thomas G.** A Machine Learning Framework for Legal Document Recommendations. *Journal of Computer Science and Artificial Intelligence*. 2024; 1(1): 17-23. DOI:10.54097/omy1t737.
- [13] **Bommarito MJ, Katz DM, Detterman EM.** LexNLP: Natural language processing and information extraction for legal and regulatory texts. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1806.03688.
- [14] **Gui H, Bertaglia T, Annabell T, Goanta C, Dooper T, Spanakis G.** Evaluating LLM-Generated Legal Explanations for Regulatory Compliance in Social Media Influencer Marketing. 2025; 4(2): 956–971. DOI: 10.48550/arXiv.2510.08111.

- [15] **Mirolyubova SYu.** Legal Ontologies in machine-readable format: a tool for navigating legal knowledge on the semantic web [In Russian]. *Law Enforcement Monitoring*. 2022; (1): 39–45. DOI: 10.21681/2226-0692-2022-1-39-45.
- [16] CoP 539.1325800.2024. Scientific and Technical Support for Engineering Surveys, Design, and Construction. General Provisions [In Russian]. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2024.
- [17] GOST R 1.5-2021. System of Standards for Design. Requirements for the Structure and Formatting of Normative Documents [In Russian]. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2021.
- [18] **Travush VI, Guryev VV, Dmitriev AN, Dorofeev VM, Volkov YuS.** On the Concept of Development of the Regulatory and Technical Base of Construction Objects during their Operation [In Russian]. *Academia. Architecture and Construction*. 2021; (1): 121–133. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-1-121-133.
- [19] **Mikheev DV.** State of the normative framework for technical regulation in construction and tasks for its development. *Housing Construction*. 2016; (6). P. 3-7.
- [20] **Stepanov AV, Matveeva MV, Peskova ES.** Digitalization of the construction industry: prospects and challenges. *Izvestia Vuzov. Investments. Construction. Real Estate*. 2024; (2): 356-366. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-2-356-366.
- [21] **Kudelina AA, Poroshin AA.** Prospects for the Development of Standardization for Industry 4.0 [In Russian]. *Bulletin of Mendeleev University of Chemical Technology of Russia*. 2020; (1): 22–28.
- [22] BCaR 1.04.03-85. Norms of construction duration and progress in the construction of enterprises, buildings and structures [In Russian]. Moscow: State Construction Committee of the USSR (Gosstroy USSR), 1991.
- [23] CoP 48.13330.2019. Organization of construction [In Russian]. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2019.
- [24] CoP 20.13330.2016 «Loads and Actions». Updated Edition of BCaR 2.01.07-85 [In Russian]. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2016.
- [25] **Gribova VV, Kleshchev AS, Moskalenko FM, Timchenko VA.** A Two-level Model of Information Units with Complex Structure that Correspond to the Questioning Metaphor. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2015; 49(5): 172-181. DOI: 10.3103/S0005105515050052.
- [26] **Gribova VV, Kleshchev AS, Moskalenko FM, Timchenko VA.** A Model for Generation of Directed Graphs of Information by the Directed Graph of Metainformation for a Two-Level Model of Information Units with a Complex Structure. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2015; 49(6): 221-231. DOI: 10.3103/S0005105515060059.

## About the authors

**Valeriya Viktorovna Gribova** (b. 1965) graduated from Leningrad Polytechnic Institute with a degree in Applied Mathematics (1989), Deputy Director for Research, Scientific Supervisor of the Intelligent Systems Laboratory at Institute for Automation and Control Processes of the FEB RAS; Doctor of Technical Sciences (2008), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (2022). The scientific interests include ontologies and knowledge bases, applied and domain-oriented knowledge-based systems, and knowledge base management. There are more than 300 works in the list of scientific papers. Author ID (RSCI): 7400; ORCID: 0000-0001-9393-351X; Author ID (Scopus): 7801667631. [gribova@iacp.dvo.ru](mailto:gribova@iacp.dvo.ru)

**Danil Viktorovich Zhdanov** (b. 1998) graduated from the master's program at Far Eastern Federal University in Applied Mathematics and Informatics in 2023. Postgraduate student at Far Eastern Federal University (FEFU) in the field 2.3.1. "Systems Analysis, Control and Information Processing, Statistics". AuthorID (РИНЦ): 6148-6753; ORCID: 0009-0002-6642-110X. [zhdanov.dv@dvfu.ru](mailto:zhdanov.dv@dvfu.ru) ✉

**Egor Evgenyevich Pomnikov** (b. 1987) Candidate of Technical Sciences (2012), Professor at the Department of Marine Arctic Technologies, Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University, and Head of the Ice Research Laboratory, FEFU. AuthorID (РИНЦ): 626433; ORCID: 0000-0003-2165-3038; AuthorID (Scopus): 36458831000. [pomnikov.ee@dvfu.ru](mailto:pomnikov.ee@dvfu.ru)

Received November 10, 2025. Revised March 23, 2026. Accepted April 11, 2026.



## Онтологические модели систем управления технологическими процессами нефтеперерабатывающих производств

© 2026, Т.М. Муртазин

Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ), Уфа, Россия

### Аннотация

Рассматриваются вопросы разработки подсистемы формирования решений по показателям качества получаемых продуктов и технико-экономическим показателям технологических процессов для систем управления и обеспечения безопасности нефтеперерабатывающих производств на основе использования онтологий. Актуальность работы обоснована необходимостью формализации подходов к определению структуры правил формирования решений в системах управления и обеспечения безопасности, когда используются эвристическая информация и неформализованные знания, и результат синтеза системы управления определяется квалификацией разработчика и привлекаемых экспертов. Описываются подходы к формализации процедуры синтеза подсистемы формирования управлений и диагностики на основе базы знаний в форме иерархии классов онтологий и семантических отношений между элементами классов, в качестве которых рассматриваются типовые технологические процессы и технологические аппараты. Предложенная процедура эволюционного синтеза с использованием иерархии моделей топологического уровня и детализированного описания объекта для заданных условий применения позволяет сформировать решение как пересечение возможных реализаций системы. Такие решения определяются онтологиями объекта и ограничениями со стороны системы управления и требований разработчика, знания которого, как правило, представлены в форме эвристик. Рассматривается пример синтеза топологической модели технологического блока нефтеперерабатывающего производства на основе онтологий для применения в системах управления и диагностики отказов оборудования.

**Ключевые слова:** управление, диагностика отказа, формирование решений, база знаний, онтология, матрица смежности, технологический процесс, нефтеперерабатывающее производство.

**Цитирование:** Муртазин Т.М. Онтологические модели систем управления технологическими процессами нефтеперерабатывающих производств. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.240-254. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-240-254.

**Благодарности:** автор выражает признательность д.т.н., профессору Веревкину Александру Павловичу за замечания и рекомендации при подготовке данной статьи.

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

### Введение

Процесс формирования решений в системах автоматического управления традиционно реализуется последовательностью этапов: 1) получение информации о состоянии объекта управления (ОУ); 2) оценка состояния ОУ относительно желаемого; 3) расчёт управлений на основе заданного алгоритма. Аналогично решается задача диагностики отказов элементов технологического объекта и принятия решения по снижению последствий отказа: 1) получение информации о значениях индикаторов состояния объекта диагностики (ОД); 2) оценка значений индикаторов и формирование диагноза; 3) формирование решений по локализации отказа и сохранению рабочего состояния ОД.

Информацию о состоянии ОУ и ОД можно получить двумя способами: прямое измерение; вычисление по модели. Учитывая, что для объектов нефтеперерабатывающих произ-

водств характерно наличие не измеряемых на потоке параметров [1], например, показателей качества (ПК) продуктов и составов сырья, их оперативное получение возможно только вычислением по моделям [2]. Кроме того, в алгоритмах управления и оптимизации по ПК и технико-экономическим показателям (ТЭП) используются прогнозные модели ОУ. Процедуры оценки состояния ОУ в системах оперативной диагностики (СОД) также включают использование прогнозных моделей индикаторов состояния ОД [3].

На первом этапе процесса формирования управлений строятся модели систем  $M_S$ , описывающих в комплексе с измерительной информацией переменные состояния ОУ  $Y = [y_1, \dots, y_m]$ ,  $m$  – размерность вектора параметров состояния, как функцию входных определяющих переменных  $X = [x_1, \dots, x_n]$ ,  $n$  – размерность вектора входных параметров.

Степень достижения целевых состояний системы управления (СУ) или элементов СУ в системах обеспечения безопасности (СОБ) на втором этапе оценивается по моделям требований  $M_T$ . Оценки имеют вид векторных критериев (в СУ) или значений диагностических показателей (в СОБ). Формирование оценок состояния  $\Xi = [\zeta_1, \dots, \zeta_m]$  представляется в форме набора продукционных правил [4], в antecedentes которых используются условия от невязки текущих значений  $Y$  и  $Y^{TP}$ , где индекс «Тр» отражает требуемые или допустимые значения  $Y$ , а консеквентами являются оценки  $\zeta_i$  ( $i=1, \dots, m$ ) в виде логических значений булевой или нечёткой логик.

На третьем этапе определяются параметры для изменения состояния объекта – управляющие воздействия в СУ или меры реагирования на неисправности в СОБ. Модели формирования решений  $M_U$  могут быть реализованы на основе численных методов оптимизации [5] или логических моделей, в частности, продукционных правил.

Технологии усовершенствованного управления и обеспечения безопасности (СУиОБ) предполагают использованием прогнозных моделей систем  $M_S$ , которые позволяют производить оценку состояния ОУ по моделям требований  $M_T$  при формировании решений по управлению и диагностике состояния оборудования ОУ.

## 1 Подходы к построению моделей состояния объекта управления

Одним из существенных факторов, определяющих сложность решения задачи моделирования ОУ нефтеперерабатывающих производств для целей оперативного управления по ПК и ТЭП и диагностики отказов, является многосвязность параметров ОУ. Технологические объекты характеризуется как сложные в статическом и динамическом аспектах:

- значения параметров состояния определяются несколькими управлениями, что вносит неопределённость при назначении управлений и формировании диагноза;
- параметры состояния коррелированы между собой;
- взаимосвязи между параметрами состояния, а также связь параметров состояния с параметрами управления имеют различные статические и динамические характеристики.

Для прогноза параметров состояния в СУиОБ применяются модели с использованием: *методов статистической обработки информации* – корреляционный, дисперсионный анализы [6]; *эвристической информации* – когнитивные модели [7]; *методов искусственного интеллекта* – продукционные системы (ПС), семантические сети, нейронные сети, нечёткие модели и их комбинации [4, 8].

Традиционно разработка модели состояния  $M_S$  основана на эволюционном синтезе [9].

На первом этапе концептуального моделирования проводят анализ ОУ, определяют перечень параметров, которыми характеризуется ОУ, значения которых в рамках регламентных ограничений обеспечивают технологический режим, определяют перечень управлений и измеряемых возмущений, характеризующих состояние ОУ.

На втором этапе проводят анализ уровней связи между входными и выходными параметрами, определяют значимые параметры для целей решаемой задачи и формируют модель ОУ на топологическом уровне.

На третьем этапе определяют операторы связей между входными параметрами и параметрами состояния и формируют структурную модель.

На четвертом этапе проводят параметризацию модели и определяют значения параметров операторов функциональных зависимостей, например, для моделей в форме уравнений регрессии методом наименьших квадратов или его модификациями. Для обеспечения адекватности модели могут применяться различные методы регуляризации [10].

При решении задачи управления модель  $M_s$  используется для расчёта управлений  $U$ :

$$U = \Phi_1(E), \quad (1)$$

$$E = \varphi(Y - Y^T), \quad (2)$$

где  $\Phi_1(*)$  – оператор (метод) расчёта управления, может быть реализован на основе численно-оптимизационного подхода или семантико-логического [11],  $\varphi(*)$  – функция расчёта невязки  $E$ ,  $Y^T$  – требуемое значение параметров состояния,  $Y$  – состояние системы, рассчитанное по модели прогноза состояния ОУ.

При диагностике состояния ОУ на основе параметров состояния  $Y$  формируются диагностические показатели  $\Xi$ , определённые в качестве индикаторов состояния  $C$  ОД:

$$C = \Phi_2(\Xi), \quad (3)$$

где  $\Phi_2(*)$  – оператор (метод) формирования диагностического вывода на основе установления причинно-следственных связей между фактами нарушения ограничений для индикаторов состояния и их возможными причинами, например, в виде продукционных правил.

В качестве диагностических показателей могут использоваться значения невязки:

- между измеряемыми и рассчитываемыми по  $M_s$  параметрами;
- балансовых моделей (моделей материального, энергетического баланса);
- инвариантов, как результатов вычисления моделей  $M_s$  с разной структурой.

Первые три этапа разработки модели состояния  $M_s$  выполняются на основе эвристической информации об объекте [12], и результат во многом определяется субъектом, разрабатывающим модель. Ключевым вопросом является структурирование информации на уровне топологического описания модели  $M_s$  с учётом обеспечения простоты реализации и точности моделирования, достаточной для целей оперативного управления и диагностики.

Разработка моделей СУиОБ представляет собой процедуру эволюционного синтеза с использованием иерархии моделей: топологическое описание объекта (верхний уровень); детализированное описание объекта для конкретных задач (нижний уровень). Модели верхнего уровня содержат образное описание объекта на уровне параметров множеств  $X$ ,  $Y$  и их связей, характерных для предметной области объекта моделирования (ОМ). Модели нижнего уровня содержат конкретизацию связей в различных формах: вербальные шкалы, числовые коэффициенты, функциональные связи, учёт ограничений от ОМ и задачи моделирования.

## 2 Онтологии структурного синтеза модели объекта верхнего уровня

Учитывая ограниченный класс технологических процессов и оборудования в составе технологических установок нефтеперерабатывающих производств, можно поставить задачу разработки топологической модели объекта на основе выбора описания из ограниченного набора технологического оборудования ОМ, представляемого онтологиями.

Ключевыми вопросами онтологий является определение понятий (сущностей) предметной области, отношений между ними [13-15]. Формализация представления онтологий включает определение способа описания связей между понятиями.

Общая схема формирования базы знаний в форме онтологий включает этапы создания словаря объектов, концептуализации и формирования топологии ОМ.

*Этап создание словаря объектов* включает определение множества сущностей, которые характеризуют предметную область создаваемой базы знаний. Например, для нефтеперерабатывающих производств такие сущности можно представить множеством  $PrEq$ : характеризующим технологическое оборудование (наименование технологического оборудования); характеризующим технологический процесс (управляемые и возмущающие  $X$  и контролируемые  $Y$  параметры).

*Этап концептуализации* включает формирование подсистем, представляющих объекты, характерные для конкретной технологической установки, и определение сущностей, характерных данному технологическому оборудованию.

*Этап формирования топологии* ОМ включает определение структурных свойств подсистем и формального представления связей между сущностями онтологии.

В стандарте [16] описан способ представления моделей данных и баз знаний для проектирования перерабатывающих предприятий в формате  $RDF$  и синтаксис языка в категории представлений  $XML$ . Способ представления данных для моделирования, принятый в статье, опирается на стандарт [16] и используется для разработки СУиОБ.

Модели на топологическом уровне можно представить в форме графа [17], в котором сущности – это узлы графа, а отношения между ними – дуги. Предоставление графа для формализации топологии ОМ удобно в форме матрицы смежности.

Учитывая многосвязную структуру ОУ, модель объекта на топологическом уровне представляется матрицей смежности размером  $n \times m$ ,  $n$  – количество управляющих и возмущающих переменных,  $m$  – количество параметров состояния:

$$M_T = [b_{ji}], \quad (4)$$

где  $b_{ji}$  – бинарная переменная, определяющая наличие (значение 1) или отсутствие (значение 0) связи между выходным  $j$  и входным  $i$  параметрами,  $i=1, \dots, n, j=1, \dots, m$ .

На параметрическом уровне отношения между параметрами представляются матрицей отношений:

$$M_F = [W_{ji}], \quad (5)$$

где  $W_{ji}$  – функциональные связи между входным  $i$  и выходным  $j$  параметрами.

Результатом онтологического моделирования в задаче формирования  $M_S$  верхнего уровня для объектов нефтеперерабатывающих производств является получение формализованного описания отношений сущностей матрицей смежности, как модели топологического уровня:

- технологической схемы производства как отношений типового технологического оборудования  $PrEq$ ;
- технологического оборудования  $PrEq$  как отношений характеризующих переменных  $X, Y$ .

В соответствии с иерархией сущностей ОМ для синтеза матрицы смежности используется иерархия классов моделей онтологий (см. рисунок 1):

- класс описания технологического процесса (или технологическая схема процесса)  $Pr = \langle PrEq; PrRe; PrCom \rangle$ , где  $PrEq$  – типовое технологическое оборудование (аппарат),  $PrRe$  – отношения, отражающие взаимосвязи между единицами оборудования,  $PrCom$  – множество технологических параметров, характеризующих входные и выходные потоки смежных аппаратов, которые могут быть для предыдущего аппарата контролируемой переменной, а для следующего – определяющей переменной (управление или контролируемое возмущение);

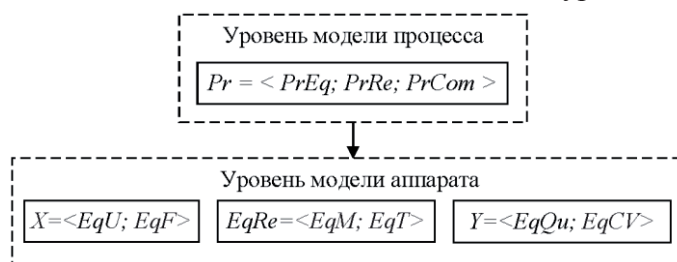


Рисунок 1 – Иерархия классов онтологий моделирования технологического процесса

- класс описания технологического оборудования, который представлен моделями состояния для отдельного типового оборудования  $Eq = \langle Y; X; EqRe \rangle$ , где  $Y$  – множество параметров состояния технологического оборудования,  $X$  – множество входных переменных, определяющих параметры состояния  $Y$ ,  $EqRe$  – отношения между переменными множеств  $Y$  и множества  $X$  в форме матрицы смежности,  $X = \langle EqU; EqF \rangle$ ,  $Y = \langle EqQu; EqCV \rangle$ , где  $EqU$  – множество управляющих переменных,  $EqF$  – множество измеряемых возмущений,  $EqQu$  – множество показателей оценки эффективности работы технологического оборудования (ПК получаемых продуктов и ТЭП),  $EqCV$  – множество контролируемых параметров технологического режима.

Отношения  $PrRe$  представляют технологическую взаимосвязь между технологическим оборудованием установки, отношения  $EqRe$  отражают уровень связности между  $X$  и  $Y$ :  $EqRe = \langle EqM; EqT \rangle$ , где  $EqM$  – матрица смежности параметров множеств  $EqQu$  и  $EqCV$  с параметрами множества  $X$ ,  $EqT = [t_{ji}]$  – множество термов отношений множеств  $EqQu$  и  $EqCV$  с множеством  $X$ , где  $t_{ji}$  – термы, задаваемые экспертно по качественной (лингвистической, нечёткой) шкале, например: сильное влияние, среднее влияние, слабое влияние. Определение термов отношений возможно также интерпретацией коэффициентов корреляции между  $X$  и  $Y$  по шкале Чеддока [18]. В таблицах 1–3 представлены фрагменты моделей уровня процесса и аппарата нефтеперерабатывающего производства и иерархия отношений между элементами.

Представление отношений в форме матриц смежности позволяет формализовать процедуру составления детализированного описания (модели нижнего уровня) с учётом свойств и ограничений конкретного ОМ. Ограничения представляются в форме матриц:

$$G = \langle GMV, GM, GVS, GCR \rangle,$$

где  $GMV$  – квадратная матрица  $[n \times n]$ , задающая наличие автоматической системы регулирования (АСР) для конкретного управления, с диагональными булевыми переменными  $mv_{ji}$  равными 1, если по  $i$ -й определяющей переменной ( $i=1, \dots, n$ ) имеется АСР или предусмотрена возможность дистанционного воздействия на параметр, и остальными нулевыми элементами;

$$GMV = \begin{vmatrix} mv_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & mv_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & mv_{nn} \end{vmatrix}$$

$GM$  – матрица  $[n \times n]$ , задающая наличие технического средства измерения (СИ) технологического параметра для конкретной схемы реализации контроля и управления для рассматриваемого оборудования, с диагональными булевыми переменными  $m_{ii}$  равными 1, если по  $i$ -й определяющей переменной ( $i=1 \dots n$ ) предусмотрено средство измерения, и остальными нулевыми элементами;

$$GM = \begin{vmatrix} m_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_{nn} \end{vmatrix}$$

$GVS$  – матрица  $[n \times n]$ , задающая ограничения оборудования автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП), с диагональными элементами  $vs_{ii}$  равными 1, если для контура определяющей переменной нет ограничений на использование в СУиОБ, в противном случае – 0.

$$GVS = \begin{vmatrix} vs_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & vs_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & vs_{nn} \end{vmatrix}$$

$GCR$  – ограничения учёта уровня связности параметров в матрице смежности:  $GCR = \langle GMVRe, GDVRe \rangle$ , где  $GMVRe = [gmv]$  – термы-ограничения нечёткой матрицы отношений для переменных управления,  $GDVRe = [gdv]$  – термы-ограничения матрицы отношений для переменных контролируемых возмущений.

Таблица 1 – Таблица классов онтологий модели технологического процесса (фрагмент)

| <i>PrEq</i>                           | <i>PrCom</i>   |
|---------------------------------------|--|
| Теплообменник                         | температура продукта на входе ( $T_{in}$ ),<br>расход продукта на входе ( $F_{in}$ ),<br>температура продукта на выходе ( $T_{out}$ ),<br>расход продукта на выходе ( $F_{out}$ ).   |
| Простая ректификационная колонна (РК) | температура сырья на входе ( $T_{in}$ ),<br>расход сырья на входе ( $F_{in}$ ),<br>состав сырья на входе ( $Q_{in}$ ),<br>температура верха или верхнего продукта на выходе ( $T^{top}$ ),<br>расход верхнего продукта на выходе ( $F_{top}$ ),<br>качество верхнего продукта на выходе ( $Q_{top}$ ),<br>температура низа или нижнего продукта на выходе ( $T_{bot}$ ),<br>расход нижнего продукта на выходе ( $F_{out}^{bot}$ ),<br>качество нижнего продукта на выходе ( $Q_{bot}$ ),<br>температура горячей струи на подогрев куба ( $T_{heat}$ ),<br>расход горячей струи на подогрев куба ( $F_{hit}$ ),<br>температура флегмы на орошение ( $T_{fl}$ ),<br>расход флегмы орошения ( $F_{fl}$ ). |
| Флегмовая ёмкость                     | температура продукта на входе ( $T_{in}$ ),<br>расход продукта на входе ( $F_{in}$ ),<br>температура газа на выходе ( $T_{out}$ ),<br>расход газа на выходе ( $F_{out}$ ),<br>температура флегмы на выходе ( $T_{out}$ ),<br>расход нижнего продукта на выходе ( $F_{out}$ ).  |

Таблица 2 – Таблица классов онтологий модели простой ректификационной колонны

| Класс    | Под-класс   | N п/п | Элемент класса  |
|----------|-------------|-------|---|
| <i>X</i> | <i>EqU</i>  | 1     | расход флегмы орошения ( $F_{fl}$ )                       |
|          |             | 2     | температура горячей струи на подогрев куба ( $T_{heat}$ ) |
|          | <i>EqF</i>  | 3     | температура сырья на входе ( $T_{in}$ )                   |
|          |             | 4     | расход сырья на входе ( $F_{in}$ )                        |
|          |             | 5     | состав сырья на входе ( $Q_{in}$ )                        |
|          |             | 6     | температура флегмы на орошение ( $T_{fl}$ )               |
| <i>Y</i> | <i>EqQu</i> | 1     | температура начала кипения бензина ( $T_{нк}$ )           |
|          |             | 2     | температура конца кипения бензина ( $T_{кк}$ )            |
|          | <i>EqCV</i> | 3     | уровень в кубе колонны ( $L$ )                            |
|          |             | 4     | давление верха колонны ( $P_{top}$ )                      |
|          |             | 5     | температура верха ( $T_{top}$ )                           |
|          |             | 6     | расход верхнего продукта на выходе ( $F_{top}$ )          |
|          |             | 7     | температура низа ( $T_{bot}$ )                            |
|          |             | 8     | расход нижнего продукта на выходе ( $F_{bot}$ ).          |

Таблица 3 – Отношения в иерархии классов онтологий

| Уровень модели | Обозначение отношения | Значения отношений   |
|----------------|-----------------------|--|
| <i>Pr</i>      | <i>PrRe</i>           | <i>true</i> (1),<br><i>false</i> (0)                               |
| <i>Eq</i>      | <i>EqT</i>            | <i>true</i> (1),<br><i>false</i> (0)                               |
|                | <i>EqT</i>            | сильное влияние (В),<br>среднее влияние (М),<br>слабое влияние (S) |

### 3 Синтез топологической модели нижнего уровня

Синтез матрицы отношений топологической модели реализуется следующей последовательностью действий.

1) Из базы моделей уровня процессов *Pr* выбором соответствующего технологического оборудования *PrEq* формируют схему соединений аппаратов в субблоке (с/б) и технологических с/б в схеме установки, в которые включают аппараты по функциональному признаку, например, выполнение одной технологической операции – нагрев продукта в печи, ректификация продукта и т.п. (см. рисунок 2).

Схему взаимодействия аппаратов в с/б представляют матрицей отношений *PrRe* размером  $N_k \times N_k$ , где  $N_k$  – количество аппаратов в с/б  $k, k=1, \dots, K, eq_{ji}=1$ , если технологический аппарат  $j$  связан потоком с  $i$ , иначе 0.

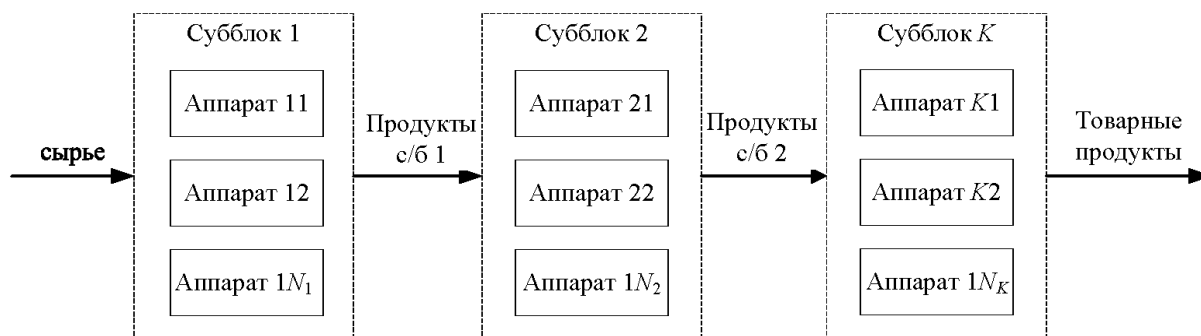


Рисунок 2 – Последовательность технологических потоков процесса

Результатом первого шага является определение:  $K$  - количества с/б;  $N_k$  - перечня технологического оборудования  $Eq$ , входящего в с/б; топологической модели с/б форме матрицы смежности  $PrRe$ . Например, с/б технологической операции отбензинивания нефти процесса первичной переработки нефти можно представить совокупностью аппаратов: теплообменник подогрева сырья ( $p=1$ ) – простая ректификационная колонна ( $p=2$ ) – аппарат воздушного охлаждения (АВО) ( $p=3$ ) – флегмовая ёмкость ( $p=4$ ) – испаритель ( $p=5$ ) с матрицей отношений ( $PrRe^1$ ).

$$PrRe^k = \begin{vmatrix} 0 & eq_{21} & eq_{31} & \dots & eq_{N_k 1} \\ eq_{12} & 0 & eq_{32} & \dots & eq_{N_k 2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ eq_{1N_k} & eq_{2N_k} & eq_{3N_k} & \dots & 0 \end{vmatrix} \quad PrRe^1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

2) Из базы моделей уровня технологического оборудования  $Eq$  для каждого аппарата извлекают топологическую модель, представленную матрицей смежности  $EqM$  размером  $n \times m$ , где  $q_{ji} = 1$  (если выходная переменная  $y_i$  определяется входной  $x_j$ ), 0 – иначе;  $pk$  – номер аппарата в с/б  $k$ ,  $k=1, \dots, K$ , и матрицей термов нечётких отношений  $EqT$  размером  $n \times m$ , из которых конкатенацией матриц отдельных аппаратов одного с/б получают матрицы смежности и нечётких отношений с/б  $EqM^k$  и  $EqT^k$ . При объединении матриц выполняют подстановку переменных в соответствии со схемой технологических потоков с/б. Так, если переменная  $x_i$  для аппарата  $p$  является выходной  $y_j$  для ( $p-1$ ), то переменная  $x_i$  исключается из конкатенированной матрицы смежности, и все взаимосвязи  $q_{ji}$  матрицы  $EqM^{p+1}$  на основе свойства транзитивности переносятся в новую объединённую матрицу. Для матрицы отношений термы объединённой матрицы для совместных переменных определяются по правилу максимума.

$$EqM^{pk} = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{21} & q_{31} & \dots & q_{m1} \\ q_{12} & q_{22} & q_{32} & \dots & q_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ q_{1n} & q_{2n} & q_{3n} & \dots & q_{mn} \end{vmatrix}$$

$$EqT^{pk} = \begin{vmatrix} t_{11} & t_{21} & t_{31} & \dots & t_{m1} \\ t_{12} & t_{22} & t_{32} & \dots & t_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ t_{1n} & t_{2n} & t_{3n} & \dots & t_{mn} \end{vmatrix}$$

Например, для РК ( $p=2$ ) с/б отбензинивания нефти матрица смежности и нечётких отношений для элементов класса таблицы 2 представлена  $EqM^{21}$ ,  $EqT^{21}$ .

$$EqM^{21} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad EqT^{21} = \begin{vmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & B & S & S & B & S & B \\ B & B & 0 & B & B & B & M & B \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{vmatrix}.$$

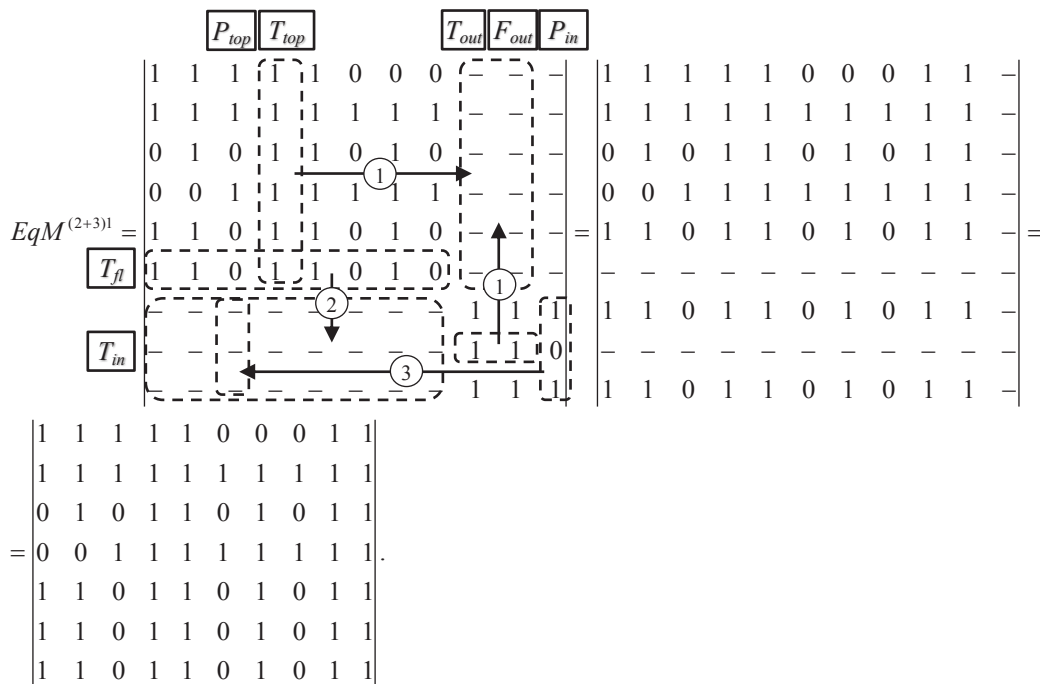
Смежным с РК по технологической схеме является АВО ( $p=3$ ) с моделью  $EqM^{31}$  и  $EqT^{31}$ . Здесь входными параметрами являются:  $x$ =[частота вращения вентилятора ( $n_{ABO}$ ); температура потока на входе АВО ( $T_{in}$ ); температура воздуха на охлаждение ( $T_{air}$ )], а выходными:  $y$ =[температура потока на выходе ( $T_{out}$ ); расход потока на выходе ( $F_{out}$ ); давление потока на входе ( $P_{in}$ )]. Давление  $P_{in}$  зависит от интенсивности охлаждения газа, поэтому рассматривается как выходной параметр.

$$EqM^{31} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad EqT^{31} = \begin{bmatrix} B & B & B \\ M & M & 0 \\ B & B & B \end{bmatrix}$$

Конкатенированная матрица имеет вид  $EqM^{(2+3)1}$ .

Учитывая, что температура верха РК  $T_{top}(j=5) = T_{in}(i=8)$ ,  $T_{fl}(i=5) = T_{out}(j=9)$ ,  $P_{top}(j=4) = P_{in}(i=11)$ , можно получить совместную модель РК и АВО (контуром выделены взаимосвязи коммуницирующих переменных):

$$EqM^{(2+3)1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & - & - & - \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & - & - & - \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & - & - & - \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & - & - & - \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & - & - & - \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & 1 & 1 & 1 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & 1 & 1 & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



На схеме стрелками обозначено наследование связей с учётом коммуницирующих параметров: 1 – для  $T_{top} = T_{in}$ ; 2 – для  $T_{fl} = T_{out}$ ; 3 – для  $P_{top} = P_{in}$ .

3) Актуализируют матрицы смежности  $EqM$  с учётом реализации АСР или наличия средства измерения для параметров множества  $X$  конкретного технологического оборудования. Формируют матрицу смежности  $AMV_0^k$ , которая отражает взаимосвязь параметров множества  $Y$  с параметрами управления, и матрицу смежности  $ADV_0^k$  которая отражает взаимосвязь параметров  $Y$  с параметрами контролируемых возмущений:

$$AMV_0^k = GMV^k \times EqM^k, \tag{6}$$

$$ADV_0^k = (GM^k - GMV^k) \times EqM^k, \tag{7}$$

где  $AMV_0^k$ ,  $ADV_0^k$  – актуализированные матрицы смежности управлений и контролируемых возмущений с учётом реализации АСУТП.

**Пример выполнения данного шага для топологической модели РК.**

Пусть для конкретной РК доступно управление от АСР для всех элементов подкласса  $EqU$  (см. таблицу 2), тогда матрица  $GMV$  представлена квадратной матрицей  $6 \times 6$  с диагональными элементами  $[1; 1; 0; 0; 0; 0]$ , что интерпретируется как наличие АСР расхода флегмы на орошения ( $F_{fl}$ ), и температуры горячей струи ( $T_{heat}$ ), а возможность измерения в АСУТП элементов  $EqF$  квадратной матрицей ограничений  $GM^k$  с диагональными элементами  $[1; 1; 1; 0; 0; 1]$ , что интерпретируется как отсутствие СИ для параметров: расход сырья на входе ( $F_{in}$ ), состав сырья на входе ( $Q_m$ ). Тогда актуализированные матрицы смежности для управлений и контролируемых возмущений имеют вид:

$$AMV_0^{21} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$ADV_0^{21} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

4) Актуализируют матрицы, полученные на шаге 3, с учётом состояния технических СИ и управления для каждого технологического оборудования:

$$AMV^k = GVS \times AMV_0^k, \tag{8}$$

$$ADV^k = GVS \times ADV_0^k, \tag{9}$$

где  $AMV^k, ADV^k$  – актуализированные матрицы смежности управлений и контролируемых возмущений с учётом ограничений на использование средств автоматизации в СУиОБ.

Для рассматриваемого примера моделирования РК ограничения на состояние средств автоматизации и их использование в СУиОБ не накладываются.

5) Формируются матрицы нечётких отношений  $TMV$  и контролируемых возмущений  $TDV$   $k$ -го с/б композицией нечёткой матрицы отношений онтологии объекта  $EqT$  с актуализированными матрицами смежности  $AMV, ADV$ :

$$TMV^k = EqT^k \circ AMV^k, \tag{10}$$

$$TDV^k = EqT^k \circ ADV^k. \tag{11}$$

Здесь принятое обозначение операции ( $\circ$ ) означает результат логического поэлементного умножения:

$$tmv_{ji}^k = \begin{cases} t_{ji}^k, & \text{если } amv_{ji}^k = 1, \\ 0, & \text{если } amv_{ji}^k = 0, \end{cases} \quad tdv_{ji}^k = \begin{cases} t_{ji}^k, & \text{если } adv_{ji}^k = 1, \\ 0, & \text{если } adv_{ji}^k = 0. \end{cases}$$

Для модели РК получаются матрицы нечётких отношений:

$$TMV_0^{21} = \begin{vmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & B & S & S & B & S & B \\ B & B & 0 & B & B & B & M & B \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{vmatrix} \circ \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

$$DMV_0^{21} = \begin{pmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & B & S & S & B & S & B \\ B & B & 0 & B & B & B & M & B \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{pmatrix}.$$

б) Формируется матрица нечётких отношений  $MTe$  с/б  $k$  объединением матриц  $TMV$ ,  $TDV$  с учётом ограничений  $GMVRe$ ,  $GDVRe$  на уровень взаимосвязей для управляющих и возмущающих переменных:

$$MTU^k = TMV^k \cap GMVRe^k, \tag{12}$$

$$MTF^k = TDV^k \cap GDVRe^k, \tag{13}$$

$$MTe^k = MTU^k \cup MTF^k, \tag{14}$$

где  $GMVRe$ ,  $GDVRe$  – термы, определяющие уровень взаимосвязи выходных  $Y$  с входными  $X$ , который следует учитывать в топологической модели объекта для переменных управлений и возмущений.

Здесь операция  $\cap$  возвращает результат логического поэлементного пересечения  $mtu_{ji}^k = tmv_{ji}^k \cap gmvre_{ji}^k$ ,  $mtf_{ji}^k = tdv_{ji}^k \cap gdvre_{ji}^k$ , а операция  $\cup$  возвращает результат логического поэлементного объединения  $mt_{ji}^k = mtu_{ji}^k \cup mtf_{ji}^k$ .

Пусть для модели РК накладывается ограничение на уровень взаимосвязи термом  $B$  (учитывается только сильное влияние), тогда актуальная матрица нечётких отношений представляется как:

$$MTU^{21} = \begin{pmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cap B = \begin{pmatrix} 0 & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B & B & 0 & 0 & B & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$MTF^{21} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{pmatrix} \cap B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & B & B & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$MTe^{21} = MTU^{21} \cup MTF^{21} = \begin{pmatrix} 0 & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B & B & 0 & 0 & B & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & B & B & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad MT^{21} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Шаги 2-6 повторяют для всех с/б и формируют нечёткую матрицу отношений  $MTe\_Pr = \bigcup_k MTe^k$  технологической установки.

Заменой термов матрицы нечётких отношений  $MTe\_Pr$  на булевы переменные получают матрицу смежности топологической модели  $M\_T$  ОУ и после параметризации – модель ОУ  $M\_f$ , которая используется для реализации численно-оптимизационного подхода расчёта управлений [19]. Матрицу смежности  $M\_T$  можно использовать для формирования продук-

ционных правил по управлению, реализуя принцип управления на основе семантологического подхода [11].

На рисунке 3 представлена функциональная модель получения топологической модели ОУ на основе онтологий.

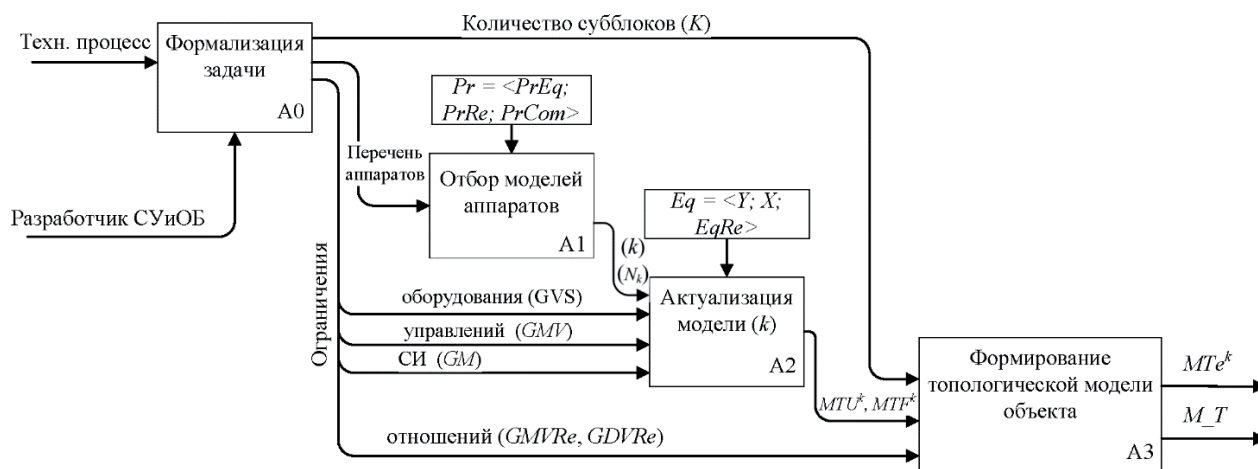


Рисунок 3 - Функциональная модель процесса синтеза топологической модели на основе онтологий

#### 4 Синтез модели в задаче оперативной диагностики состояния

Один из методов решения задачи оперативной диагностики предполагает использование в качестве индикатора, характеризующего состояние ОД  $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n\}$ , уровень рассогласования информации, получаемой по различным информационным каналам, в том числе по моделям [3]. Определение топологической модели для альтернативных каналов получения информации также может выполняться на основе онтологической базы знаний.

Формирование диагнозов может выполняться на основе анализа как численных значений невязок, так и качественных взаимосвязей параметров ОД. Рассматриваются взаимосвязи между входными управляющими параметрами и выходными параметрами состояния, имея в виду, что параметры внутри множеств  $X, Y$  также могут быть коррелированы между собой. Размерность матрицы смежности топологической модели для целей диагностики  $EqM^D$  составляет  $(n+m) \times (n+m)$ . Отношения между переменными при формировании матрицы нечётких отношений  $EqT^D$  должны описываться термами  $t_{ji}$ ,  $i, j=1, \dots, (n+m)$ , указывающими направление зависимости, например: большая отрицательная, малая отрицательная, малая положительная, большая положительная.

Синтез топологической модели ОД выполняется по процедуре, рассмотренной в разделе 3. Для придания различия к обозначениям, принятым в разделе 3, добавляется индекс  $D$ . В задаче диагностики ограничения реализации АСР (GMV) не рассматриваются.

Использование полученной топологической модели в задаче диагностики состояния оборудования возможно для формирования логических выражений (ЛВ) СОД, определяющих соответствие градиента  $k_{ji}(p)$  зависимостей входных и выходных параметров направлению исправного состояния объекта диагностирования. Градиент определяется по значению отношения:

$$k_{ji}(p) = \frac{\Delta y_j(p-\tau)}{\Delta x_i(p)} = \frac{y_j(p-\tau) - y_j(p-\tau-1)}{x_i(p) - x_i(p-1)},$$

где  $y_j(p), y_j(p-\tau-1), x_i(p), x_i(p-1)$  – значения параметров  $x_i, y_j$  в дискретные отсчёты времени  $p$  и на предыдущем цикле опроса с учётом транспортного запаздывания  $\tau$  по каналу передачи

воздействий  $i-j$ . Знак градиента сравнивается с условными знаками термов («-1» для «большая отрицательная», «малая отрицательная» и «+1» – для «малая положительная», «большая положительная») матрицы нечётких отношений  $MTe^D$  и формируются логические переменные  $LV$ :

$$\begin{aligned} \text{для положительной связи } t_{ji} (+1): LV_{ji} &= \begin{cases} 1, \text{ если } k_{ji} > 0, \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases} & i, j = \overline{1, (n+m)}. \\ \text{для отрицательной связи } t_{ji} (-1): LV_{ji} &= \begin{cases} 1, \text{ если } k_{ji} < 0, \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases} & i, j = \overline{1, (n+m)}. \end{aligned}$$

Тогда ЛВ, позволяющие рассчитать индикатор неисправного состояния СИ, получают как:

$$\xi_d = \bigvee_{i=1}^{n+m} \left( \bigwedge_{j=1}^{n+m-1} (LV_{ji}) \wedge \overline{LV_{di}} \right), \quad (15)$$

т.е. состояние неисправности датчика параметра  $d$  диагностируется, если нарушена взаимосвязь между  $x_i, y_j$ , определённая значением (термом)  $t_{di}, d=1, \dots, (n+m)$ , при этом для других пар переменных матрицы  $MTe^D$  знак градиента  $k_{ji}(p)$ , соответствует значениям  $t_{ji}, j \neq d$ .

Индикатором неисправности технологического оборудования является нарушение всех отношений, задаваемых матрицей  $MTe^D$ , т.е. нарушена адекватность балансовых моделей:

$$Eq_k^D = \bigvee_{j=1}^m \bigwedge_{i=1}^n \overline{LV_{ji}}. \quad (16)$$

Для РК матрица нечётких отношений системы диагностики с учётом установленных ограничений имеет вид  $MTe^{D(2)}$ , где для простоты изложения показаны взаимосвязи только между элементами классов  $X$  и  $Y$ . Терм РВ означает большое положительное, NB – большое отрицательное. Тогда можно записать ЛВ диагностики для каждого СИ, например для неисправности преобразователя давления в колонне ( $P_{top}$ ):

$$MTe^{D(2)} = \begin{vmatrix} 0 & \text{РВ} & \text{РВ} & \text{РВ} & \text{NB} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{NB} & \text{РВ} & 0 & 0 & \text{РВ} & \text{NB} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{РВ} & 0 & \text{РВ} & \text{РВ} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\xi_4 = (LV_{21} \wedge LV_{31} \wedge \overline{LV_{41}} \wedge LV_{51}) \vee (LV_{32} \wedge \overline{LV_{42}} \wedge LV_{72} \wedge LV_{82}) \vee (LV_{26} \wedge \overline{LV_{46}} \wedge LV_{56}).$$

Поскольку для формирования  $LV_{ji}$  используются приращения параметров  $\Delta y_j, \Delta x_i$ , вычисление ЛВ по (15) и (16) возможно только для переходных режимов. Для исключения ложных диагнозов неисправного состояния необходима оценка статистической значимости результата вывода ЛВ, которая проводится расчётом статистических критериев [20]. Так, если используется критерий Стьюдента, то неисправное состояние по значениям ЛВ будет диагностировано при  $t > t_{кр.}$ . Расчётом  $t$  для различных  $n_D$ , где  $n_D$  – количество положительных выводов по (15), (16), определено, что диагноз является статистически значимым при  $n_D > 3$  (для уровня значимости вывода  $p < 0,05$ ) на периоде  $(3-5)T$ , где  $T$  – постоянная времени передаточной функции по каналу  $i-j$ .

Получение ЛВ по (15) и (16) возможно отдельно для различных уровней связности параметров  $MTe^D$  с ранжированием диагностического заключения. Заменяя значения термов  $MTe^D$  на коэффициенты  $k_{ji}$ , применяя условия формирования нечётких логических переменных с учётом уровня отклонения градиента от заданного допустимого диапазона значений  $k_{ji}$ , получают нечёткие ЛВ, которые позволяют проводить диагностику функциональных отказов [20].

Топологическая модель  $M_T^D$  может использоваться для отбора факторов и формирования структуры контрольных моделей в форме уравнений линейной регрессии.

## Заключение

Разработана иерархическая структура моделирования СУиОБ нефтеперерабатывающего производства на основе онтологий. На верхнем уровне формируется модель ОУ инвариантная к конкретным условиям. На нижнем – модель, релевантная особенностям конкретного объекта и решаемой задачи.

Предложен способ представления информации в онтологиях на основе матриц смежности и нечётких отношений и формальная процедура синтеза топологических моделей объекта управления и диагностики для целей проектирования СУиОБ. Использование модели ОУ в форме онтологии для типовых объектов обеспечивает решение следующих задач:

- определение основных объектов, сущностей и отношений, необходимых для получения моделей СУиОБ;
- представление информации о технологическом объекте в структурированном и формализованном виде, удобном для алгоритмизации синтеза моделей СУиОБ с учётом ограничений, накладываемых технологическим оборудованием;
- обеспечение методологической основы для синтеза СУиОБ, которая определяет структуру модели формирования решений по управлению и диагностики.

## Список источников

- [1] **Веревкин А.П.** Особенности задачи управления процессами разделения нефтяных смесей на установках АВТ. *Межвузовский сб. «Нефть и газ»*. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1996. №3. С.82–84.
- [2] **Zhong W., Yu J.** MIMO soft sensors for estimating product quality with on-line correction. *Chemical Engineering Research and Design*, 2000. Vol.78. №4. P.612–620. DOI:10.1205/026387600527554.
- [3] **Witczak M.** Modelling and estimation strategies for fault diagnosis of non-linear systems. *Analytical to Soft Computing Approaches*. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 212 p.
- [4] **Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И.** Инженерия знаний. Модели и методы. СПб: Издательство «Лань», 2016. 324 с.
- [5] **Моисеев Н.Н., Иванюков Ю.П., Столярова Е.М.** Методы оптимизации. М.: «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1978. 352 с.
- [6] **Драйпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 391 с.
- [7] **Збрицак С.Г.** Когнитивное моделирование: теоретические основы, методы, ограничения. *Russian Journal of Economics and Law*, 2025. №3 (Т.19). С.675–695. DOI: 10.21202/2782-2923.2025.3.675-695.
- [8] **Хайкин С.** Нейронные сети. Полный курс. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2016. 1104 с.
- [9] **Емельянов В.В., Курейчик В.М.** Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.
- [10] **Веревкин А.П., Муртазин Т.М.** Моделирование производственных процессов на основе когнитивной информации и временных рядов. *Системная инженерия и информационные технологии*, 2022, Т.4, №1(8). С.12-19. DOI: 10.54708/26585014\_2022\_41812.
- [11] **Горшков С.** Введение в онтологическое моделирование. ООО ТриниДата, 2016. 165 с.
- [12] **Давтян М.** Эвристическое моделирование данных в информационных системах. *Труды Института системного программирования РАН*, 2011. Том 21. С.349–356.
- [13] **Guarino N.** Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation. *Int. J. of Human Computer Studies*, 1995. Vol.43(5/6). P.625–640.
- [14] **Chen W., Kloul L.** An advanced driver assistance test cases generation methodology based on highway traffic situation description ontologies. *International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering, and Knowledge Management*: Springer, Cham, 2018. P.93–113. DOI: 10.1007/978-3-030-49559-6\_5.
- [15] **Моисеева Т.В.** Формирование понятийно-терминологического аппарата теории интересубъективного управления. *Онтология проектирования*, 2020. Т.10. №3(37). С.351-360. DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-3-351-360.
- [16] ГОСТ Р ИСО 15926-1-2008 Интеграция данных жизненного цикла для перерабатывающих предприятий, включая нефтяные и газовые производственные предприятия. Дата введения 2008-12-18. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва: Стандартинформ, 2010. 19 с.
- [17] **Оре О.** Теория графов. 2-е изд. М.: Наука, 1980. 336 с.
- [18] **Крамер Г.** Математические методы статистики, 2 изд. М: Мир, 1975. 648 с.
- [19] **Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, Francis J. Doyle III.** Process dynamics and control. University of California. Wiley. Fourth Edition, 2017. 502 p.

[20] Муртазин Т.М., Назаров Т.Т. Формирование решений в системах диагностики отказов элементов автоматизированных технологических комплексов. *Автоматизация процессов управления*, 2025. №1(79). С.95-102. DOI: 10.35752/1991-2927\_2025\_1\_79\_95.

## Сведения об авторе

Муртазин Тимур Мансурович, 1975 г. рождения. Окончил Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ) в 1997 г., к.т.н. (2001). Доцент кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии УГНТУ. В списке научных трудов более 100 работ в области разработки автоматических систем управления. ORCID 0009-0009-0655-338X. Author ID (РИНЦ): 389995; Author ID (Scopus): 57200149142. [tm.murtazin@mail.ru](mailto:tm.murtazin@mail.ru).



Поступила в редакцию 03.02.2026, после рецензирования 09.04.2026. Принята к публикации 30.04.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-240-254



# Ontological models of control systems for technological processes in oil refining production

© 2026, Т.М. Murtazin

Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Russia

## Abstract

The paper addresses the development of a subsystem for decision generation based on product quality indicators and techno-economic parameters of technological processes for control and safety systems in oil refining production using ontological approaches. The relevance of the work is justified by the need to formalize approaches to defining the structure of decision-generation rules in control and safety systems, particularly in cases where heuristic information and non-formalized knowledge are used, and where the outcome of control system synthesis depends on the qualifications of developers and participating experts. Approaches to formalizing the synthesis procedure for control generation and diagnostic subsystems based on a knowledge base represented as a hierarchy of ontology classes and semantic relationships between class elements are described. Typical technological processes and technological apparatuses are considered as elements of these classes. The proposed evolutionary synthesis procedure, based on a hierarchy of topological-level models and a detailed description of the object for specified operating conditions, makes it possible to generate a solution defined as the intersection of possible system implementations determined by the object ontologies, execution constraints of the control system, and developer requirements, whose knowledge is generally represented in the form of heuristics. An example is presented of synthesizing a topological model of a technological unit in oil refining production based on ontologies for application in control systems and equipment fault diagnosis systems.

**Keywords:** control, fault diagnostics, decision generation, knowledge base, ontology, adjacency matrix, technological process, oil refining production.

**For citation:** Murtazin T.M. Ontological models of control systems for technological processes in oil refining production [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 240-254. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-240-254.

**Acknowledgment:** The author expresses gratitude to Alexander Pavlovich Verevkin, Doctor of Technical Sciences and Professor (Eng.) for his remarks and recommendations during the preparation of this paper.

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

## List of figures and tables

Figure 1 – Hierarchy of ontology classes for technological process modeling

Figure 2 – Sequence of technological flows in the process

Figure 3 – Functional model of the ontology-based synthesis process for a topological model

Table 1 – Table of ontology classes of the technological process model (fragment)

Table 2 – Table of ontology classes of the simple distillation column model

Table 3 – Relationships within the hierarchy of ontology classes

## References

- [1] **Verevkin AP.** Features of the control problem for separation processes of petroleum mixtures at CDU/VDU units [In Russian]. *Interuniversity collection "Oil and Gas"*. Ufa: USPTU Publishing House, 1996; 3: 82–84.
- [2] **Zhong W, Yu J.** MIMO soft sensors for estimating product quality with on-line correction. *Chemical Engineering Research and Design*, 2000; 78(4): 612–620. DOI:10.1205/026387600527554.
- [3] **Witczak M.** Modelling and estimation strategies for fault diagnosis of non-linear systems. *Analytical to Soft Computing Approaches*. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 212 p.
- [4] **Gavrilova TA, Kudryavtsev DV, Muromtsev DI.** Knowledge engineering. Models and methods: Textbook [In Russian]. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2016. 324 p.
- [5] **Moiseev NN, Ivanilov YuP, Stolyarova EM.** Optimization methods [In Russian]. Moscow: Nauka, Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature, 1978. 352 p.
- [6] **Draper N, Smith H.** Applied regression analysis [In Russian]. Moscow: Statistic, 1973. 391 p.
- [7] **Zbrishchak SG.** Cognitive modeling: theoretical bases, methods, limitations. [In Russian]. *Russian Journal of Economics and Law*, 2025. 19 (3). 675–695. DOI: 10.21202/2782-2923.2025.3.675-695.
- [8] **Haykin S.** Neural networks: A comprehensive foundation [In Russian]. Moscow: Williams Publishing House, 2016. 1104 p.
- [9] **Emelianov VV, Kureichik VM.** Theory and practice of evolutionary modeling. [In Russian]. Moscow: Fizmatlit, 2003. 432 p.
- [10] **Verevkin AP, Murtazin TM.** Simulation of production process based on cognitive information and time series [In Russian]. *Systems Engineering and Information Technologies*. 2022; 4(1): 12–19. DOI: 10.54708/26585014\_2022\_41812.
- [11] **Gorshkov S.** Introduction to Ontological Modeling. TriniData LLC, 2016. 165 p.
- [12] **Davtyan M.** Heuristic data modeling in information systems. [In Russian]. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2011; 21: 349–356.
- [13] **Guarino N.** Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation // *International Journal of Human-Computer Studies*. 1995; 43(5/6): 625–640.
- [14] **Chen W, Kloul L.** An advanced driver assistance test cases generation methodology based on highway traffic situation description ontologies. *International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering, and Knowledge Management*. Springer, Cham, 2018. P. 93–113. DOI: 10.1007/978-3-030-49559-6\_5.
- [15] **Moiseeva TV.** Conceptual and terminological apparatus formation of intersubjective management theory [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2020; 10(3): 351–360. DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-3-351-360.
- [16] GOST R ISO 15926-1-2008 Integration of life cycle data for processing enterprises, including oil and gas production enterprises. [In Russian]. Date of introduction 2008-12-18. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Official ed. Moscow: Standartinform, 2010. 19 p.
- [17] **Ore O.** Graph theory. 2nd ed. [In Russian]. Moscow: Nauka, 1980. 336 p.
- [18] **Kramer G.** Mathematical Methods of Statistics, 2nd ed. Moscow: Mir, 1975. 648 p.
- [19] **Dale E, Seborg, Thomas F, Edgar, Duncan A, Mellichamp, Francis J, Doyle III.** Process dynamics and control. University of California. Wiley. Fourth Edition, 2017. 502 p.
- [20] **Murtazin TM, Nazarov TT.** Decision-making by the diagnostic systems in the automated engineering systems [In Russian]. *Automation of Control Processes*. 2025; 1: 95–102. DOI: 10.35752/1991-2927\_2025\_1\_79\_95.

## About the author

**Timur Mansurovich Murtazin** (b. 1975) graduated from USPTU in 1997, Candidate of Technical Sciences in 2001. Associate Professor at the Department of Automation, Telecommunications and Metrology, USPTU. The list of scientific publications includes over 100 works in the field of automated control systems development. ORCID 0009-0009-0655-338X. Author ID (РИНЦ): 389995; Author ID (Scopus): 57200149142. [tm.murtazin@mail.ru](mailto:tm.murtazin@mail.ru).

Received February 03, 2026. Revised April 9, 2026. Accepted April 30, 2026.



## Автоматизация управления беспилотными транспортными средствами в точном земледелии

© 2026, А.А. Романов, А.А. Филиппов ✉

Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), Ульяновск, Россия

### Аннотация

Рассматривается задача автоматизации управления беспилотными транспортными средствами в точном земледелии. На основе онтологии предметной области предложен комплексный подход к формированию заданий, включающих траекторию движения и управляющие сигналы для средств обработки сельскохозяйственных полей. Разработан программный комплекс, включающий географическую информационную систему для создания электронных карт полей, алгоритм формирования заданий и модуль нечёткого логического вывода на основе онтологий и производственных правил. Особенностью подхода является формализация экспертных знаний агрономов, позволяющая учитывать почвенно-климатические особенности, характеристики культур и параметры технологических операций. Представлены структура онтологии для описания технологических операций обработки полей и механизм нечёткого вывода для расчёта норм внесения удобрений, позволяющий учитывать особенности конкретного участка поля, сельскохозяйственной культуры и выполняемой технологической операции. Создано расширение для конфигурации «1С:ERP Агропромышленный комплекс», объединяющее разработанный программный комплекс с учётной системой сельскохозяйственного предприятия. Описан пример применения системы для расчёта нормы внесения удобрений под зерновые культуры, который показал, что суммарный расход удобрений на 7% ниже при использовании предложенного подхода по сравнению с традиционным методом.

**Ключевые слова:** беспилотное транспортное средство, онтология, нечёткий логический вывод, автоматизация управления, технологическая операция, точное земледелие.

**Цитирование:** Романов А.А., Филиппов А.А. Автоматизация управления беспилотными транспортными средствами в точном земледелии. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.255-268. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-255-268.

**Благодарности:** авторы выражают признательность руководству ГК «АгроСервис-ИТ».

**Финансирование:** исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23-11-00265).

**Вклад авторов:** Филиппов А.А. – постановка задачи, концептуализация, формализация модели; Романов А.А. – экспертиза материалов, разработка программной системы, проверка результатов.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Введение

Сельское хозяйство находится на этапе автоматизация бизнес-процессов [1]. Это особенно актуально для растениеводства, где своевременность и точность выполнения технологических операций влияют на конечный результат. Применение беспилотных транспортных средств (БПТС) позволяет уменьшить воздействие вредных факторов на оператора и способствует переходу к точному земледелию с учётом неоднородности поля и оптимальному управлению ресурсами. В данной работе под оптимальным понимается такое управление БПТС, которое минимизирует затраты (расход материалов и длину маршрута). Критерием оптимальности является достижение целевой нормы внесения материалов (удобрения, пестициды и т.д.), определяемой с использованием базы знаний (БЗ) и механизма нечёткого

логического вывода (НЛВ). Ограничениями являются геометрические параметры поля (границы, препятствия), технические характеристики БПТС (ширина обработки) и агротехнологические требования, формализованные в виде нечётких правил. Каждое поле характеризуется: рельефом, границами, почвенным составом, историей обработок и др.; различные сельскохозяйственные культуры требуют особых подходов; технологические операции имеют сложные взаимосвязи и ограничения, известные лишь специалистам. Создание интеллектуальных управляющих систем, формализующих опыт агрономов-технологов, позволит преобразовать качественные оценки специалистов в количественные задания для системы управления БПТС и осуществить более точное контекстно-ориентированное управление производственными процессами.

## 1 Постановка задачи

Внедрение технологий точного земледелия связано с использованием широкого спектра технических и программных решений. Известны комплексные проприетарные платформы от производителей техники (например, *John Deere Operations Center*<sup>1</sup>, *CLAAS Telematics*<sup>2</sup>), отдельные агронавигаторы<sup>3</sup> и системы параллельного вождения<sup>4</sup>. Данные системы обладают высокой точностью позиционирования, отработанными алгоритмами планирования пути, удобными картографическими интерфейсами и имеют определённые ограничения [2].

- Эффективное функционирование таких систем часто возможно только при использовании специализированной техники конкретного производителя, оснащённой штатными системами управления и дорогостоящими датчиками. Это создаёт высокий порог входа и приводит к зависимости от поставщика.
- Проприетарные программные платформы, как правило, представляют собой «чёрный ящик» с ограниченными возможностями адаптации и интеграции. Пользователь не может модифицировать логику принятия решений (например, алгоритмы расчёта норм внесения препаратов) под условия конкретного хозяйства, агрономические практики или локальные нормативы.
- Большинство решений направлено на управление техникой в поле, но слабо связано с учётными системами сельхозпредприятия.

Известны работы, посвящённые вопросам использования методов искусственного интеллекта [3-6], онтологий [7, 8] и нечёткой логики [9] для решения различных сельскохозяйственных задач. Однако эти работы часто имеют фрагментарный характер и решают лишь частные задачи. Предлагаемый подход направлен на интеграцию с существующей инфраструктурой сельхозпредприятия. В [10] описана модель БЗ предметной области земледелия: параметры поля, особенности обрабатываемых культур, особенности процесса и средств обработки, параметры БПТС. В данной работе предложенная в [10] модель дополнена использованием НЛВ для расчёта норм внесения удобрений на основе экспертных производственных правил, учитывающих особенности конкретного участка поля, сельскохозяйственной культуры и выполняемой технологической операции.

Целью настоящей работы является повышение эффективности и качества выполнения технологических операций БПТС за счёт разработки метода формирования комплексного задания на управление БПТС. Для достижения поставленной цели задание должно формироваться с учётом комплекса факторов: характеристик поля, агрономических требований культуры, параметров операции и технических возможностей оборудования [11]. В качестве критерия эффективности выполнения задания рассматривается минимизация отклонения расчётной нормы удобрений от экспертных агрономических рекомендаций при соблюдении агротехнологических требований.

<sup>1</sup> <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/operations-center/features/>.

<sup>2</sup> <https://www.claas.com/en-be/press/press-releases/2025-09-23-agritechnica-2025>.

<sup>3</sup> <https://www2.agriculture.trimble.com/product/gfx-750-display/>.

<sup>4</sup> <https://thorsenteknik.se/pdfs/brugermanual-Topcon%20X14%20UK.pdf>.

В работе решаются следующие задачи:

- разработка географической информационной системы для формирования электронных карт полей с возможностью создания тематических слоёв, отражающих особенности производственного процесса: характеристики почв, заболевания растений, историю обработок и текущее состояние посевов;
- создание модуля НЛВ на основе БЗ, обеспечивающего формализацию и использование экспертных знаний агрономов при принятии решений и управлении БПТС;
- разработка алгоритма формирования заданий для БПТС, учитывающего особенности поля, требования сельскохозяйственных культур, параметры технологических операций и технические характеристики средств обработки.

Использование онтологического подхода для формализации экспертных знаний в задачах управления технологическими операциями в сельском хозяйстве является активно развивающимся научным направлением [12, 13]. Интеграция онтологий с интернетом вещей [14-16] и системами поддержки принятия решений [17] позволяет создавать гибкие системы управления.

## 2 Алгоритм формирования заданий

Формально задачу формирования заданий для системы управления БПТС можно представить в виде функции:  $\mathbb{F}: F_i \times \hat{S} \times V_j \times A \rightarrow T_{ij}$ , аргументами которой являются сведения об  $i$ -м поле  $F_i$ , технологической операции  $\hat{S}$ ,  $j$ -м БПТС  $V_j$  и формализованные знания агрономов в виде БЗ  $A$  с функцией НЛВ:  $F_i = \langle S_i^F, B_i^F, O_i^F, \hat{A}_i^F, D_i^F \rangle$ ,

где  $S_i^F = \left\{ \langle \hat{S}_{ik}, \hat{I}_{ik}, \{ \langle \hat{V}_{ikl}, \hat{T}_{ikl}, \hat{M}_{ikl} \rangle_{l=1}^L \} \}_{k=1}^K \right\}$  – спецификация технологических операций, которые необходимо выполнить на  $i$ -м поле в текущем сезоне с учётом находящейся на поле сельскохозяйственной культуры  $\hat{I}_{ik}$ . Каждая технологическая операция  $\hat{S}_{ik}$  определяет использование множества БПТС  $\hat{V}_{ikl} \in V$ , средств обработки  $\hat{T}_{ikl} \in T$  и материалов  $\hat{M}_{ikl} \in M$  с учётом их взаимной совместимости;

$B_i^F$  – множество координат границы  $i$ -го поля;

$O_i^F = \{ \langle T_{ik}^O, B_{ik}^O \rangle \}_{k=1}^K$  – множество препятствий на  $i$ -м поле, каждое  $k$ -е препятствие  $O_{ik}^F$  определяется типом  $T_{ik}^O$  и множеством координат  $B_{ik}^O$ ;

$\hat{A}_i^F = \left\{ \langle B_{ik}^{\hat{A}}, \{ \langle key_{ikl}^{\hat{A}}, value_{ikl}^{\hat{A}} \rangle_{l=1}^L \} \}_{k=1}^K \right\}$  – множество отдельных участков  $i$ -го поля,  $k$ -й участок поля имеет границы в виде множества координат  $B_{ik}^{\hat{A}}$ , а также данные агрохимического обследования почвы  $k$ -го участка  $\{ \langle key_{ikl}^{\hat{A}}, value_{ikl}^{\hat{A}} \rangle_{l=1}^L$  (ключ-значение);

$D_i^F = \{ \langle B_{ik}^D, N_{ik}^D \rangle \}_{k=1}^K$  – множество заражённых участков  $i$ -го поля,  $k$ -й участок заражения определяется множеством координат границы участка  $B_{ik}^D$  и названием заболевания  $N_{ik}^D$ .

Выбранная для выполнения технологическая операция определяется аргументом  $\hat{S} \in S_i^F$ .

Аргумент  $V_j$  позволяет описать характеристики  $j$ -го БПТС, который выбран для выполнения технологической операции  $\hat{S}$  [10].

БЗ  $A$  содержит формализованные знания агронома в виде нечётких продукционных правил на языке *SWRL*, которые используются для организации НЛВ при формировании задания  $T_{ij}$ .

Результатом вычисления функции  $\mathbb{F}$  является задание  $T_{ij}$  для  $i$ -го поля  $F_i$  и  $j$ -го БПТС  $V_j$  технологической операции  $\hat{S}$  следующего вида:  $T_{ij} = \langle P_{ij}^T, G_{ij}^T, R_{ij}^T \rangle$ ,

где  $P_{ij}^T$  – множество точек маршрута  $j$ -го БПТС  $V_j$  по  $i$ -му полю  $F_i$ , каждая точка представляет собой пару географических координат;

$G_{ij}^T = \left\{ \left\langle B_{ijk}^G, \left\{ \langle key_{ijkl}^G, value_{ijkl}^G \rangle_{l=1}^L \right\}_{k=1}^K \right\rangle \right\}_{k=1}^K$  – множество ячеек, на которые делится поле. Ячейка  $G_{ijk}^T$  имеет координаты границы  $B_{ijk}^G$  с учётом габаритов  $j$ -го БПТС и установленного на БПТС средства обработки, а также содержит множество управляющих сигналов  $\left\{ \langle key_{ijkl}^G, value_{ijkl}^G \rangle_{l=1}^L \right\}$  для установленного средства обработки;

$R_{ij}^T$  – множество отношений между текущей точкой маршрута и соответствующей ей ячейкой.

Алгоритм формирования заданий можно представить в виде следующих шагов.

- 1) выбор поля  $F_i$  и необходимой для выполнения технологической операции  $\hat{S}$ .
- 2) вывод доступных для использования комбинаций БПТС, средств обработки и материалов  $\left\{ \langle \hat{V}_{im}, \hat{T}_{im}, \hat{M}_{im} \rangle_{m=1}^M \right\} \in \hat{S}$ .
- 3) выбор необходимой комбинации  $\langle \hat{V}_{im}, \hat{T}_{im}, \hat{M}_{im} \rangle$ .
- 4) для выбранного БПТС  $V_j = \langle \hat{V}_{im}, \hat{T}_{im} \rangle$  формируется маршрут передвижения по  $i$ -му полю  $F_i$  в виде множества точек  $P_{ij}^T$  [18].
- 5) на основе характеристик выбранного БПТС  $V_j$  формируется множество ячеек поля с указанием их границ  $G_{ij}^T = \left\{ \langle B_{ijk}^G \rangle_{k=1}^K \right\}$ . Ячейка  $G_{ijk}^T \in G_{ij}^T$  представляет собой квадрат, сторона которого равна ширине средства обработки БПТС  $V_j$ .
- 6) формируется множество отношений  $R_{ij}^T$  между каждой точкой маршрута и соответствующей ей ячейкой.
- 7) для  $k$ -й ячейки  $G_{ijk}^T \in G_{ij}^T$  на основе процесса НЛВ БЗ  $A$  выполняется формирование множества управляющих сигналов  $A: (\hat{A}_i^F \cap B_{ijk}^G) \times (D_i^F \cap B_{ijk}^G) \times \hat{I} \times \hat{M}_{im} \rightarrow \left\{ \langle key_{ijkl}^G, value_{ijkl}^G \rangle_{l=1}^L \right\}_{k=1}^K$ ,  $G_{ijk}^T = \langle B_{ijk}^G, \left\{ \langle key_{ijkl}^G, value_{ijkl}^G \rangle_{l=1}^L \right\} \rangle$ . Входными данными процесса НЛВ являются данные агрохимического обследования  $\hat{A}_i^F \cap B_{ijk}^G$  и сведения о заражённых участках  $D_i^F \cap B_{ijk}^G$  в текущей ячейке с учётом соответствия координат, а также дополнительные сведения  $\hat{I}$  (тип сельскохозяйственной культуры и сезон проведения технологической операции) и выбранный материал  $\hat{M}_{im}$  (удобрения, химикаты и т.д.).

В результате формируется задание для системы управления БПТС, в т.ч. координаты маршрута передвижения по полю и множество управляющих сигналов для средства обработки с привязкой к отдельным участкам поля с учётом характеристики почвы и заболеваний сельскохозяйственной культуры.

### 3 База знаний и организация нечёткого логического вывода

БЗ  $A$  системы управления БПТС можно представить в виде:  $A = \langle OWL, SWRL, Pellet, SWRLF \rangle$ , где  $OWL$  – онтология на языке  $OWL$  <sup>5</sup> для описания структуры БЗ;  $SWRL$  – множество продукционных правил на языке  $SWRL$  <sup>6</sup>;

$Pellet$  – машина логического вывода  $Pellet$  <sup>7</sup>;

$SWRLF$  – разработанный компонент для осуществления процесса НЛВ на основе БЗ [19].

<sup>5</sup> <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>.

<sup>6</sup> <https://www.w3.org/submissions/SWRL/>.

<sup>7</sup> <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/Pellet>

### 3.1 Структура онтологии

Схема онтологии *OWL* представлена на рисунке 1<sup>8</sup>. Структура компонента *OWL* БЗ А для формирования задания по внесению удобрений представлена с использованием диалекта дескрипционной логики *SHOIQF(D)*<sup>9</sup> [20].

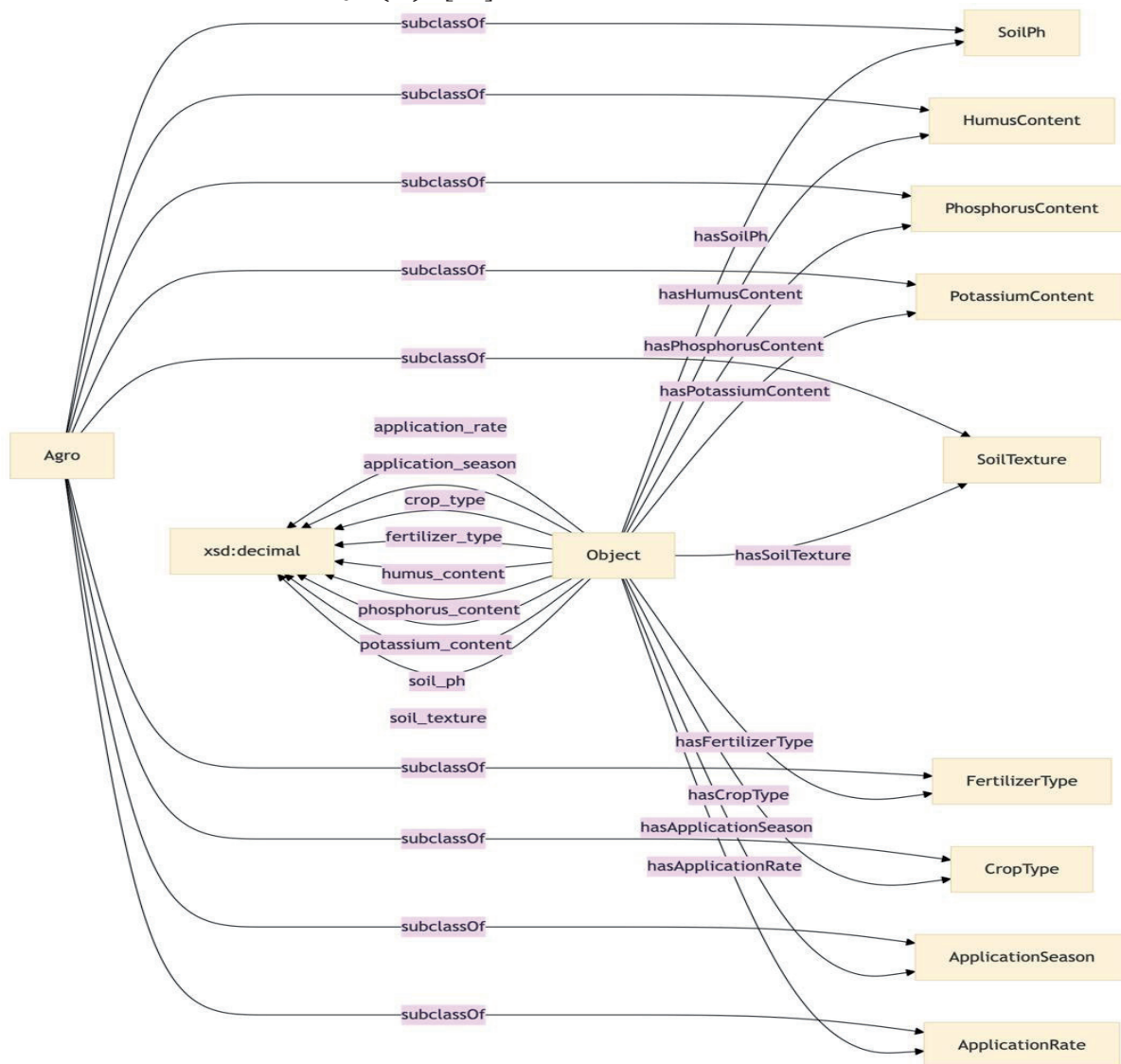


Рисунок 1 – Схема онтологии

Структура компонента *OWL* содержит описание следующих классов:

- класс  $Agro \equiv T$  описывает набор характеристик почвы  $key^{\hat{A}}$ , типов управляющих сигналов  $key^G$  для средства обработки БПТС  $V_j$ , а также дополнительные сведения  $\hat{I}$ : тип сельскохозяйственной культуры и сезон проведения технологической операции;
- класс  $Object \equiv T$  описывает ячейку  $G_{ijk}^T$  некоторого поля  $F_i$  в рамках задания  $T_{ij}$  для системы управления БПТС.

Классы *Agro* и *Object* объявлены непересекающимися  $Agro \sqcap Object \sqsubseteq \perp$ .

<sup>8</sup> Для повышения компактности и читаемости по сравнению со средствами визуализации редактора *Protégé (OntoGraf)* схема выполнена с помощью сервиса *Mermaid* (<https://mermaid.live>).

<sup>9</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Description\\_logic#Naming\\_convention](https://en.wikipedia.org/wiki/Description_logic#Naming_convention).

Класс *Object* содержит следующие функциональные свойства данных для определения чётких значений результатов агрохимического обследования почвы [21]:

- *soilPh* – показатель кислотности (pH) почвы в единицах по шкале от 1 до 14;
- *humusContent* – показатель содержания гумуса в почве;
- *phosphorusContent* – содержание фосфора в почве;
- *potassiumContent* – содержание калия в почве;

$Object \sqsubseteq = 1 \text{ soilPh. Decimal } \sqcap = 1 \text{ humusContent. Decimal } \sqcap$   
 $\sqcap = 1 \text{ phosphorusContent. Decimal } \sqcap = 1 \text{ potassiumContent. Decimal}.$

Класс *ApplicationSeason*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {Autumn, Spring, Vegetation} используется для описания сезона проведения технологической операции: осень, весна, вегетация.

Описания результатов агрохимического обследования почвы *key*<sup>A</sup> в виде качественных (нечётких) значений имеют вид [21]:

- *SoilPh*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {Acidic, Alkaline, Neutral} описывает уровень кислотности (pH) почвы: кислотная, щелочная, нейтральная;
- *HumusContent*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {HLow, HMedium, HHigh} описывает процент содержания гумуса в почве: низкий, средний, высокий;
- *PhosphorusContent*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {PhDeficient, PhSufficient, PhHigh} описывает уровень содержания фосфора в почве: недостаточный, достаточный, высокий;
- *PotassiumContent*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {PoDeficient, PoSufficient, PoHigh} описывает уровень содержания калия в почве: недостаточный, достаточный, высокий;
- *SoilTexture*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {Light, Medium, Heavy} описывает механический состав почвы как соотношение глины, ила и песка: легкий (песчаная, супесчаная), средний (суглинок) и тяжелый (глинистая);
- *FertilizerType*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {Nitrogen, Phosphorus, Potassium} описывает тип удобрения: азотные, фосфорные и калийные;
- тип сельскохозяйственной культуры: чувствительная к хлору (картофель, ягоды, лук), зерновая (пшеница, ячмень), бобовая (горох, соя), овощная; представлен перечисляемым классом *CropType*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {ChlorineSensitive, Grain, Legume, Vegetable};

Для описания нормы внесения удобрений (от 0–300 кг/га, универсальный диапазон может покрыть большинство типов удобрений) в качестве примера типа управляющего сигнала *key*<sup>G</sup> для средства обработки БПТС *V<sub>j</sub>* используется свойство данных *applicationRate*:

$Object \sqsubseteq = 1 \text{ applicationRate. Decimal}.$

Для описания данного показателя в виде качественных значений используется следующий перечисляемый класс:

*ApplicationRate*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {RNone, RReduced, RMedium, RIncreased, RHigh, RVeryHigh}.

Для организации отношений между классом *Object* и объявленными перечисляемыми классами созданы следующие функциональные объектные свойства:

$Object \sqsubseteq = 1 \text{ hasSoilPh. SoilPh } \sqcap = 1 \text{ hasHumusContent. HumusContent } \sqcap$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasPhosphorusContent. PhosphorusContent } \sqcap$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasPotassiumContent. PotassiumContent } \sqcap$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasSoilTexture. SoilTexture } \sqcap = 1 \text{ hasFertilizerType. FertilizerType}$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasCropType. CropType } \sqcap = 1 \text{ hasApplicationSeason. ApplicationSeason}$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasApplicationRate. ApplicationRate}.$

На основе описанной структуры онтологии формируется множество продукционных правил на языке *SWRL* для организации НЛВ.

### 3.2 Продукционные правила

Компонент *SWRL* БЗ А системы управления БПТС позволяет описывать экспертные знания на основе качественных (нечётких) значений для сокращения времени наполнения БЗ. Например, правила определения нормы внесения азотных удобрений имеют вид [21]:

$\text{hasApplicationSeason}(?o, Autumn) \wedge \text{hasSoilTexture}(?o, Light)$   
 $\wedge \text{hasFertilizerType}(?o, Nitrogen) \rightarrow \text{hasApplicationRate}(?o, RNone)$

```

hasHumusContent(?o, HHigh) ^ hasFertilizerType(?o, Nitrogen) ->
-> hasApplicationRate(?o, RReduced)
hasCropType(?o, Legume) ^ hasFertilizerType(?o, Nitrogen) ->
-> hasApplicationRate(?o, RReduced)
hasCropType(?o, Grain) ^ hasHumusContent(?o, HLow) ^ hasApplicationSeason(?o, Spring) ^
^ hasFertilizerType(?o, Nitrogen) -> hasApplicationRate(?o, RHigh)
hasCropType(?o, Vegetable) ^ hasApplicationSeason(?o, Vegetation) ^
^ hasFertilizerType(?o, Nitrogen) -> hasApplicationRate(?o, RMedium).

```

Для обеспечения корректности и непротиворечивости продукционных правил проведена их валидация. На первом этапе полученный набор *SWRL*-правил проверялся с помощью встроенных средств редактора *Protégé*. На втором этапе агроном проверил правильность задания норм внесения удобрений для различных комбинаций кислотности и плодородия почв.

Агроном или инженер по знаниям может добавлять новые классы и корректировать коэффициенты НЛВ без изменения программного кода алгоритма НЛВ. В качестве направления развития системы рассматривается применение методов машинного обучения (например, на основе анализа дерева решений) [22]. Это позволит автоматически корректировать БЗ на основе накопленных исторических данных.

### 3.3 Нечёткий логический вывод

Для определения параметров и настроек алгоритма НЛВ с помощью *SWRLF* используются *OWL*-аннотации [19]:

- *fuzzyInference* – определение алгоритма НЛВ, применяется к онтологии (рисунок 2а).
- *fuzzyInferenceConjunction*, *fuzzyInferenceDisjunction*, *fuzzyInferenceImplication* – ручное определение параметров алгоритма НЛВ: реализация оператора И, реализация оператора ИЛИ, функция активизации; применяются к онтологии и переопределяют настройки для выбранного алгоритма (рисунок 2а).
- *fuzzyInputVariable* – определение входных переменных; применяется к свойствам онтологии (рисунок 2б).
- *fuzzyOutputVariable* – определение параметра для вычисления в процессе НЛВ; применяется к свойствам онтологии (рисунок 2в).
- *fuzzyOutputVariableDefuzzifier* – ручное определение функции дефаззификации; применяется к свойствам онтологии с аннотацией *fuzzyOutputVariable* и переопределяет настройки для выбранного алгоритма (рисунок 2в).
- *fuzzyVariableMinimum*, *fuzzyVariableMaximum* – определение интервала допустимых значений переменной; применяются к свойствам онтологии с аннотациями *fuzzyInputVariable* или *fuzzyOutputVariable* (рисунок 2в).
- *fuzzyTerm* – определение терм лингвистической переменной; применяется к индивидуальности онтологии. Данная аннотация также позволяет выбрать вид функции принадлежности для фаззификации значения входной переменной (рисунок 2г).

В качестве входных переменных для алгоритма НЛВ с помощью аннотации *fuzzyInputVariable* обозначены следующие свойства класса *Object*: *soilPh*, *humusContent*, *phosphorusContent*, *potassiumContent*, *hasSoilTexture*, *hasFertilizerType*, *hasCropType*, *hasApplicationSeason*.

Выходной переменной с помощью аннотации *fuzzyOutputVariable* обозначено свойство *applicationRate*.

Для каждого лингвистического термина с помощью аннотации *fuzzyTerm* указана связь с соответствующей входной или выходной переменной, а также настройки функции принадлежности для выполнения процесса фаззификации или дефаззификации.

Таблица 1 содержит описание настроек для всех лингвистических термов. Используются кусочно-линейные (треугольные и трапециевидные) функции принадлежности для лингвистических термов. Параметры функций (координаты вершин треугольников и трапеций) определены на основе анализа отраслевых агрохимических справочников и уточнены в ходе экспертных консультаций с агрономами.

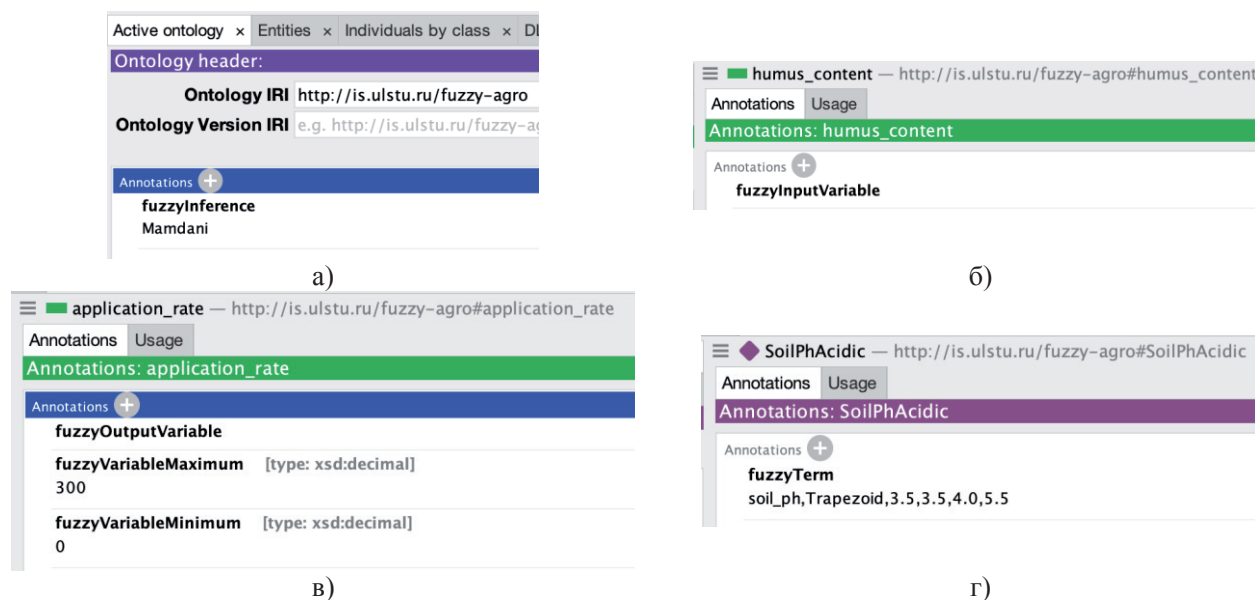


Рисунок 2 – Пример использования аннотаций для настройки параметров нечёткого логического вывода:

- а) добавление аннотации для онтологии;
- б) добавление аннотации для свойства данных в качестве входной переменной;
- в) добавление аннотации для свойства данных в качестве выходной переменной;
- г) добавление аннотации для индивидуальности в качестве лингвистической переменной

Значения объектных свойств индивидуальности перечисляемых классов обозначаются лингвистическими термами с помощью аннотации *fuzzyTerm*. Значение функции принадлежности определяется автоматически: у выбранного терма степень принадлежности равна 1, у остальных – ноль.

#### 4 Пример

Система управления БПТС представляет собой комплексное программное обеспечение, которое состоит из следующих компонентов:

- Учётная система «1С:Предприятие 8. ERP Агропромышленный комплекс»<sup>10</sup> позволяет получить сведения о полях, технологических операциях, доступных транспорт-

Таблица 1 – Настройки лингвистических термов

| Переменная        | Лингвистический терм | Функция принадлежности        |
|-------------------|----------------------|-------------------------------|
| soilPh            | Acidic               | Trapezoid(3.5, 3.5, 4.0, 5.5) |
|                   | Neutral              | Triangle(5.2, 6.0, 7.2)       |
|                   | Alkaline             | Trapezoid(6.8, 7.8, 9.0, 9.0) |
| humusContent      | HLow                 | Trapezoid(0, 0, 1.5, 2.5)     |
|                   | HMedium              | Triangle(1.5, 2.5, 4.5)       |
|                   | HHigh                | Trapezoid(3.5, 4.5, 6.0, 6.0) |
| phosphorusContent | PhDeficient          | Trapezoid(0, 0, 30, 80)       |
|                   | PhSufficient         | Triangle(50, 100, 180)        |
|                   | PhHigh               | Trapezoid(150, 200, 250, 250) |
| potassiumContent  | PoDeficient          | Trapezoid(0, 0, 60, 120)      |
|                   | PoSufficient         | Triangle(80, 140, 220)        |
|                   | PoHigh               | Trapezoid(180, 240, 300, 300) |
| applicationRate   | RNone                | Trapezoid(0, 0, 10, 30)       |
|                   | RReduced             | Triangle(20, 60, 100)         |
|                   | RMedium              | Triangle(80, 120, 160)        |
|                   | RIncreased           | Triangle(140, 180, 220)       |
|                   | RHigh                | Triangle(200, 240, 280)       |
|                   | RVeryHigh            | Trapezoid(260, 280, 300, 300) |

<sup>10</sup> <https://solutions.1c.ru/catalog/erpack>.

ных средствах и средствах обработки.

- Географическая информационная система (ГИС) «Разметка сельскохозяйственных полей» позволяет формировать электронные карты полей с учётом различных свойств слоёв: препятствия, болезни, данные агрохимического обследования.
- Модуль формирования заданий для БПТС [18].
- БЗ позволяет накапливать экспертные знания для решения задачи автономного управления БПТС [10].

Для интеграции разработанных программных решений с учётной системой сельхозпредприятия реализовано расширение для конфигурации «1С:Предприятие 8. ERP Агропромышленный комплекс», обеспечивающее обмен данными через *REST API*<sup>11</sup> по протоколу *HTTP*. Использование штатного механизма расширений платформы 1С: Предприятие 8<sup>12</sup> гарантирует бесшовное включение компонента обмена в любую информационную базу на основе указанной конфигурации без изменения её кода. Разработанное расширение взаимодействует с объектами метаданных подсистемы «Растениеводство»<sup>13</sup> для извлечения сведений о характеристиках полей, возделываемых сельхозкультурах, планируемых технологических операциях, доступных транспортных средствах, средствах обработки и расходных материалах.

Пример формирования области для ввода данных агрохимического обследования представлен на рисунке 3, в котором некоторая ячейка поля определена в качестве индивидуальности *object* класса *Object* со следующими значениями показателей результатов агрохимического обследования:

*object: Object*

*(object, 5.0): soilPh (object, 1.8): humusContent (object, 45): phosphorusContent (object, 110): potassiumContent (object, Heavy): hasSoilTexture.*

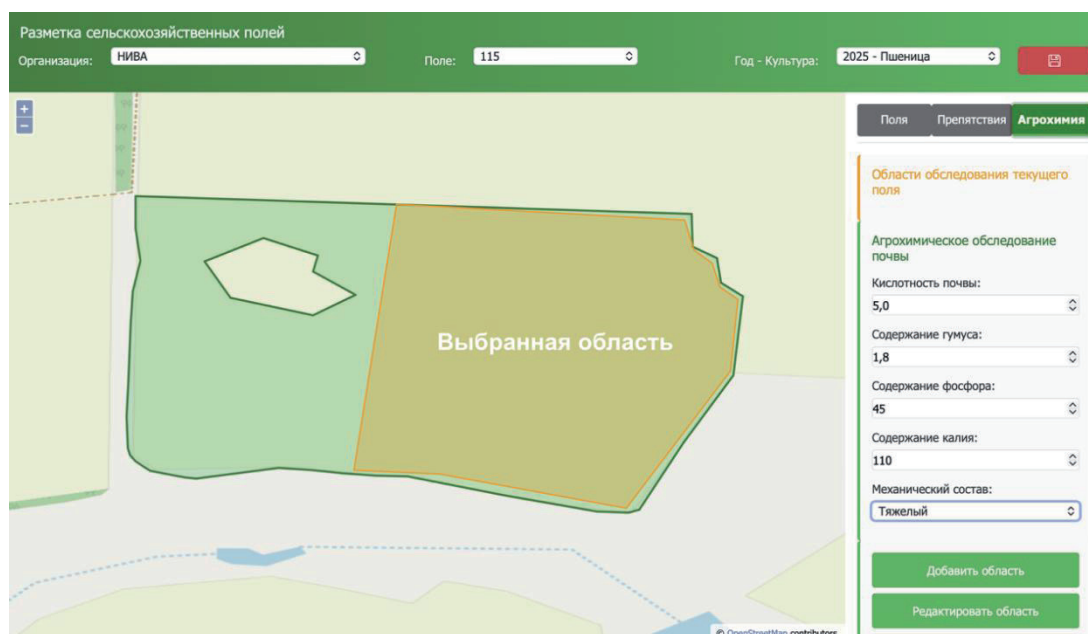


Рисунок 3 – Пример ввода данных агрохимического обследования для выбранной области поля

Тип сельскохозяйственной культуры (пшеница), сезон проведения технологической операции (весна) и тип удобрения (азотные) задаются на основе данных из учётной системы: *(object, Grain): hasCropType, (object, Nitrogen): hasFertilizerType,*

<sup>11</sup> <https://restapitutorial.ru>.

<sup>12</sup> <https://v8.1c.ru/platforma/rasshireniya/>.

<sup>13</sup> <https://solutions.1c.ru/catalog/erpapk/rastenievodstvo>.

(*object, Spring*): *hasApplicationSeason*.

В результате выполнения этапа фаззификации для обозначенных входных переменных получены результаты, которые представлены в таблице 2.

По результатам выполнения этапов агрегации и активации рассчитаны степени уверенности для антецедентов и консеквентов продукционных *SWRL*-правил, выполнено следующее правило со степенью уверенности консеквента 0.7:

$hasCropType(?o, Grain) \wedge hasHumusContent(?o, HLow) \wedge hasApplicationSeason(?o, Spring) \wedge hasFertilizerType(?o, Nitrogen) \rightarrow hasApplicationRate(?o, RHigh)$

В результате выполнения аккумуляции и дефаззификации в онтологию добавлена аксиома (*object, 239.9*): *application\_rate*. Таким образом, норма внесения удобрений составила 239.9 кг/га.

Для оценки эффективности предложенного подхода проведено сравнительное моделирование процесса внесения минеральных удобрений (аммиачной селитры) для участка поля площадью 40 га. Сравнение проводилось между традиционным методом (внесение по средней норме на поле) и предлагаемым методом внесения на основе механизма НЛВ с учётом разбиения поля на ячейки.

Параметры эксперимента:

- традиционный метод: средняя норма внесения – 150 кг/га (усреднённый показатель по результатам агрохимического обследования всего поля); итоговый расход: 6000 кг.
- предлагаемый метод: расчёт индивидуальной нормы для каждой ячейки (60х60 м) на основе БЗ (рН, содержание фосфора и калия).

В результате применения алгоритма НЛВ для 25% ячеек (участки с высоким содержанием питательных веществ) норма была снижена до 110–120 кг/га, а для 10% (дефицитные участки) – повышена до 170 кг/га.

Суммарный расход удобрений составил 5580 кг, что на 7% ниже традиционного метода при сохранении целевого агрономического эффекта. Среднеквадратичное отклонение расчётной нормы от экспертных рекомендаций агронома составило не более 2,4%.

Важным условием практического применения предложенного подхода является его невысокая вычислительная сложность, особенно при обработке массивов данных для полей большой площади (тысячи гектаров). В ходе экспериментальной оценки прототипа программного модуля, реализованного на языке *Java*, установлено, что:

- около 1 секунды требуется на запуск виртуальной машины и загрузку *OWL*-онтологии;
- среднее время выполнения логического вывода для одной ячейки поля в рамках одной сессии составляет не более 15–20 мс на процессоре с тактовой частотой 2.5 ГГц.

Время формирования полной карты-задания для типичного поля площадью 100 га, состоящего из 278 ячеек, составляет около 5 секунд.

Таблица 2 – Результаты фаззификации

| Переменная                  | Лингвистический терм     | Степень принадлежности |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------|
| <i>soilPh</i>               | <i>Acidic</i>            | 0.333                  |
|                             | <i>Neutral</i>           | 0.0                    |
|                             | <i>Alkaline</i>          | 0.0                    |
| <i>humusContent</i>         | <i>HLow</i>              | 0.7                    |
|                             | <i>HMedium</i>           | 0.3                    |
|                             | <i>HHigh</i>             | 0.0                    |
| <i>phosphorusContent</i>    | <i>PhDeficient</i>       | 0.7                    |
|                             | <i>PhSufficient</i>      | 0.0                    |
|                             | <i>PhHigh</i>            | 0.0                    |
| <i>potassiumContent</i>     | <i>PoDeficient</i>       | 0.167                  |
|                             | <i>PoSufficient</i>      | 0.5                    |
|                             | <i>PoHigh</i>            | 0.0                    |
| <i>hasSoilTexture</i>       | <i>Light</i>             | 0.0                    |
|                             | <i>Medium</i>            | 0.0                    |
|                             | <i>Heavy</i>             | 1.0                    |
| <i>hasFertilizerType</i>    | <i>Nitrogen</i>          | 1.0                    |
|                             | <i>Phosphorus</i>        | 0.0                    |
|                             | <i>Potassium</i>         | 0.0                    |
| <i>hasCropType</i>          | <i>ChlorineSensitive</i> | 0.0                    |
|                             | <i>Grain</i>             | 1.0                    |
|                             | <i>Legume</i>            | 0.0                    |
|                             | <i>Vegetable</i>         | 0.0                    |
| <i>hasApplicationSeason</i> | <i>Autumn</i>            | 0.0                    |
|                             | <i>Spring</i>            | 1.0                    |
|                             | <i>Vegetation</i>        | 0.0                    |

## Заключение

В статье представлен комплексный подход к автоматизации управления БПТС в точном земледелии, основанный на применении онтологии, БЗ и НЛВ.

Основные результаты работы включают:

- 1) формальную постановку задачи формирования заданий для БПТС, учитывающую пространственные данные, агрономические требования и технические ограничения;
- 2) ГИС с поддержкой многослойного представления электронной карты поля;
- 3) структуру БЗ на основе *OWL*-онтологии, *SWRL*-правил и механизма НЛВ;
- 4) алгоритм формирования заданий для БПТС.

Преимуществами предложенного подхода являются возможность учёта качественных (нечётких) экспертных оценок, адаптивность к изменяющимся условиям, интеграция с существующими учётными системами сельхозпредприятия на базе конфигурации «1С:Предприятие 8. ERP Агропромышленный комплекс».

Ограничения и недостатки включают: зависимость качества решений от полноты БЗ, необходимость ручного конфигурирования продукционных правил, технические погрешности позиционирования БПТС.

В рассмотренном примере суммарный расход удобрений при использовании предложенного подхода на 7% ниже по сравнению с традиционным методом при сохранении целевого агрономического эффекта. Среднеквадратичное отклонение расчётной нормы от экспертных рекомендаций агронома составило не более 2,4%.

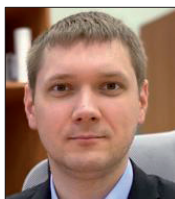
Предложенная структура онтологии может быть адаптирована для решения смежных задач точного земледелия путём расширения БЗ без изменения логики работы системы.

## Список источников

- [1] *Широбокова А.А., Мохаммад Д.А., Руднев С.Г.* Перспективы автоматизации систем управления в агропромышленном комплексе России. *Журнал прикладных исследований*. 2024. №11. С.23–27. DOI: 10.47576/2949-1878.2024.11.11.003.
- [2] *Zhai Z., Martínez J.F., Beltran V., Martinez N.L.* Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol.170. P.105256. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.
- [3] *Lakhiar I.A., Jianmin G., Syed T.N., Chandio F.A., Buttar N.A., Qureshi W.A.* Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system. *Journal of sensors*. 2018. Vol.2018. №1. P.8672769. DOI: 10.1155/2018/8672769.
- [4] *Ju C., Son H.I.* Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation. *Electronics*. 2018. Vol.7. №9. P.162. DOI: 10.3390/electronics7090162.
- [5] *Kim J., Kim S., Ju C., Son H.I.* Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access*. 2019. Vol.7. P.105100–105115. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932119.
- [6] *Hassan S.I., Alam M.M., Illahi U., Al Ghamdi M.A., Almotiri S.H., Su'ud M.M.* A systematic review on monitoring and advanced control strategies in smart agriculture. *IEEE Access*. 2021. Vol.9. P.32517–32548. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3057865.
- [7] *Акимов С.С., Болодурина И.П.* Построение СППР на основе онтологии молочного производства. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11. №1(29). С.64–75. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-64-75.
- [8] *Боргест Н.М., Будаев Д.В., Травин В.В.* Онтология проектирования точного земледелия: состояние вопроса, пути решения. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7. №4(26). С.423–442. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-423-442.
- [9] *Семенов А.И., Соколов Б.В., Спасивцев А.В.* Комплексный подход к решению задач планирования в кормопроизводстве. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №2(56). С.198–210. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210.
- [10] *Романов А.А., Рубцов И.А., Святков К.В., Филиппов А.А.* Подход к построению базы знания для программного управления беспилотными транспортными средствами. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14. № 1(51). С.117–128. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-117-128.

- [11] **Рубцов И.А., Житков Р.В., Михайлов В.С., Святлов К.В.** Модели и средства проектирования подсистемы исполнения команд высокоавтоматизированного транспортного средства. *Автоматизация процессов управления*. 2024. № 1(75). С.89–96. DOI: 10.35752/1991-2927\_2024\_1\_75\_89.
- [12] **Bhuyan B.P., Tomar R., Cherif A.R.** A systematic review of knowledge representation techniques in smart agriculture (urban). *Sustainability*. 2022. Vol.14. №.22. P.15249. DOI: 10.3390/su142215249.
- [13] **Song C., Ma W., Li J., Qi B., Liu B.** Development trends in precision agriculture and its management in China based on data visualization. *Agronomy*. 2022. Vol.12. №.11. P. 2905. DOI: 10.3390/agronomy12112905.
- [14] **Symeonaki E., Arvanitis K.G., Piromalis D., Tseles D., Balafoutis A.T.** Ontology-based IoT middleware approach for smart livestock farming toward agriculture 4.0: A case study for controlling thermal environment in a pig facility. *Agronomy*. 2022. Vol.12. №.3. P. 750. DOI: 10.3390/agronomy12030750.
- [15] **San Emeterio de la Parte M., Lana Serrano S., Muriel Elduayen M., Martínez-Ortega J.F.** Spatio-temporal semantic data model for precision agriculture IoT networks. *Agriculture*. 2023. Vol.13. №.2. P. 360. DOI: 10.3390/agriculture13020360.
- [16] **Senapaty M.K., Ray A., Padhy N.** IoT-enabled soil nutrient analysis and crop recommendation model for precision agriculture. *Computers*. 2023. Vol.12. №.3. P.61. DOI: 10.3390/computers12030061.
- [17] **Wilson S.I., Goonetillake J.S., Ginige A., Walisadeera A.I.** Towards a usable ontology: the identification of quality characteristics for an ontology-driven decision support system. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P.12889–12912. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3146331.
- [18] **Filippov A., Gilmetdinova E., Romanov A.** Development of an Algorithm for Path Planning for Highly Autonomous Agricultural Vehicles. *2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2025. P.431–436. DOI: 10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177433.
- [19] **Filippov A., Romanov A.** Construction of a Fuzzy Logical Inference System Based on Semantic Web Technologies. *2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2024. P.768–773, DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694476.
- [20] *The description logic handbook: Theory, implementation and applications / F. Baader (ed.)*. UK, Cambridge : Cambridge university press, 2003. 622 p.
- [21] **Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.** *Агрохимия*. 5-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2025. 584 с.
- [22] **Romanov A.A., Filippov A.A., Yarushkina N.G.** An approach to generating fuzzy rules for a fuzzy controller based on the decision tree interpretation. *Axioms*. 2025. Vol.14(3). P.196. DOI: 10.3390/axioms14030196.

## Сведения об авторах



**Романов Антон Алексеевич**, 1986 г. рождения. Окончил УлГТУ в 2009 г., к.т.н. (2013). Заведующий кафедрой «Информационные системы» УлГТУ. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 120 работ в области анализа данных и процессов. Author ID (РИНЦ): 684949; Author ID (Scopus): 55903279200. [romanov73@gmail.com](mailto:romanov73@gmail.com).

**Филиппов Алексей Александрович**, 1987 г. рождения. Окончил УлГТУ в 2009 г., к.т.н. (2013). Доцент кафедры «Информационные системы» УлГТУ.

Член Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 120 работ в области инженерии знаний и анализа данных. Author ID (РИНЦ): 708454; Author ID (Scopus): 57191472723. [al.al.filippov@gmail.com](mailto:al.al.filippov@gmail.com). ✉



Поступила в редакцию 24.11.2025, после рецензирования 14.05.2026. Принята к публикации 18.05.2026.



## Automation of unmanned vehicle control in precision agriculture

© 2026, A.A. Romanov, A.A. Filippov ✉

*Ulyanovsk State Technical University (UlSTU), Ulyanovsk, Russia*

### Abstract

This paper examines the automation of unmanned vehicle control in precision agriculture. Based on a domain ontology, a comprehensive approach to generating tasks, including the trajectory and control signals for agricultural field treatment equipment, is proposed. A software system has been developed, comprising a geographic information system for creating electronic field maps, a task generation algorithm, and a fuzzy inference module based on ontologies and production rules. A distinctive feature of this approach is the formalization of agronomists' expert knowledge, making it possible to take into account soil and climate conditions, crop characteristics, and parameters of technological operations. An ontology structure for describing technological field treatment operations and a fuzzy inference mechanism for calculating fertilizer application rates are presented, enabling consideration of the characteristics of a specific field area, agricultural crop, and technological operation being performed. An extension for the configuration 1C:ERP Agro-Industrial Complex was developed to integrate the proposed software system with the accounting system of an agricultural enterprise. An example of applying the system to calculate fertilizer application rates for grain crops is described. The results demonstrated that the total fertilizer consumption was 7% lower when using the proposed approach compared to the traditional method.

**Keywords:** *unmanned vehicle, ontology, fuzzy inference, control automation, technological operation, precision agriculture.*

**For citation:** *Romanov AA, Filippov AA. Automation of unmanned vehicle control in precision agriculture [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 255-268. DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-2-255-268.*

**Acknowledgment:** The authors express their gratitude to the management of Agroservice IT Group.

**Financial Support:** This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-11-00265).

**Authors' contributions:** *Filippov A.A.* – problem formulation, concept development, model formalization. *Romanov A.A.* – expert evaluation of materials, software system development, verification of results.

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

### List of figures and tables

Figure 1 – Ontology scheme

Figure 2 – Example of using annotations to configure fuzzy inference parameters: a) adding an annotation for the ontology; b) adding an annotation for a data property as an input variable; c) adding an annotation for a data property as an output variable; d) adding an annotation for an individual as a linguistic variable

Figure 3 – Example of inputting agrochemical survey data for a selected field area

Table 1 – Settings of linguistic terms

Table 2 – Fuzzification results

### References

- [1] *Shirobokova AA, Mukhammed DA, Rudnev SG.* Prospects for automation of control systems in the agro-industrial complex of Russia [In Russian]. *Journal of Applied Research*. 2024; (11): 23–27. DOI: 10.47576/2949-1878.2024.11.11.003.
- [2] *Zhai Z, Martínez JF, Beltran V, Martinez NL* Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020; 170: 105256. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.
- [3] *Lakhiar IA, Jianmin G, Syed TN, Chandio FA, Buttar NA, Qureshi WA.* Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system. *Journal of Sensors*. 2018; 2018(1): 8672769. DOI: 10.1155/2018/8672769.
- [4] *Ju C, Son HI.* Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation. *Electronics*. 2018; 7(9): 162. DOI: 10.3390/electronics7090162.

- [5] **Kim J, Kim S, Ju C, Son HI.** Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access.* 2019; 7: 105100–105115. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932119.
- [6] **Hassan SI, Alam MM, Illahi U, Al Ghamdi MA, Almotiri SH, Su'ud MM.** A systematic review on monitoring and advanced control strategies in smart agriculture. *IEEE Access.* 2021; 9: 32517–32548. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3057865.
- [7] **Akimov SS, Bolodurina IP.** DSS construction based on the ontology of dairy production [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2021; 11(1): 64–75. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-64-75.
- [8] **Borgest NM, Budaev DV, Travin VV.** Ontology of precision agriculture design: problem state, solution approaches [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2017; 7(4): 423–442. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-423-442.
- [9] **Semenov AI, Sokolov BV, Spesivtsev AV.** An integrated approach to solving planning problems in forage production [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2025; 15(2): 198–210. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210.
- [10] **Romanov AA, Rubtsov IA, Svyatov KV, Filippov AA.** Building a knowledge base for autonomous control of unmanned vehicles [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2024; 14(1): 117–128. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-117-128.
- [11] **Rubtsov IA, Zhitkov RV, Mikhailov VS, Sviatov KV.** Models and tools for designing the command execution subsystem of a highly automated vehicle [In Russian]. *Automation of Control Processes.* 2024; 1(75): 89–96. DOI: 10.35752/1991-2927\_2024\_1\_75\_89.
- [12] **Bhuyan BP., Tomar R, Cherif AR.** A systematic review of knowledge representation techniques in smart agriculture (urban). *Sustainability.* 2022; 14(22): 15249. DOI: 10.3390/su142215249.
- [13] **Song C, Ma W, Li J, Qi B, Liu B.** Development trends in precision agriculture and its management in China based on data visualization. *Agronomy.* 2022; 12(11): 2905. DOI: 10.3390/agronomy12112905.
- [14] **Symeonaki E., Arvanitis KG, Piromalis D, Tseles D, Balafoutis AT.** Ontology-based IoT middleware approach for smart livestock farming toward agriculture 4.0: A case study for controlling thermal environment in a pig facility. *Agronomy.* 2022; 12(3): 750. DOI: 10.3390/agronomy12030750.
- [15] **San Emeterio de la Parte M, Lana Serrano S, Muriel Elduayen M, Martínez-Ortega JF.** Spatio-temporal semantic data model for precision agriculture IoT networks. *Agriculture.* 2023; 13(2): 360. DOI: 10.3390/agriculture13020360.
- [16] **Senapaty MK, Ray A, Padhy N.** IoT-enabled soil nutrient analysis and crop recommendation model for precision agriculture. *Computers.* 2023; 12(3): 61. DOI: 10.3390/computers12030061.
- [17] **Wilson SI, Goonetillake JS, Ginige A, Walisadeera AI.** Towards a usable ontology: the identification of quality characteristics for an ontology-driven decision support system. *IEEE Access.* 2022; 10: 12889–12912. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3146331.
- [18] **Filippov A, Gilmetdinova E, Romanov A.** Development of an Algorithm for Path Planning for Highly Autonomous Agricultural Vehicles. *2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon).* *IEEE,* 2025: 431–436. DOI: 10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177433.
- [19] **Filippov A, Romanov A.** Construction of a Fuzzy Logical Inference System Based on Semantic Web Technologies. *2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon).* *IEEE,* 2024: 768–773. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694476.
- [20] The description logic handbook: Theory, implementation and applications / F. Baader (ed.). UK, Cambridge: Cambridge university press, 2003. 622 p.
- [21] **Yagodin BA, Zhukov YP, Kobzarenko VI.** Agrochemistry [In Russian]. 5th ed. Saint Petersburg: Lan; 2025. 584 p.
- [22] **Romanov AA, Filippov AA, Yarushkina NG.** An approach to generating fuzzy rules for a fuzzy controller based on the decision tree interpretation. *Axioms.* 2025; 14(3): 196. DOI: 10.3390/axioms14030196.

## About the authors

**Anton Alekseevich Romanov** (b. 1986) graduated from the UISTU (2009), Candidate of Technical Sciences (2013). Head of the Department of information systems, UISTU, Member of the Russian Association of Artificial Intelligence. He is the author and a co-author of about 120 scientific articles and abstracts in the field of Data and Process Analysis. Author ID (RSCI): 684949; Author ID (Scopus): 55903279200. [romanov73@gmail.com](mailto:romanov73@gmail.com).

**Aleksey Aleksandrovich Filippov** (b. 1987) graduated from the UISTU (2009), Candidate of Technical Sciences (2013). Associate Professor at the Department of information systems, UISTU, Member of the Russian Association of Artificial Intelligence. He is a co-author of about 120 scientific articles and abstracts in the field of Knowledge Engineering and Data Analysis. Author ID (RSCI): 708454; Author ID (Scopus): 57191472723. [al.al.filippov@gmail.com](mailto:al.al.filippov@gmail.com) ✉.

Received November 24, 2025. Revised May 14, 2026. Accepted May 18, 2026.



## Онтологическое моделирование компонентов цифровой компетентности преподавателя высшей школы

© 2026, Т.М. Шамсутдинова

Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

### Аннотация

Исследование направлено на создание онтологической модели, позволяющей структурировать ключевые знания, умения и навыки преподавателей вузов в области владения цифровыми технологиями в образовании. Сформирована многомерная онтологическая модель, включающая основные компоненты цифровой компетентности и их взаимосвязи. Построены шесть классификаций компонентов цифровой компетентности преподавателя высшей школы (по видам педагогической деятельности; по предметным областям цифровых технологий; по уровню владения цифровыми технологиями; по видам мышления; по уровню требований к использованию электронной информационно-образовательной среды вуза; по структуре профессиональной компетентности). Данная модель реализована в среде онтологического редактора: создано 107 классов объектов, 101 подкласс, 214 аксиом. Первичная апробация модели проведена на примере работы преподавателей Башкирского государственного аграрного университета в его электронной образовательной среде. Разработанная модель может быть использована для оценки уровня цифровой компетентности и разработки индивидуальных планов профессионального развития преподавателей.

**Ключевые слова:** цифровизация образования, моделирование, онтология, профессиональная компетентность, цифровая компетентность, преподаватель, высшее образование.

**Цитирование:** Шамсутдинова Т.М. Онтологическое моделирование компонентов цифровой компетентности преподавателя высшей школы. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.269-282. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-269-282.

**Благодарности:** автор выражает благодарность руководству Башкирского государственного аграрного университета за поддержку и содействие в проведении исследования.

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

### Введение

С развитием информационно-коммуникационных технологий цифровая компетентность (ЦК) становится важным фактором профессиональной успешности преподавателей вуза. Онтологическое моделирование ЦК может способствовать повышению качества научно-образовательной среды, адаптивности преподавателей к современным требованиям, созданию основ для разработки критериев оценки преподавателей в контексте цифровой трансформации образовательного пространства. Цель данной статьи – предложить онтологическую модель компонентов ЦК преподавателей высшей школы.

## 1 Цифровая грамотность и цифровая компетентность

Понятия цифровая грамотность (ЦГ) и ЦК отражают разные уровни и аспекты владения цифровыми технологиями (ЦТ). ЦГ принято определять как базовый уровень знаний и навыков, необходимых для использования цифровых устройств, Интернет-ресурсов и цифровых сервисов [1, 2]. ЦК включает системное владение знаниями и умениями, необходимыми для эффективного использования ЦТ в профессиональной деятельности, при критическом анализе информации и создании сложного цифрового контента [3, 4].

В работе [5] показана эволюция компетентности преподавателей от ЦГ к ЦК, описаны модели структуры ЦК: *SAMR* (*Substitution, Augmentation, Modification, Redefinition*, т.е. замещение, дополнение, модификация, переопределение) используется для обозначения прогресса в применении технологий по уровням (стадиям); *TPACK* (*Technological Pedagogical and Content Knowledge*, т.е. технологические, педагогические и предметные знания).

В [6] рассматривается взаимосвязь между областями модели *TPACK* и гибкими навыками (критическое мышление, коммуникация, управление личным временем и др.).

В [7] рассмотрены элементы ЦК: информационная грамотность, цифровая технологическая грамотность, мультимедийная грамотность, цифровая коммуникативная грамотность.

В [8] ЦК преподавателей вузов рассматривается как «определённая совокупность умений и навыков, необходимых для выполнения конкретных трудовых действий на основе использования ЦТ». Выделяются группы компетентности: базовые, универсальные, общетехнические, специальные (отраслевые).

В [9] ЦК педагогов подразделяют на следующие группы: управление информацией и данными; коммуникация и сотрудничество в цифровой среде; создание цифрового контента; безопасность и решение проблем в цифровой среде; информационная и ЦГ.

Общие вопросы представления знаний о предметной области (ПрО) с помощью онтологического моделирования рассмотрены в ряде работ. В [10] вводится способ измерения структурных отношений между изучаемыми объектами, рассматриваются различные аспекты автоматизации конструирования структуры классов объектов (понятий) ПрО. Использование онтологического подхода к построению инновационных автоматизированных систем управления образованием, включающих построение индивидуальных траекторий обучения, представлено в [11]. В [12] рассмотрены возможности онтологического моделирования и сетевых технологий для построения систем электронного обучения. В [13] онтологический подход использован при разработке образовательного контента. В [14] представлен пример онтологического моделирования профиля метаданных образовательных ресурсов. В [15] описана модель представления компетенций, основанная на онтологии в контексте требований рынка труда. Модель управления компетенциями на основе онтологии для поддержки совместной работы и обучения представлена в [16], где рассмотрены такие группы компетенций как техническая компетентность, анализ и инжиниринг, когнитивная компетентность, проектная компетентность, бизнес-компетенция и др.

Онтологическая модель процесса интенсификации компетенций описана в [17], где процесс расширения компетенций учителей осуществляется с учётом интеграции естественно-научного, технологического, инженерного и математического образования. Построенная онтология включает следующие классы: учебный курс, результаты обучения, средства электронного обучения, участники образовательных отношений, план урока, нормативная база.

В [18] предложен подход к инженерному образованию, ориентированному на компетенции, а в [19] рассмотрено понятие цифрового профиля педагога и выделено шесть ключевых компонент: личная информация, профессиональная деятельность, научная деятельность, ЦГ, проектная деятельность, медиакommunikация. В [20] предложена модель подготовки к разработке онлайн-курсов, которая включает ряд компонентов: целевой, содержательный, деятельностный, результативный, мотивационный.

В [21] рассмотрена модель структуры ЦК граждан (*Digital Competence Framework for Citizens*, «*DigComp*»), в которой описаны ключевые компоненты ЦК граждан, как ориентир для оценки и повышения уровня их цифровых навыков. В структуре *DigComp 2.1* выделено пять областей, содержащих 21 ЦК. Развитием данной модели стала модель *DigCompEdu* [22], структура которой направлена на выявление и описание ЦК, характерных для педагогов, и содержит 22 обобщённые компетенции.

Ретроспективный обзор эволюции ЦТ в зарубежном образовании приводится в [23], отдельный раздел которого посвящён применению искусственного интеллекта в образовании. Опыт применения генеративного искусственного интеллекта в учебном процессе для развития навыков критической оценки описан в [24]. Вопросы развития ЦК в сфере образования рассмотрены в многочисленных работах, например, [25-28] и др.

Настоящее исследование основано на использовании системного подхода, методов классификации данных, онтологического моделирования [29, 30]. В качестве моделей применялись *DigComp* (версия *DigComp 2.1*) [21], *DigCompEdu* [22]; источники данных: перечень ключевых компетенций цифровой экономики<sup>1</sup>; Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (ФГОС ВО)<sup>2</sup>, включающие требования к электронной информационно-образовательной среде вузов (ЭИОС); реестр профессиональных стандартов в области «образования и науки»<sup>3</sup>.

В проекте профессионального стандарта «Педагогический работник высшего образования»<sup>4</sup> включены вопросы цифровизации образовательного процесса.

## 2 Модели и результаты

Для оценки уровня ЦК преподавателя вуза можно предложить многомерную модель, основанную на различных подходах к классификации структуры ЦК.

### ***К1 Классификация по видам педагогической деятельности:***

К1.1 Учебно-методическая – использование цифровых инструментов для повышения эффективности преподавания и создания образовательного контента. Может включать, например:

К1.1.1 Создание и использование цифрового контента (электронные лекции, видеоматериалы, компьютерные презентации, онлайн-курсы и т.д.);

К1.1.2 Цифровая оценка и контроль знаний (электронные задания, тестирование);

К1.1.3 Интерактивные средства обучения (виртуальные доски, платформы вебинаров и пр.);

К1.1.4 Цифровые системы коммуникаций (электронная почта, социальные сети, видеоконференции и пр.);

К1.1.5 Электронные платформы управления обучением;

К1.1.6 Автоматизация мониторинга и анализа образовательного процесса (электронные журналы, аттестационные ведомости и др.);

К1.1.7 Методика электронного обучения (дидактические принципы, персонализированные образовательные траектории, модели инклюзивного образования и т.д.);

К1.2 Научно-исследовательская – использование информационных и коммуникационных инструментов для повышения эффективности проведения научных исследований, например:

К1.2.1 Электронные библиотеки и базы данных;

К1.2.2 Исследовательское и аналитическое программное обеспечение;

К1.2.3 Компьютерные лаборатории и виртуальные классы;

К1.2.4 Облачные технологии доступа к ресурсам высокотехнологических кластеров;

К1.2.5 Материалы научных исследований:

К1.2.5.1 Научные статьи, связанные с применением ЦТ;

К1.2.5.2 Научные доклады по проблемам цифровизации;

<sup>1</sup> Приказ Минэкономразвития России от 24.01.2020 N 41 "Об утверждении методик расчета показателей федерального проекта "Кадры для цифровой экономики" национальной программы "Цифровая экономика Российской Федерации", Приложение № 1 к Методике расчета показателя «Количество выпускников системы профессионального образования с ключевыми компетенциями цифровой экономики, Тысяча человек», Перечень ключевых компетенций цифровой экономики. [https://www.economy.gov.ru/material/file/bd31fe31b5135c35e402b702c346f304/41\\_24012020.pdf](https://www.economy.gov.ru/material/file/bd31fe31b5135c35e402b702c346f304/41_24012020.pdf).

<sup>2</sup> Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования. ФГОС ВО (3++) по направлениям бакалавриата. <https://fgosvo.ru/fgosvo/index/24>.

<sup>3</sup> Реестр профессиональных стандартов, Область профессиональной деятельности: 01 Образование и наука. <https://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/reestr-professionalnykh-standartov/>.

<sup>4</sup> Реестр уведомлений о разработке/ пересмотре профессиональных стандартов. Педагогический работник высшего образования. [https://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/reestr-uvdomleniy-o-razrabotke-peresmotre-professionalnykh-standartov/index.php?ELEMENT\\_ID=125137\\_](https://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/reestr-uvdomleniy-o-razrabotke-peresmotre-professionalnykh-standartov/index.php?ELEMENT_ID=125137_)

K1.2.5.3 Патенты на регистрацию программ и баз данных;

K1.2.5.4 Отчёты по грантовой деятельности;

K1.2.5.5 Отчёты по договорной научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе;

K1.2.6 Руководство научной работой студентов;

K1.3 Воспитательная – создание развивающей цифровой среды, цифровая социализация обучающихся за счёт цифровых коммуникаций (K1.1.4), технологий интерактивности (K1.1.3) и др.;

K1.4 Организационно-управленческая – цифровое планирование и организация учебного процесса.

### ***K2 Классификация по Про ЦТ:***

K2.1 Техническая компетентность:

K2.1.1 Компьютерное оборудование;

K2.1.2 Сетевое оборудование;

K2.1.3 Периферийные устройства;

K2.1.4 Мобильные устройства;

K2.2 Информационная компетентность:

K2.2.1 Поиск информации;

K2.2.2 Анализ информации;

K2.2.3 Офисные ЦТ;

K2.2.4 Базы данных;

K2.2.5 Операционные системы;

K2.2.6 Информационные системы;

K2.2.7 Специализированные пакеты прикладных программ;

K2.2.8 Облачные технологии;

K2.2.9 Программирование:

K2.2.9.1 Знание базовых конструкций языка программирования;

K2.2.9.2 Знание структурированных типов данных, прикладных библиотек;

K2.2.10 Искусственный интеллект;

K2.2.11 Обработка больших данных;

K2.3 Информационная безопасность:

K2.3.1 Защита персональных данных;

K2.3.2 Обеспечение конфиденциальности информации;

K2.3.3 Антивирусная защита;

K2.3.4 Интеллектуальная собственность на цифровые ресурсы, авторское право;

K2.3.5 Сетевой этикет.

### ***K3 Классификация по уровню владения ЦТ:***

K3.1 Базовый уровень (ЦГ), соответствует работе с технологиями K2.2.1- K2.2.3;

K3.2 Продвинутый уровень (ЦК), соответствует применению технологий K2.2.4- K2.2.8, K2.2.9.1;

K3.3 Экспертный уровень – умение обработки и анализа данных с построением аналитических моделей, применением методов машинного обучения, искусственного интеллекта и др., соответствует навыкам работы с технологиями K2.2.9.2, K2.2.10, K2.2.11.

### ***K4 Классификация по видам мышления:***

K4.1 Аналитический – способность к анализу и синтезу информации (соответствует K2.2.2);

K4.2 Критический – навыки критического мышления в цифровой среде;

K4.3 Абстрактно-логический – умение обобщать информацию, делать логические заключения;

K4.4 Системный – умение систематизировать, структурировать информацию;

K4.5 Деятельностный – способность применять свои цифровые знания и умения для достижения конкретных целей в профессиональной деятельности;

K4.6 Коммуникативный – умение эффективно передавать и воспринимать информацию в процессе цифрового взаимодействия и цифровых коммуникаций (соответствует K1.1.4);

K4.7 Проективный – планирование и моделирование педагогических сценариев с использованием ЦТ;

K4.8 Алгоритмический – алгоритмический подход к выполнению профессиональных задач;

K4.9 Рефлексивный – самоанализ, критическая оценка своих цифровых знаний и навыков.

### ***K5 Классификация по требованиям к использованию ЭИОС вуза:***

K5.1 Размещение рабочих программ (создание в ЭИОС доступа к электронным рабочим программам дисциплин, учебным планам, программам модулей и практик с фондами оценочных средств);

K5.2 Размещение электронных учебных изданий (создание в ЭИОС доступа к электронным образовательным ресурсам, электронным библиотечным системам) (соответствует K1.1.1, K1.2.1);

K5.3 Текущая аттестация обучающихся (соответствует K1.1.2);

К5.4 Формирование электронного портфолио обучающихся;

К5.5 Реализация взаимодействия с обучающимися.

### К6 Классификация по структуре профессиональной компетенции:

К6.1 Знания в области ЦТ;

К6.1.1 Знание технического обеспечения (соответствует К2.1);

К6.1.2 Знание программного обеспечения (соответствует К2.2);

К6.2 Умения и навыки применения ЦТ в учебном процессе (соответствует К1.1);

К6.3 Личностные качества, характеризующие стремление и способность эффективно применять ЦТ в профессиональной деятельности.

Каждый пункт классификации детализирован с выделением подклассов и индивидов. Создано 107 классов объектов, 101 подкласс, 214 аксиом. Данная структурная модель построена в среде *Protégé* (рисунок 1), где отношения между классами разных классификаций реализуются через объектные свойства (*object properties*) классов. При этом создаются новые объектные свойства, которым назначаются определённые характеристики – домены (*Domains*) и диапазоны (*Ranges*). Домен – это класс, к которому применяется свойство. Диапазон задаёт класс или область допустимых значений, которые можно указывать для данного свойства экземпляру класса.

В рассматриваемой онтологии, например, реализуются следующие виды связей между классами различных классификаций (см. рисунки 2 и 3):

- класс «К3.1 Базовый уровень (ЦТ)» связан с классами К2.2.1- К2.2.3 (*object properties*: «включает»);
- класс «К3.2 Продвинутый уровень (ЦТ)» – с К2.2.4- К2.2.8, К2.2.9.1 (*object properties*: «применяет»);
- класс «К3.3 Экспертный уровень» – с К2.2.9.2, К2.2.10 - К2.2.11 (*object properties*: «демонстрирует») и т.д.

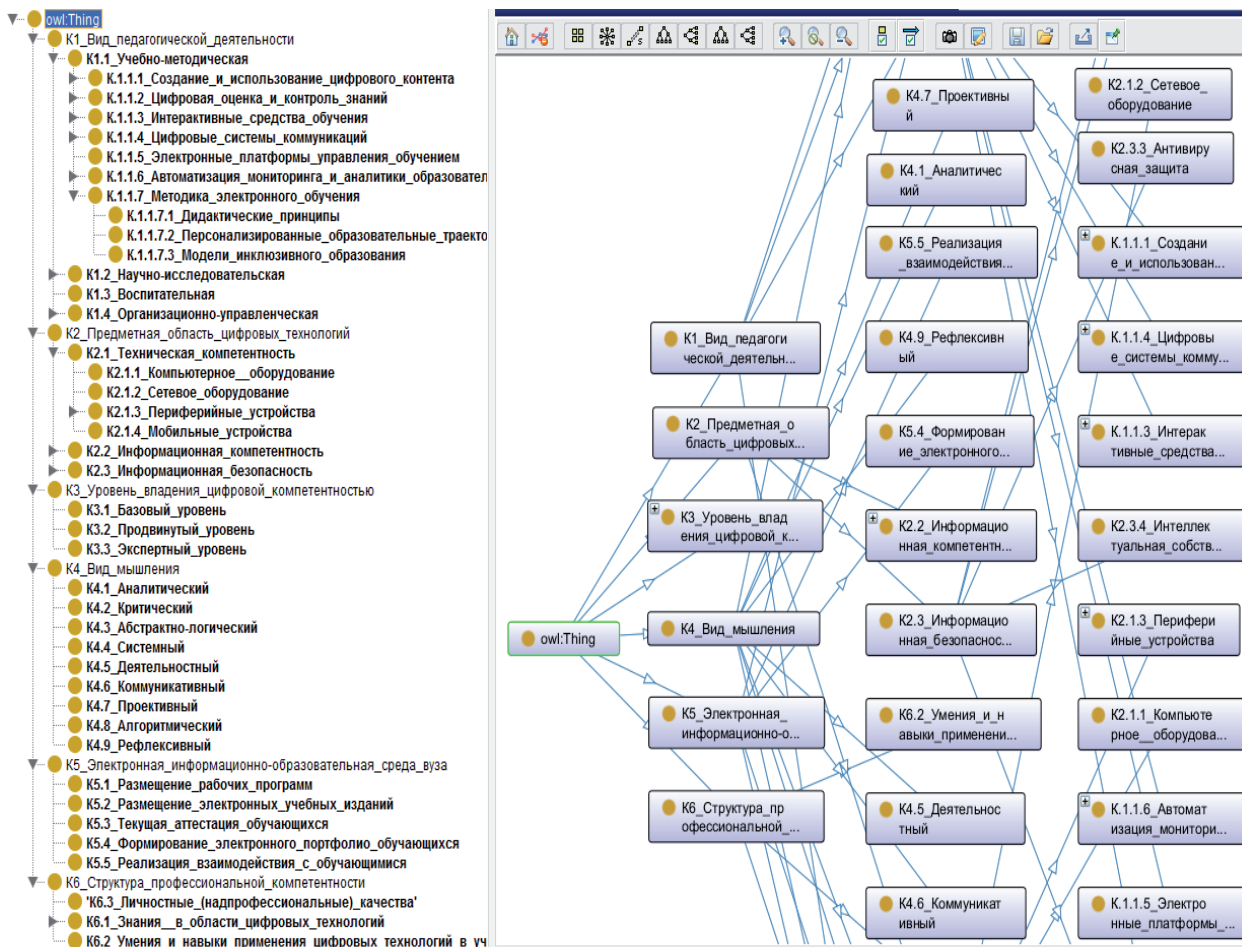


Рисунок 1 – Среда онтологий *Protégé* (фрагмент)

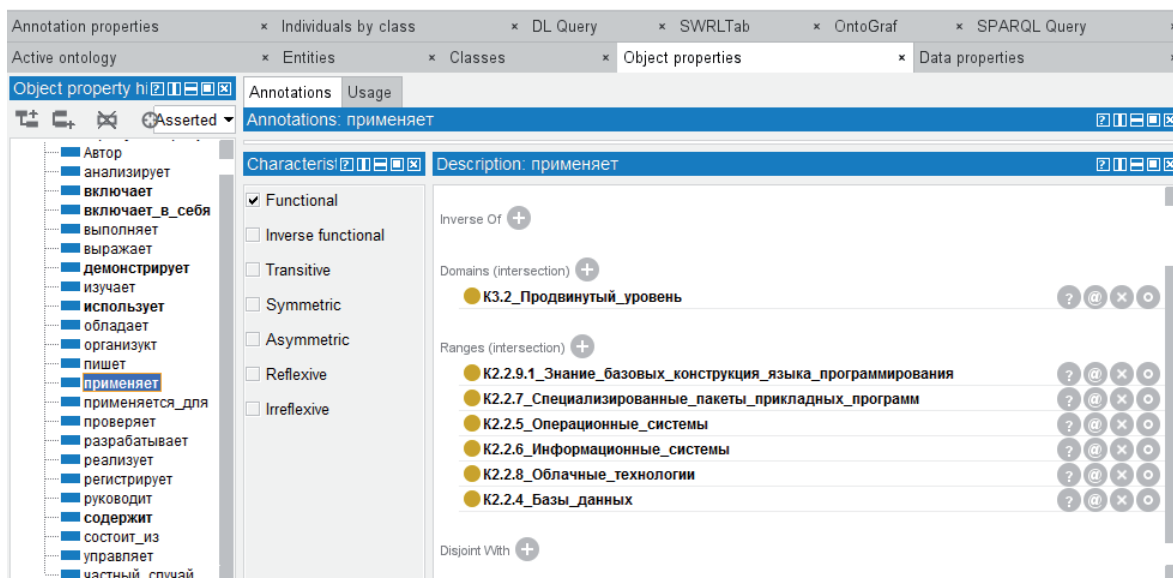


Рисунок 2 – Пример связей классов по объектным свойствам (фрагмент онтологии для К3\_Классификация по уровню владения цифровыми технологиями: К3.2\_Продвинутый уровень)

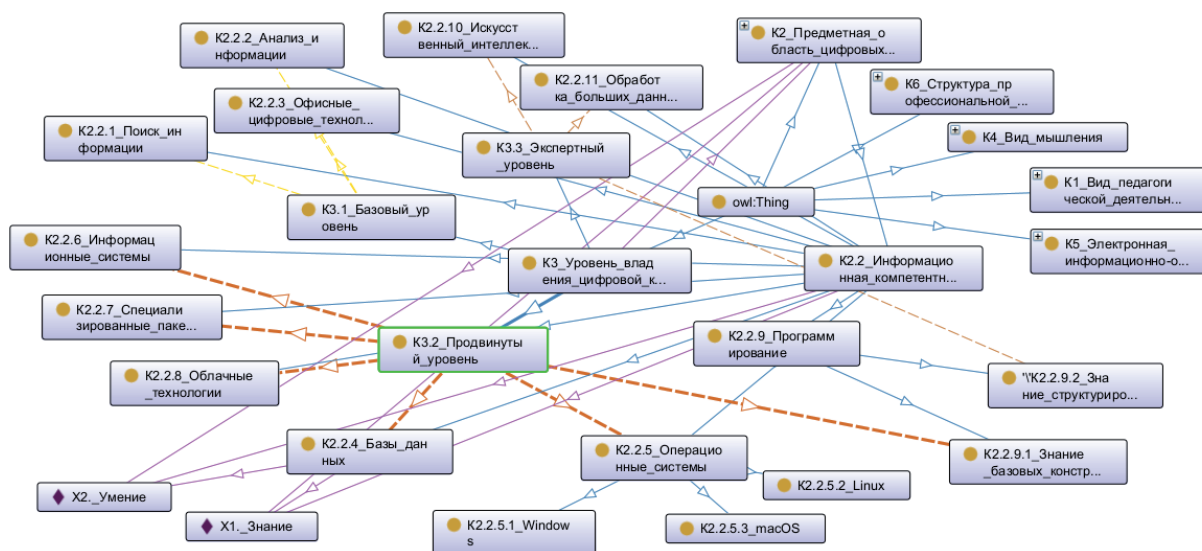


Рисунок 3 – Фрагмент онтографа связи классов для К3.2\_Продвинутый уровень (владение цифровыми технологиями)

Фрагмент онтологии в виде таблицы основных классов с указанием родительских классов, ограничений и связей по объектным свойствам приведён в таблице 1.

В онтологии класс обычно представляет множество индивидов, каждый из которых удовлетворяет определённым критериям членства в классе. Критерий членства в классе может быть утверждён в форме выражения класса. При этом индивид является представлением фактического объекта из ПрО<sup>5</sup>.

Пример индивидов для класса «K1.1\_Учебно-методическая (деятельность)» представлен на рисунке 4. В данном случае в качестве индивидов класса показаны результаты учебно-методической деятельности преподавателя в виде разработанных методических документов, например, рабочих программ по преподаваемым дисциплинам, авторских учебных пособий и

<sup>5</sup> ГОСТ Р 70846.3-2023. Национальная система пространственных данных. Онтология. Общие положения. Москва: Российский институт стандартизации, 2023. Дата введения 2024-03-01. <https://meganorm.ru/Data/817/81751.pdf>.

т.д. Документ, как индивид онтологии, имеет расширенную текстовую аннотацию и ряд определяемых в онтологии свойств, в частности, свойства «автор» и «год издания».

Таблица 1 – Характеристика основных классов модели

| Класс | Родит.класс | Ограничения               | Связанные классы            | Краткое описание                 |
|-------|-------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| K1    | owl: Thing  | подклассы: 4              |                             | Виды педагогической деятельности |
| K1.1  | K1          | кратность: 1<br>или более | K1.3, K4.6, K5.1-K5.4, K6.2 | Учебно-методическая деятельность |
| K1.2  |             |                           | K5.2                        | Научно-исследовательская         |
| K1.3  |             |                           | K1.1.3 - K1.1.4             | Воспитательная                   |
| K1.4  |             |                           | K4.5                        | Организационно-управленческая    |
| K2    | owl: Thing  | подклассы: 3              |                             | Про цифровых технологий          |
| K2.1  | K2          | кратность: 1<br>или более | K6.1                        | Техническая компетентность       |
| K2.2  |             |                           | K3.1- K3.4, K4.1, K6.1      | Информационная компетентность    |
| K2.3  |             |                           | K6.1                        | Информационная безопасность      |
| K3    | owl: Thing  | подклассы: 3              |                             | Уровень владения ЦК              |
| K3.1  | K3          | кратность: 1              | K2.2.1- K2.2.3              | Базовый уровень                  |
| K3.2  |             |                           | K2.2.4- K2.2.8, K2.2.9.1    | Продвинутый уровень              |
| K3.3  |             |                           | K2.2.9.2, K2.2.10-K2.2.11   | Экспертный уровень               |
| K4    | owl: Thing  | подклассы: 9              |                             | Виды мышления                    |
| K4.1  | K4          | кратность: 1<br>или более | K2.2.2, K6.3                | Аналитический                    |
| K4.2  |             |                           | K6.3                        | Критический                      |
| K4.3  |             |                           | K6.3                        | Абстрактно-логический            |
| K4.4  |             |                           | K6.3                        | Системный                        |
| K4.5  |             |                           | K1.4, K6.3                  | Деятельностный                   |
| K4.6  |             |                           | K1.1.4, K5.5, K6.3          | Коммуникативный                  |
| K4.7  |             |                           | K6.3                        | Проективный                      |
| K4.8  |             |                           | K6.3                        | Алгоритмический                  |
| K4.9  |             |                           | K6.3                        | Рефлексивный                     |
| K5    | owl: Thing  | подклассы: 5              |                             | Требования ФГОС ВО к ЭИОС        |
| K5.1  | K5          | кратность: 1<br>или более | K1.1                        | Размещение рабочих программ      |
| K5.2  |             |                           | K1.1.1, K1.2.1              | Размещение учебных изданий       |
| K5.3  |             |                           | K1.1.2                      | Текущая аттестация обучающихся   |
| K5.4  |             |                           | K1.1                        | Электронное портфолио            |
| K5.5  |             |                           | K4.6                        | Реализация взаимодействия        |
| K6    | owl: Thing  | подклассы: 3              |                             | Структура профес. компетентности |
| K6.1  | K6          | кратность: 1<br>или более | K2.1- K2.3                  | Знания                           |
| K6.2  |             |                           | K1.1                        | Умения и навыки                  |
| K6.3  |             |                           | K4.1- K4.9                  | Личностные качества              |

Важным элементом онтологии являются её аксиомы – утверждения или выражения, которые задают правила, ограничения или факты об описанных классах, свойствах или индивидах. В спроектированной онтологии в качестве аксиом, например, приняты утверждения:

- «K4.2\_Критический *SubClassOf* K4\_Вид\_мышления» (Критическое мышление – это один из видов мышления);
- «K6.3\_Личностные\_качества *SubClassOf* K6\_Структура профессиональной компетентности» (Личностные качества входят в состав профессиональной компетентности);
- «K2.2.10\_Искусственный\_интеллект *EquivalentTo* K3.3\_Экспертный\_уровень» (Искусственный интеллект относится к экспертному уровню ЦК);
- «X1.\_Знание *Type* K2.2\_Информационная\_компетентность» (Знание – это тип/компонент информационной компетентности).

Для вывода новых правил в *Protégé* может быть использован плагин *SWRL Tab*, подключение которого запускает последовательность операций: экспорт свойств объектов и аксиом *OWL* в механизм правил, запуск процедуры логического вывода, просмотр полученных аксиом на вкладке «*Inferred Axioms*» («Выведенные аксиомы»), преобразование выведенных

аксиом в знания *OWL* и передачу новых построенных аксиом в модель *OWL*. Так был получен ряд дополнительных аксиом, например:

«K2.2.2\_Анализ\_информации *SubClassOf* K3\_Уровень\_владения\_цифровой\_компетентностью»,  
 «*SameIndividual*: УМК\_по\_дисциплине\_Интеллектуальные\_ИС *EquivalentClasses*:  
 K.1.2.1\_Электронные\_библиотеки\_и\_базы\_данных».

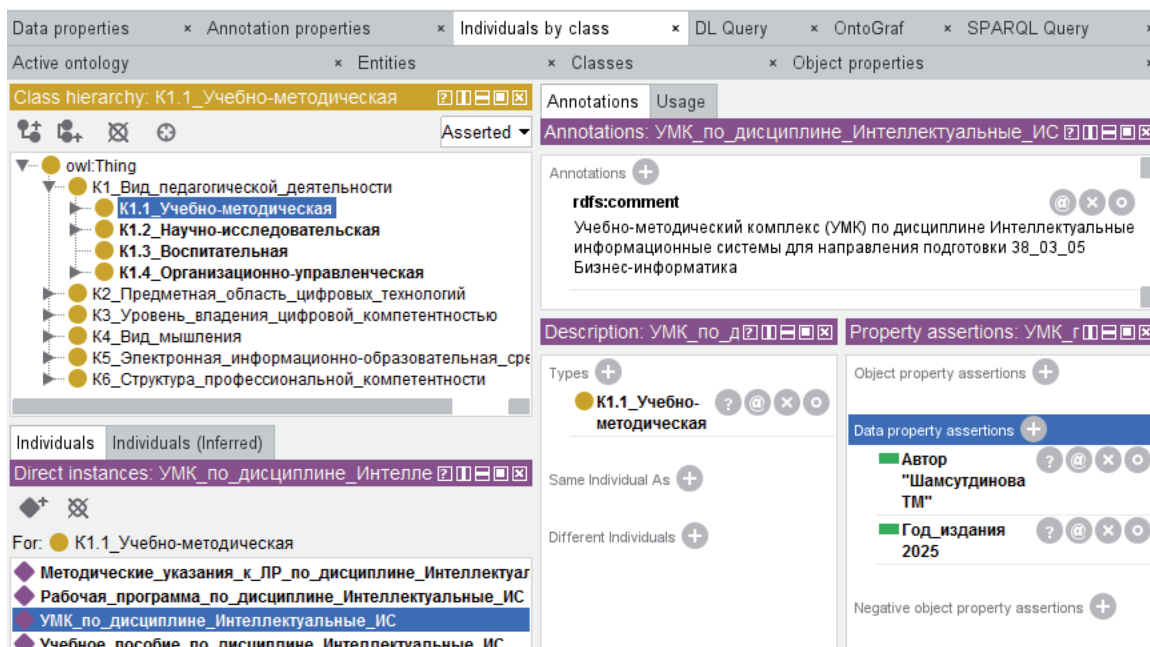


Рисунок 4 – Пример свойств индивидов классов (фрагмент онтологии для K1\_Классификация по видам педагогической деятельности: K1.1\_Учебно-методическая)

Для поиска информации в разработанной онтологии могут быть использованы различные виды запросов. Пример *SPARQL*-запроса для поиска всех подклассов класса «K1.1\_Учебно-методическая» показан на рисунке 5. Верхняя часть окна содержит условие запроса, нижняя – результат его выполнения.

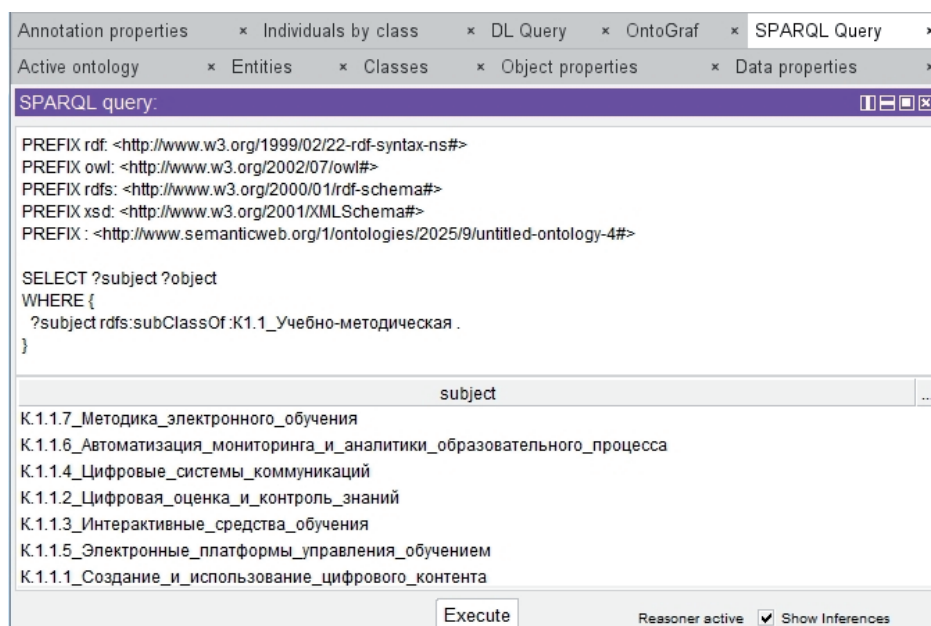


Рисунок 5 - Пример *SPARQL*-запроса для извлечения знаний из онтологии

Элементы структуры онтологии допускают численное оценивание ЦК преподавателя вуза. На рисунке 6 показан пример построения ветви онтологии, связанной с выполнением требований к использованию ЭИОС вуза (в описанной модели – уровень классификация К5).

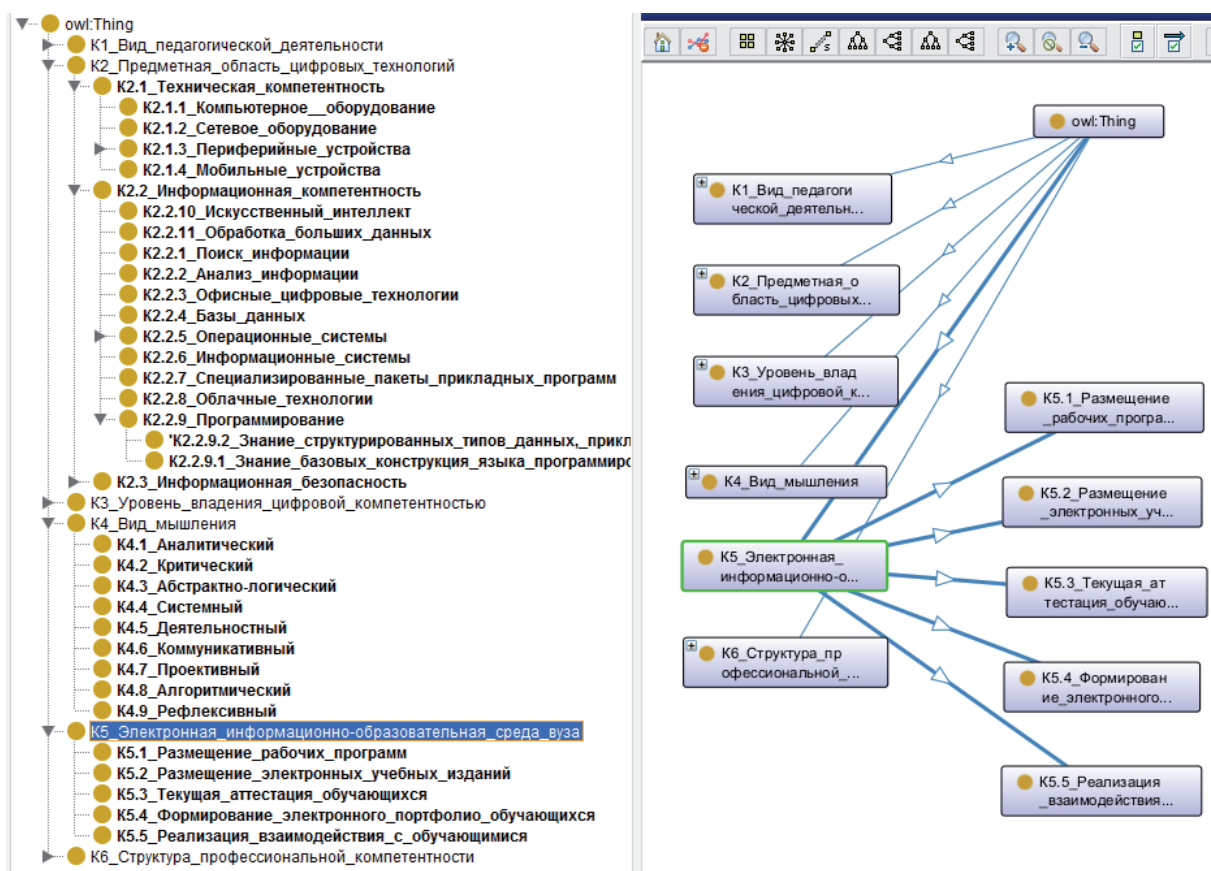


Рисунок 6 – Фрагмент построенной онтологии требований к использованию электронной информационно-образовательной среды вуза

В Башкирском государственном аграрном университете (ГАУ) реализована ЭИОС на базе платформы управления обучением *Moodle*. По каждой учебной дисциплине для каждого из направлений подготовки создаётся электронный курс, используемый для информационного сопровождения учебных занятий. Согласно локальным нормативным актам университета, разработанным в соответствии с требованиями ФГОС к ЭИОС, каждый преподаватель должен обеспечить заполнение инструктивной части своих электронных курсов, указав там ссылку на электронную рабочую программу дисциплины, размещённую на сервере библиотеки (что соответствует критерию K5.1 представленной модели ЦК). Преподаватель должен разместить в электронном курсе методические материалы и ссылки на учебные ресурсы электронной библиотечной системы (критерий K5.2 модели) и проставлять в электронном курсе оценки текущей аттестации обучающихся (критерий K5.3). Выполнение данных требований регулярно проверяется в ходе автоматизированного мониторинга, реализованного учебно-методической частью и отделом информационного обеспечения университета за счёт интеграции *Moodle* с системой 1С:УниверситетПРОФ.

Например, отчёт о проведённом автоматизированном мониторинге (первый семестр 2025-2026 учебного года) содержит результаты проверки 738 учебных курсов (за ведение которых отвечали 308 преподавателей вуза), расположенных на образовательной платформе Башкирского ГАУ (<https://edu.bsau.ru/>).

В ходе мониторинга проверялось заполнение ряда разделов электронного курса:

- «Рабочая программа» (наличие ссылки на электронную рабочую программу дисциплины, критерий К5.1);
- «Электронные библиографические ресурсы» (наличие ссылок на ресурсы из каталога электронной библиотечной системы, критерий К5.2);
- «Текущая аттестация» (процент оценённых обучающихся от их общего количества на электронном курсе, критерия К5.3).

Анализ отчёта о мониторинге показал, что 89% преподавателей продемонстрировали полное выполнение всех функциональных требований по объединённому критерию К5.1 + К5.2 + К5.3.

Для получения полной картины ЦК преподавателя оценивание должно проводиться всеми участниками образовательного процесса, например:

- самооценка своих навыков преподавателя;
- оценка студентами в виде обратной связи по проводимым занятиям;
- оценка администрацией вуза по критериям проверки качества учебных занятий.

Для комплексной численной оценки уровня ЦК преподавателей вузов могут быть использованы анкеты, тестовые материалы, оценочные критерии и др.

## Заключение

Построена многомерная модель ЦК преподавателя высшей школы на основе шести классификаций компонентов: по видам педагогической деятельности; по предметным областям цифровых технологий; по уровню владения цифровыми технологиями; по видам мышления; по уровню требований к использованию ЭИОС вуза; по структуре профессиональной компетентности.

Апробация модели на примере анализа работы преподавателей Башкирского ГАУ в ЭИОС вуза позволила получить оценку ЦК преподавателей.

Показано, что онтологическое моделирование может использоваться в качестве инструмента для структурирования знаний о ЦК преподавателей. Созданные онтологические модели позволяют представлять компоненты и взаимосвязи компетенций. Использование таких моделей может улучшить процессы мониторинга, оценки и планирования профессионального развития преподавателей.

Предложенная модель имеет ряд ограничений (субъективность некоторых классификаций, зависимость от текущих ФГОС ВО, сложность автоматического сбора данных по всем критериям и др.). После доработки данная модель может стать основой для создания систем мониторинга и развития кадрового потенциала вузов.

## Список источников

- [1] **Кальницкая И.В., Максимочкина О.В.** Модель цифровой компетенции студентов. *Проблемы современного образования*. 2022. №4. С.204-218. DOI: 10.31862/2218-8711-2022-4-204-218.
- [2] **Токтарова В.И., Ребко О.В.** Цифровая грамотность: понятие, компоненты и оценка. *Вестник Марийского государственного университета*. 2021. Т.15. №2(42). С.165-177. DOI: 10.30914/2072-6783-2021-15-2-165-177.
- [3] **Константинова Д.С., Кудяева М.М.** Цифровые компетенции как основа трансформации профессионального образования. *Экономика труда*. 2020. Т.7. №11. С.1055-1072. DOI: 10.18334/et.7.11.111073.
- [4] **Mezentseva D.A., Dzhablakh E.S., Eliseeva O.V., Bagautdinova A.Sh.** On the question of pedagogical digital competence. *Higher Education in Russia*. 2020. Т.29. №11. С.88-97. DOI: 10.31992/0869-3617-2020-29-11-88-97.
- [5] **Falloon G.** From digital literacy to digital competence: the teacher digital competency (TDC) framework. *Educational Technology Research and Development*. 2020. Vol.68. P.2449-2472. DOI: 10.1007/s11423-020-09767-4.

- [6] **Bouhout N., Askitou A., Es-soufi K.** TPACK for soft skills in online higher education: A factor-based PLS-SEM analysis of the mediating role of care. *Education and Information Technologies*. 2024. Vol.29. Iss.18. P.24181-24201. DOI: 10.1007/s10639-024-12774-0.
- [7] **Sánchez-Caballé A., Gisbert-Cervera M., Esteve-Món F.** La integración de la competencia digital en educación superior: un estudio de caso de una universidad catalane. *EDUCAR*. 2021. Vol.57(1). P.241-258. DOI: 10.5565/rev/educar.1174.
- [8] **Масалова Ю.А.** Цифровая компетентность преподавателей российских вузов. *Университетское управление: практика и анализ*. 2021. Т.25. №3. С.33-44. DOI: 10.15826/umpra.2021.03.025.
- [9] **Чоросова О.М., Аетдинова Р.Р., Соломонова Г.С., Протодьяконова Г.Ю.** Концептуальные подходы к идентификации цифровых компетенций педагогов: когнитивное моделирование. *Образование и саморазвитие*. 2020. Т.15. №3. С.189-202. DOI: 10.26907/esd15.3.16.
- [10] **Смирнов С.В.** Онтологический анализ предметных областей моделирования. *Известия Самарского научно-го центра Российской академии наук*. 2001. Т.3. №1. С.62-70.
- [11] **Корнеев Д.Г., Гаспарян М.С., Микрюков А.А.** Онтологический подход к моделированию инновационных процессов на примере распределённой образовательной сети вуза. *Открытое образование*. 2019. Т.23. №5. С.4-13. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-5-4-13.
- [12] **Горовой В.А., Муромцев Д.И.** Реализация технологии активного обучения на базе онтологического моделирования. *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. 2009. № 2(60). С.107-113.
- [13] **Кречетов И.А., Кручинин В.В.** Моделирование и технология онтологического подхода при разработке образовательного контента. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2011. № 2-2(24). С.322-325.
- [14] **Poulakakis Y., Kostas V., Kalogiannakis M., Panagiotakis S.** Ontological modeling of educational resources: a proposed implementation for Greek schools. *Education and Information Technologies*. 2017. Vol.22. P.1737-1755. DOI: 10.1007/s10639-016-9511-z.
- [15] **Miranda S., Orciuoli F., Loia V., Sampson D.** An ontology-based model for competence management. *Data & Knowledge Engineering*. 2017. Vol.107. P.51-66. DOI: 10.1016/j.datak.2016.12.001.
- [16] **Braga de Vasconcelos J., Kimble C.** An Ontology Based Competence Management Model to Support Collaborative Working and Organisational Learning. *Competencies in Organizational E-Learning: Concepts and Tools*. Book Chapter. 2007. P.253-265. DOI: 10.4018/978-1-59904-343-2.ch012.
- [17] **Bazarova M., Alibekkyzy K., Adikanova S., Bugubayeva A., Zhomartkyzy G., Jaxalykova A., Baidildina A., Keribayeva T.** Ontological model of the process of intensification of teachers' competencies. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS)*. 2024. Vol.35. No1. P.446-458. DOI: 10.11591/ijeecs.v35.i1.pp446-458.
- [18] **Evain N., Exposito E., Gueye M. L., Arnould P.** Ontology-Driven Approach for Competency-Oriented and Student-Centered Engineering Education. *2024 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. 2024. P.1-10. DOI: 10.1109/EDUCON60312.2024.10578793.
- [19] **Демина Ю.В., Логинова С.Л., Чучкалова Е.И.** Компоненты цифрового профиля педагога. *Современные проблемы науки и образования*. 2023. № 6. С.75. DOI: 10.17513/spno.33220.
- [20] **Зеер Э.Ф., Ломовцева Н.В., Третьякова В.С.** Готовность преподавателей вуза к онлайн-образованию: цифровая компетентность, опыт исследования. *Педагогическое образование в России*. 2020. №3. С.26-39. DOI: 10.26170/ro20-03-03.
- [21] **Carretero Gomez S., Vuorikari R., Punie Y.** *DigComp 2.1: The Digital Competence Framework for Citizens with eight proficiency levels and examples of use*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2017. DOI: 10.2760/38842 (online), 10.2760/836968 (print), 10.2760/00963 (ePub).
- [22] **Redecker C.** *European Framework for the Digital Competence of Educators: DigCompEdu / C. Redecker, Y. Punie, editor(s)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2017. DOI: 10.2760/178382 (print), 10.2760/159770 (online).
- [23] **Arstorp A.-T., Lund A.** An ontological turn: being and becoming with digital technologies in education. *Cogent Education*. 2025. Vol.12. Iss.1. 2572384. DOI: 10.1080/2331186X.2025.2572384.
- [24] **Oates A., Johnson D.** ChatGPT in the Classroom: Evaluating its Role in Fostering Critical Evaluation Skills. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. 2025. DOI: 10.1007/s40593-024-00452-8.
- [25] **Zhong Z., Juwaheer S.** Digital competence development in TVET with a competency-based whole-institution approach. *Vocation, Technology & Education*. 2024. Vol.1(2). DOI: 10.54844/vte.2024.0591.
- [26] **López-Núñez J.-A., Alonso-García S., Berral-Ortiz B., Victoria-Maldonado J.-J.** A Systematic Review of Digital Competence Evaluation in Higher Education. *Education Sciences*. 2024. Vol.14(11). 1181. DOI: 10.3390/educsci14111181.

- [27] *Fessl A., Maitz K., Paleczek L., Koehler T., Irnleitner S., Divitini M.* Designing a curriculum for digital competencies towards teaching and learning. *European Conference on e-Learning*. 2022. Vol.21. P.469-471. DOI: 10.34190/ecel.21.1.723.
- [28] *Caviglia F., Boie M.A.K., Dalsgaard C., Pedersen A.Y.* Bringing digital competence to the disciplines. *Education Inquiry*, 2024. P.1-29. DOI: 10.1080/20004508.2024.2318842.
- [29] *Шамсутдинова Т.М.* Представление знаний с использованием систем моделирования онтологий. *Российский электронный научный журнал*. 2025. №4(58). С.386-393. DOI: 10.31563/2308-9644-2025-58-4-386-393. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_88791392\\_47458932.PDF](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_88791392_47458932.PDF).
- [30] *Jain V., Singh M.* Ontology Development And Query Retrieval Using Protégé Tool. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2013. Vol.5. No.9. P.67-75. DOI: 10.5815/ijisa.2013.09.08.

## Сведения об авторе

*Шамсутдинова Татьяна Михайловна*, 1971 г. рождения. Окончила Башкирский государственный университет (1993), к.ф.-м.н. (1996). Доцент кафедры цифровых технологий и прикладной информатики Башкирского государственного аграрного университета. В списке научных трудов более 190 работ в области информационных технологий. Author ID (РИНЦ): 17707; Author ID (Scopus): 6504441807; Researcher ID (WoS): G-7779-2018. [tsham@rambler.ru](mailto:tsham@rambler.ru).



Поступила в редакцию 24.22.2025, после рецензирования 16.03.2026. Принята к публикации 27.03.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-269-282

# Ontological modeling of components of digital competence in higher education teaching staff

© 2026, T.M. Shamsutdinova

*Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia*

## Abstract

The study is aimed at developing an ontological model that enables the structuring of key knowledge, skills, and competences of university teachers in the field of digital technologies in education. A multidimensional ontological model has been developed, incorporating the principal components of digital competence and the relationships among them. Six classifications of the components of digital competence of higher education teachers were constructed: by types of pedagogical activity; by subject areas of digital technologies; by levels of digital competence; by types of thinking; by the level of requirements for the use of the university's electronic information and educational environment; and by the structure of professional competence. The proposed model was implemented using an ontological editor environment, resulting in the creation of 107 object classes, 101 subclasses, and 214 axioms. Initial validation of the model was carried out based on the activities of teachers at Bashkir State Agrarian University within its electronic educational environment. The developed model may be used to assess the level of digital competence and to design individualized professional development plans for university teachers.

**Keywords:** *digitalization of education, modeling, ontology, professional competence, digital competence, teacher, higher education.*

**For citation:** *Shamsutdinova T.M.* Ontological modeling of components of digital competence in higher education teaching staff [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 269-282. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-269-282.

**Acknowledgment:** The author expresses gratitude to the administration of Bashkir State Agrarian University for their support and assistance throughout the research process.

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

## List of figures and table

Figure 1 – Protégé ontology environment (fragment)

Figure 2 – Example of class relationships based on object properties (ontology fragment for K3\_Classification by Level of Digital Competency Level: K3.2\_Advanced Level)

Figure 3 – Fragment of the ontograph illustrating class relationships for K3.2\_Advanced Level (digital competence)

Figure 4 – Example of properties of class individuals (ontology fragment for K1\_Classification by types of pedagogical activity: K1.1\_Educational and methodological activity)

Figure 5 – Example of a SPARQL query for knowledge extracting from the ontology

Figure 6 – Fragment of the developed ontology of requirements for the use of the university's electronic information and educational environment

Table 1 – Characteristics of the main classes of the model

## References

- [1] **Kalnitskaya IV, Maksimochkina OV.** The model of students' digital competence [In Russian]. *Problems of Modern Education*. 2022; 4: 204-218. DOI: 10.31862/2218-8711-2022-4-204-218.
- [2] **Toktarova VI, Rebko OV.** Digital literacy: definition, components and assessment [In Russian]. *Vestnik of the Mari State University*. 2021; 15(2): 165-177. DOI: 10.30914/2072-6783-2021-15-2-165-177.
- [3] **Konstantinova DS, Kudaeva MM.** Digital competencies as the basis for the professional education transformation [In Russian]. *Russian Journal of Labor Economics*. 2020; 7(11): 1055-1072. DOI: 10.18334/et.7.11.111073.
- [4] **Mezentseva DA, Dzhavlah ES, Eliseeva OV, Bagautdinova AS.** On the question of pedagogical digital competence. *Higher Education in Russia*. 2020; 29(11): 88-97. DOI: 10.31992/0869-3617-2020-29-11-88-97.
- [5] **Falloon G.** From digital literacy to digital competence: the teacher digital competency (TDC) framework. *Educational Technology Research and Development*. 2020; 68: 2449-2472. DOI: 10.1007/s11423-020-09767-4.
- [6] **Bouhout N, Askitou A, Es-soufi K.** TPACK for soft skills in online higher education: A factor-based PLS-SEM analysis of the mediating role of care. *Education and Information Technologies*. 2024; 29 (18): 24181-24201. DOI: 10.1007/s10639-024-12774-0.
- [7] **Sánchez-Caballé A, Gisbert-Cervera M, Esteve-Món F.** Integrating Digital Competence in Higher Education Curricula: An Institutional Analysis [In Span.]. *Educar*. 2021; 57(1): 241-258. DOI: 10.5565/rev/educar.1174.
- [8] **Masalova YA.** Digital Competence of Russian University Teachers [In Russian]. *University Management: Practice and Analysis*. 2021; 25(3): 33-44. DOI: 10.15826/umpa.2021.03.025.
- [9] **Chorosova OM, Aetdinova RR, Solomonova GS, Protodyakonova GY.** Conceptual Approaches to the Identification of Teachers' Digital Competence: Cognitive Modelling [In Russian]. *Education and Self Development*. 2020; 15(3):189-202. DOI: 10.26907/esd15.3.16.
- [10] **Smirnov SV.** Ontological Analysis of Modeling Domains [In Russian]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2001; 3(1): 62-70.
- [11] **Korneev DG, Gasparian MS, Mikryukov AA.** Ontological approach to modeling innovation processes on the example of a distributed educational network of the University [In Russian]. *Open Education*. 2019; 23(5): 4-13. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-5-4-13.
- [12] **Gorovoy V, Mouromtsev D.** Creating of the active learning technology on the basis of ontology modeling [In Russian]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2009; 2 (60): 107-113.
- [13] **Krechetov IA, Kruchinin VV.** The usage of ontology method in creating e-learning content [In Russian]. *Reports from Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2011; 2-2 (24): 322-325.
- [14] **Poulakakis Y, Kostas V, Kalogiannakis M, Panagiotakis S.** Ontological modeling of educational resources: a proposed implementation for Greek schools. *Education and Information Technologies*. 2017; 22:1737-1755. DOI: 10.1007/s10639-016-9511-z.
- [15] **Miranda S, Orciuoli F, Loia V, Sampson D.** An ontology-based model for competence management. *Data & Knowledge Engineering*. 2017; 107: 51-66. DOI: 10.1016/j.datak.2016.12.001.
- [16] **Braga de Vasconcelos J, Kimble C.** An Ontology Based Competence Management Model to Support Collaborative Working and Organisational Learning. Book Chapter in: *Competencies in Organizational E-Learning: Concepts and Tools*. 2007: 253-265. DOI: 10.4018/978-1-59904-343-2.ch012.

- [17] **Bazarova M, Alibekkyzy K, Adikanova S, Bugubayeva A, Zhomartkyzy G, Jaxalykova A, Baidildina A, Keribaeva T.** Ontological model of the process of intensification of teachers' competencies. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS)*. 2024; 35(1): 446-458. DOI: 10.11591/ijeecs.v35.i1.
- [18] **Evain N, Exposito E, Gueye ML, Arnould P.** Ontology-Driven Approach for Competency-Oriented and Student-Centered Engineering Education. *2024 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. 2024: 1-10. DOI: 10.1109/EDUCON60312.2024.10578793.
- [19] **Demina YV, Loginova SL, Chuchkalova EI.** Components of a digital teacher profile [In Russian]. *Modern Problems of Science and Education*. 2023; 6: 75. DOI: 10.17513/spno.33220.
- [20] **Zeer EPh, Lomovtceva NV, Tretyakova VS.** University Teachers' Readiness for Online Education: Digital Competence, Research Experience [In Russian]. *Pedagogical Education in Russia*. 2020; 3: 26-39. DOI: 10.26170/po20-03-03.
- [21] **Carretero Gomez S, Vuorikari R, Punie Y.** DigComp 2.1: The Digital Competence Framework for Citizens with eight proficiency levels and examples of use. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017. DOI: 10.2760/38842 (online), 10.2760/836968 (print), 10.2760/00963 (ePub)
- [22] **Redecker C.** European Framework for the Digital Competence of Educators: DigCompEdu. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017. DOI: 10.2760/178382 (print), 10.2760/159770 (online).
- [23] **Arstorp A-T, Lund A.** An ontological turn: being and becoming with digital technologies in education. *Cogent Education*. 2025; 12(1): 2572384. DOI: 10.1080/2331186X.2025.2572384.
- [24] **Oates A, Johnson D.** ChatGPT in the Classroom: Evaluating its Role in Fostering Critical Evaluation Skills. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. 2025. DOI: 10.1007/s40593-024-00452-8.
- [25] **Zhong Z, Juwaheer S.** Digital competence development in TVET with a competency-based whole-institution approach. *Vocation, Technology & Education*. 2024; 1(2). DOI: 10.54844/vte.2024.0591.
- [26] **López-Nuñez J-A, Alonso-García S, Berral-Ortiz B, Victoria-Maldonado J-J.** A Systematic Review of Digital Competence Evaluation in Higher Education. *Education Sciences*. 2024; 14(11): 1181. DOI: 10.3390/educsci14111181.
- [27] **Fessl A, Maitz K, Paleczek L, Koehler T, Irnleitner S, Divitini M.** Designing a curriculum for digital competencies towards teaching and learning. *European Conference on e-Learning*. 2022; 21: 469-471. DOI: 10.34190/ecel.21.1.723.
- [28] **Caviglia F, Boie MAK, Dalsgaard C, Pedersen AY.** Bringing digital competence to the disciplines. *Education Inquiry*. 2024: 1-29. DOI: 10.1080/20004508.2024.2318842.
- [29] **Shamsutdinova TM.** Knowledge representation using ontology modeling systems [In Russian]. *Russian electronic scientific journal*. 2025; 4(58): 386-393. DOI: 10.31563/2308-9644-2025-58-4-386-393. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_88791392\\_47458932.PDF](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_88791392_47458932.PDF).
- [30] **Jain V, Singh M.** Ontology Development And Query Retrieval Using Protégé Tool. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2013; 5(9): 67-75. DOI: 10.5815/ijisa.2013.09.08.
- 

## About the author

**Tatiana M. Shamsutdinova** (b. 1971) graduated from Bashkir State University (Ufa, Russia) in 1993, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (1996). She is an Associate Professor at the Department of Digital technologies and Applied Informatics of Bashkir State Agrarian University. She is the author and a co-author of about 190 scientific publications in the field of information technologies. Author ID (RSCI): 17707; Author ID (Scopus): 6504441807; Researcher ID (WoS): G-7779-2018. [tsham@rambler.ru](mailto:tsham@rambler.ru).

---

Received December 24, 2025. Revised March 16, 2026. Accepted March 27, 2026.

---

## ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 004.891.3:621.38

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-283-299

**Онтологический подход к формализации знаний при проектировании сверхбольших интегральных схем**

© 2026, В.В. Курейчик, В.И. Данильченко✉, А.М. Мансур, В.В. Бова

*Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета (ИТА ЮФУ), Таганрог, Россия***Аннотация**

Предложен подход к формализации инженерных знаний, направленный на систематизацию предметной области проектирования сверхбольших интегральных схем и поддержку принятия проектных решений. В основу подхода заложена онтологическая модель проектирования сверхбольших интегральных схем, представленная в виде структурированного кортежа, включающего концепты, отношения, свойства и аксиомы. Формализация экспертных правил в виде аксиом позволяет перейти от разрозненных данных к структурированной базе знаний, пригодной для интеллектуального анализа и автоматизированного принятия решений на ранних этапах проектирования. Описан процесс построения онтологии с использованием среды *Protégé*, включающий этапы сбора экспертных знаний, формализации их характеристик и определения семантических взаимосвязей. Проведена апробация онтологической модели на задачах выбора архитектурных решений и многокритериальной оценки проектных рисков. Экспериментальные результаты демонстрируют возможность автоматизированной классификации объектов, выявления скрытых нарушений временных ограничений и подтверждают практическую применимость онтологической модели для минимизации вероятности ошибок и сокращения временных затрат при проектировании сверхбольших интегральных схем. Оценка эффективности предложенного подхода показала линейную зависимость при увеличении количества обрабатываемых проектных объектов, пятикратное сокращение времени обработки по сравнению с продукционными системами, а также повышение на 25% полноты обнаружения рисков.

**Ключевые слова:** онтология, проектирование, сверхбольшие интегральные схемы, формализация знаний, поддержка принятия решений, оценка проектных рисков, САПР.

**Цитирование:** Курейчик В.В., Данильченко В.И., Мансур А.М., Бова В.В. Онтологический подход к формализации знаний при проектировании сверхбольших интегральных схем. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.283-299. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-283-299.

**Финансирование:** исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда No 24-71-00035, <https://rscf.ru/project/24-71-00035/> в Южном федеральном университете.

**Вклад авторов:** Курейчик В.В. – постановка задачи, разработка концепции исследования; Данильченко В.И. – разработка онтологической модели, проведение вычислительных экспериментов; Мансур А.М. – разработка алгоритма поддержки принятия решений, программная реализация, подготовка исходных данных; Бова В.В. – анализ результатов, верификация модели.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Введение**

Проектирование сверхбольших интегральных схем (СБИС) является одной из наиболее сложных инженерных задач в современной микроэлектронике, что обусловлено ростом числа компонентов, усложнением их взаимосвязей и повышением требований к быстродействию, энергоэффективности и надёжности [1-3]. В этих условиях важную роль приобретают инженерные знания от архитектурных концепций и технологических ограничений до правил

проектирования и накопленного экспертного опыта. Значительная часть этих знаний представлена в неструктурированном или неформализованном виде: в качестве разрозненной текстовой документации, наборов проектных правил и др. [3, 4].

Для поддержки процессов проектирования СБИС используются различные методы, включая экспертные системы, базы знаний, а также подходы, основанные на методах машинного обучения (ММО). Перспективным представляется применение онтологических методов, обеспечивающих формальное и семантически согласованное представление знаний, а также поддержку процедур логического вывода (ЛВ) [5, 6]. На всех уровнях проектирования СБИС отсутствуют универсальные онтологии, охватывающие весь спектр проектных знаний и обладающие способностью к интеграции с системами автоматизированного проектирования (САПР) [7, 8]. Известные модели ориентированы на отдельные аспекты проектирования и используются преимущественно в качестве статических классификаторов, не обеспечивая автоматизированного выявления проектных рисков [9, 10].

В данной работе рассматривается комплексный подход для повышения эффективности проектирования СБИС на основе онтологически-ориентированной формализации знаний и автоматизированной поддержки принятия решений (ППР), направленной на выявление и минимизацию проектных рисков. Разработанный подход нацелен на интеграцию с существующими САПР и создание интеллектуальных систем поддержки проектирования СБИС.

## 1 Обзор существующих решений

Из анализа существующих разработок средств ППР при проектировании СБИС [1, 7, 11] следует, что известные подходы не в полной мере позволяют получать наборы квазиоптимальных решений задачи формализации инженерных знаний и их применения для ППР на всех этапах проектирования. Наблюдается тенденция к активному применению ММО для оптимизации параметров СБИС, прогнозирования их характеристик и выявления аномалий в проектных данных [12, 13]. В отличие от онтологических подходов ММО не оперируют явными логическими конструкциями, что затрудняет отслеживание причинно-следственных связей, на основании которых было принято проектное решение. ММО основаны на выявлении паттернов в данных, а онтологические подходы позволяют формализовать знания в явном, логически структурированном виде.

Рассмотренные в [14-16] онтологические методы обеспечивают формальное и семантически согласованное представление предметной области (ПрО), поддержку ЛВ и интеграцию разнородных инженерных моделей и данных. Эффективность онтологических методов в смежных дисциплинах создаёт предпосылки для их использования в области проектирования СБИС [15-17]. Предложены онтологические модели (ОМ) для различных модулей проектирования, ориентированных на описание аспектов проектного процесса: архитектурные компоненты, технологические параметры, процедуры верификации и др. [9, 10, 18, 19].

В исследованиях [9, 10, 18] использован *OWL* для формализации иерархии компонентов СБИС, их характеристик и отношений, что позволяет выполнять семантические запросы, обеспечивать автоматическую связь между выходными данными одной САПР и входными данными другой. Все перечисленные решения ориентированы преимущественно на статическое описание знаний, где онтологии используются как словари или классификаторы. В рассмотренных работах отсутствует количественная оценка производительности предлагаемых моделей и их применимости при росте объёмов проектных данных.

Существующие онтологии [9, 10, 18, 19] не в полной мере обеспечивают интеграцию с современными САПР, что ограничивает их практическое применение. А отсутствие формализованной процедуры преобразования инженерных правил и эвристик в машиночитаемые

логические конструкции, пригодные для автоматического вывода, ограничивает возможности этих онтологий в ППР. Для преодоления указанных ограничений требуется разработка комплексного подхода, включающего формальную ОМ представления проектных знаний в области проектирования СБИС и способы динамической ППР при интеграции с САПР.

## 2 Формализация инженерных знаний

Формализация знаний в области проектирования СБИС представляет собой процесс структурированного представления экспертных знаний и инженерных практик. Содержание данного процесса заключается в построении онтологии  $O$ , которая явно моделирует совокупность понятий (концептов), отношений и аксиом ПрО. Структура онтологии представляется короткежем:

$$O = \langle C, R_k, P, A_x, I \rangle, \quad (1)$$

где  $C$  – множество базовых концептов в ПрО проектирования СБИС;  $R_k$  – множество отношений арности  $k$ , которые устанавливают структурные (таксономические) и логические связи между концептами, моделирующие причинно-следственные или процедурные зависимости;  $P$  – множество свойств (атрибутов) концептов;  $A_x$  – множество аксиом, выраженных, как правило, в логике первого порядка или её расширениях (аксиомы задают ограничения, правила и логические связи между элементами онтологии, обеспечивая основу для автоматизированного вывода);  $I$  – множество индивидуальных экземпляров (индивидов) концептов, которые используются для представления конкретных проектных объектов, их параметров и состояний в проектных задачах.

Формальная модель онтологии проектирования СБИС должна соответствовать ряду требований [3, 20], которые можно сформулировать следующим образом.

*Полнота.* Онтология должна обеспечивать полное покрытие ПрО. Это означает, что для любого проектного объекта  $o$  из ПрО должен существовать соответствующий ему концепт  $C$  в онтологии  $O$ :

$$\forall o \in \text{Domain} \exists c \in C: I(o) \text{ instanceOf } c, \quad (2)$$

где  $\text{Domain}$  – ПрО проектирования СБИС,  $I(o)$  – индивид  $o$  в онтологии.

*Логическая согласованность.* Множество аксиом  $A_x$  должно быть непротиворечивым, чтобы онтология была пригодна для автоматизированного ЛВ. Формально это исключает возможность вывода взаимно противоречивых утверждений [20]:

$$\nexists \phi: A_x \models \phi \wedge A_x \models \neg \phi, \quad (3)$$

где  $\models$  обозначает отношение логического следствия в рамках выбранного формализма (например, логики первого порядка), а  $\phi$  – произвольная формула.

*Расширяемость.* Онтология должна иметь возможность своего развития. Должно существовать её непротиворечивое расширение  $O' = \langle C', R'_k, P', A'_x, I' \rangle$ , такое что  $O \subseteq O'$ , причём  $O'$  сохраняет свойство логической согласованности.

*Интеграционная совместимость.* Для практического использования необходимо обеспечить взаимодействие онтологии с САПР за счёт определения функции совместимости  $F_{\text{int}}$ , устанавливающей соответствие между их элементами:

$$F_{\text{int}}: E_O \rightarrow E_{\text{CAD}}, \quad (4)$$

где  $E_O$  – множество сущностей (концептов, индивидов, отношений) онтологии  $O$ , а  $E_{\text{CAD}}$  – множество соответствующих объектов или интерфейсов в САПР.

Предложенная ОМ выполняет не только дескриптивную, но и операциональную функцию, позволяя решать следующие задачи в области проектирования СБИС.

1) структурирование знаний через формализацию концептов  $C$  и отношений  $R_k$ , обеспечивающее иерархическую и сетевую организацию информации [3, 20]:

$$\text{Knowledge} \xrightarrow{\text{formalize}} \langle C, R_k \rangle, \quad (5)$$

где результатом формализации является систематизированная структура, связывающая ключевые понятия ПрО.

2) формализация экспертного опыта посредством аксиом  $A_X$ , которые кодируют эвристики, правила вывода и инженерные ограничения:

$$\text{Expertise} \xrightarrow{\text{encode}} A_X, \quad (6)$$

где закодированные правила позволяют автоматически проверять корректность проектных решений и выявлять скрытые зависимости.

3) поддержка ЛВ с помощью дедукции  $\vdash$  в рамках логики первого порядка, позволяющей автоматически выводить новые знания из существующих аксиом и фактов:

$$A_X \cup I \vdash \Phi, \quad (7)$$

где  $\Phi$  – выводимое утверждение (новое знание или проверяемое условие), необходимое для обоснования и принятия проектного решения.

Идентификация понятий осуществляется на основе анализа инженерной и нормативной документации, систематизации терминов, применяемых в существующих стандартах, а также с привлечением экспертного знания [3, 20, 21]. Сформированная первичная понятийная структура охватывает технические объекты (например, функциональные блоки, интерфейсы, модули), логические и физические уровни проектирования, а также действия, выполняемые проектировщиком на различных этапах. Отбор понятий производится с учётом требований, обеспечивающих пригодность онтологии для дальнейшей формализации и применения в интеллектуальных системах. В результате формируется множество понятий формального описания ПрО, и создаётся основа для построения связей, свойств и логических правил, обеспечивающих ППР в системах проектирования СБИС.

Взаимосвязи между понятиями онтологии представляют собой структурированные отношения, обеспечивающие семантическую связанность онтологических элементов в формализованной модели взаимодействия между объектами проектирования. В онтологии рассматриваются несколько типов связей: иерархические отношения, отражающие таксономическую структуру понятий (например, «блок» является частным случаем «модуля»); функциональные зависимости между компонентами («модуль выполняет функцию»); технологические и причинно-следственные отношения, описывающие этапность процессов, их условия и ограничения. Примеры таких связей в ОМ СБИС включают отношения между логическими блоками и физическими модулями, правила согласования интерфейсов, ограничения синхронизации, зависимости между уровнями абстракции проектирования. Например, вводится отношение «включает», описывающее композицию компонентов, или отношение «требует», формализующее проектные зависимости («тактовая схема требует стабилизатора частоты»).



Рисунок. 1 – Фрагмент иерархической структуры онтологии

Для ОМ СБИС иерархической структуры используются таксономические подходы инженерных дисциплин [3, 6, 10, 20, 22]. Например, общие классы включают такие понятия, как «Компонент», «Функциональный модуль», «Интерфейс», «Проектный этап», а их подклассы – специализированные объекты: «Арифметико-логическое устройство» (АЛУ), «Контроллер шины», «Стадия верификации» и др. Структура многоуровневой модели формируется таким образом, чтобы обеспечивать как вертикальные (наследование, спецификация), так и горизонтальные (ассоциативные, функциональные) связи между сущностями. В результате формируется онтология, ориентированная на интеграцию с САПР. Фрагмент иерархической структуры онтологии представлен на рисунке 1.

Для формализации свойств понятий ПрО определяются атрибуты, описывающие ключевые характеристики объектов онтологии. Каждому атрибуту устанавливаются типы данных и области допустимых значений. Для

повышения качества входных проектных данных дополнительно описываются правила валидации, позволяющие проверить соответствие значений установленным ограничениям.

Для задачи обеспечения непротиворечивости и логической связности ОМ задаются ограничения целостности, включая аксиомы [3, 22]. Это позволяет фиксировать не только свойства отношений и ограничения на количество связанных объектов, но и условия их взаимной исключаемости, задавая при этом строгую структуру и логику представляемых знаний.

### 3 Алгоритм формализации знаний и поддержки принятия решений

В настоящей работе предлагается алгоритм интеграции ОМ в процесс автоматизированного проектирования СБИС. Особенностью алгоритма является преобразование инженерных знаний, включая проектные ограничения и эвристики, в формальные аксиомы онтологии на языках *OWL* и *SWRL*. Алгоритм онтологически-ориентированной формализации проектных знаний и ППР представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема алгоритма формализации проектных знаний и поддержки принятия решений

Алгоритм включает следующие этапы.

1) *извлечение и структурирование*. Производится предварительная структуризация информации, используемой в проектировании СБИС. Входными данными являются: технологическая библиотека; файлы проектных ограничений; неструктурированная документация (спецификации, руководства по проектированию, отчёты о верификации и др.). Процедура автоматизированного извлечения концептов *C* и атрибутов *P* следующая.

1.1 *Статистический анализ частотности терминов*. На корпусе текстов (объёмом не менее  $10^5$  слов) вычисляется мера *TF-IDF*. Термины с высоким значением (в верхнем 5% процентиле) рассматриваются как кандидаты в концепты. Для русского и английского языков используется алгоритм Портера [9, 11] и удаление стоп-слов.

1.2 *Извлечение с использованием лингвистических паттернов.* Применяются регулярные выражения и шаблоны, адаптированные для инженерного языка. Концепты выявляются по перечню ключевых терминов (блок, модуль, шина, интерфейс и др.) с учётом различных словоформ. Атрибуты (частота, потребление, напряжение и др.) распознаются по конструкциям вида «параметр = значение» (например, частота = 950 МГц). Отношения выявляются по глагольным парам вида «имеет частоту», «содержит модуль», «выполняет функцию», «требует интерфейс» и др.

1.3 *Словарная фильтрация по ПрО.* Используется базовый тезаурус, построенный на основе стандартов, определяющих язык описания аппаратуры (IEEE 1364 и др.). Кандидаты, не входящие в этот словарь, помечаются для последующей ручной верификации, целью которой является устранение контекстных неоднозначностей.

*Пример.* Исходный фрагмент технического описания: «АЛУ работает на частоте 950 МГц и потребляет 120 мВт. АЛУ содержит регистровый файл и сумматор». В результате извлечения получают следующие сущности: концепты – «АЛУ», «регистровый файл», «сумматор»; атрибуты – «частота МГц» и «потребление мВт»; отношения – «содержит» (между «АЛУ» и «регистровым файлом») и «имеет» (между «АЛУ» и «частотой»). На тестовом корпусе из 50 инженерных документов после ручной верификации достигнута полнота 88% и точность 92%.

Результатом этапа является формализованный список  $\{C, P, R_{\text{кандидаты}}\}$ , который передаётся на этап семантического отображения.

2) *семантическое отображение.* Выявленные концепты включаются в иерархию классов онтологии  $O$ . Формируются отношения  $R$ , отражающие структурные («часть-целое») и функциональные связи с использованием объектных свойств. Для повышения эффективности выявления скрытых рисков вводится специальный тип отношений «ограничение производительности», который связывает физические параметры (например, «площадь кристалла») с логическими характеристиками (например, «частота тактирования»).

3) *аксиоматизация и формализация правил.* Производится логическая интерпретация знаний, основанная на формализации проектных ограничений и эвристик в виде аксиом онтологии. Проверочные правила транслируются в логические конструкции на языках  $OWL$  и  $SWRL$ . Например, правило, устанавливающее критичность частоты для АЛУ, выражено следующей аксиомой:

$$\forall x (ALU(x) \wedge hasFrequency(x, y) \wedge y \geq 900) \Rightarrow HighFrequencyRisk(x) . \quad (8)$$

Запись данного правила на языке *Manchester OWL Syntax* (стандарт  $OWL 2$ ) может быть представлена в виде определения класса, аксиоматически эквивалентного условию (8):

*Class: HighFrequencyRisk*

*EquivalentTo:*

*ALU and (hasFrequency some xsd:double[>= 900]).*

Это означает, что любой индивид, являющийся экземпляром класса  $ALU$  и имеющий значение свойства  $hasFrequency$  не менее 900, автоматически классифицируется как «Риск высокой частоты». Семантически эквивалентная запись на языке  $SWRL$  имеет вид:  $ALU(?x) \wedge hasFrequency(?x, ?y) \wedge swrlb:greaterThanOrEqual(?y, 900) \rightarrow HighFrequencyRisk(?x)$ . Обе формы обеспечивают однозначную интерпретацию и непосредственное исполнение в среде *Protégé* с использованием машины ЛВ (МЛВ) *Pellet*. Подобная формализация может обеспечить возможность применения МЛВ дедуктивных методов для обнаружения неявных противоречий и скрытых зависимостей в проектных данных.

4) *ЛВ и классификация.* Из базы знаний в онтологию передаётся экземпляр  $I$  проектной модели (например, описание конкретного блока) и выполняются рассуждения на основе МЛВ *Pellet*. Она проверяет непротиворечивость модели относительно аксиом  $A$ , оценивая критически сложные для проектирования компоненты по заданным правилам. На основе разработанной онтологии и формализованных правил МЛВ выполняет анализ скрытых зако-

номерностей и автоматически классифицирует проектные объекты, выявляя их принадлежность к классам «Риск» или «Ошибка».

5) *генерация рекомендаций*. На основе результатов ЛВ и классификации проектных объектов формируются рекомендации по корректировке параметров, направленные на устранение выявленных рисков. В случае обнаружения несоответствия аксиомам онтологии осуществляется поиск альтернативных значений параметров, удовлетворяющих всем заданным ограничениям. При наличии множества допустимых решений применяются методы многокритериального анализа для оценки их влияния на смежные характеристики (например, снижение энергопотребления может оказывать воздействие на производительность). Каждая рекомендация сопровождается объяснением, выводимым на основе аксиом и правил, что обеспечивает интерпретируемость предлагаемых корректирующих действий и повышает доверие к полученным результатам.

Алгоритм включает обратную связь, обеспечивающую возможность накапливать опыт и адаптировать ОМ к новым проектным ситуациям, фиксировать успешные решения, выявлять устойчивые сочетания параметров, а также осуществлять «обучение» онтологии, выражающееся в уточнении аксиом и правил на основе вновь поступающих данных.

Верхний (концептуальный) уровень онтологии проектных знаний и ППР, описывающий основные классы и их взаимосвязи, представлен на рисунке 3.

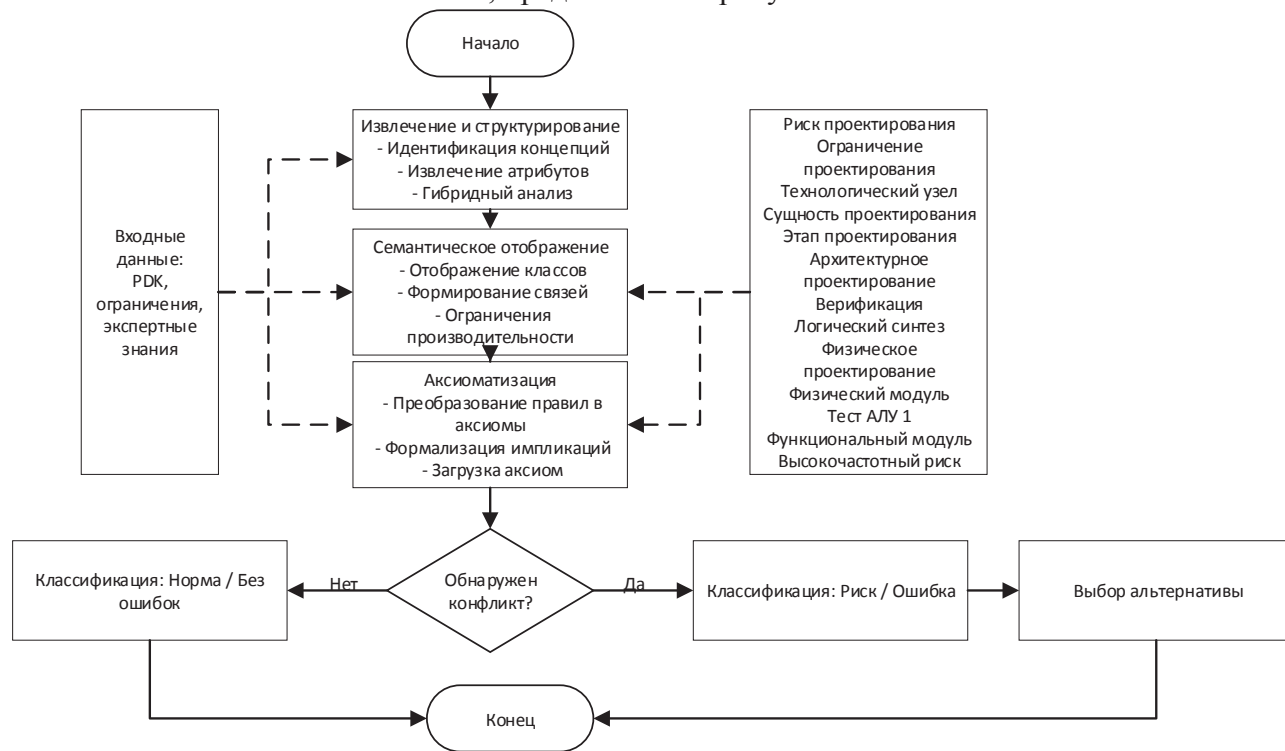


Рисунок 3 – Верхний уровень онтологии поддержки проектных решений

В онтологии реализовано:

- множество концептов  $C$ , включающих основные сущности ПрО: «Проектная сущность», «АЛУ», «Техпроцесс», «Проектный риск»;
- множество отношений  $R$ , определяющих связи между компонентами: «Технология» и «Имеет этап»;
- множество свойств  $P$ , описывающих числовые характеристики сущностей, необходимые для принятия решений: «Частота», «Потребление», «Площадь»;

- множество аксиом  $A$ , задающих логические ограничения, правила вывода и формализующие экспертные знания о надёжности и производительности.

#### 4 Вычислительные эксперименты

Цель эксперимента – оценка эффективности ОМ на заданных критериях и демонстрация возможности автоматизированного выявления проектных рисков на основе формализованных знаний и параметров проектирования СБИС. Вычислительный эксперимент разделён на три этапа: базовый тест выявления рисков по частоте, проверка рисков по энергопотреблению и многокритериальный анализ для выявления критически сложных компонентов.

В проведённом эксперименте *Pellet* применяется для проверки обеспечения логической непротиворечивости онтологии и автоматизированной классификации её экземпляров.

Для проведения экспериментов создана выборка экземпляров  $I$ , на основе которой проведена проверка критериев ограничения полноты онтологии согласно (2).

В качестве тестового объекта использовался экземпляр «Тестовое АЛУ (900MHz)», относящийся к классу «АЛУ», с заданными характеристиками: «Технология»: 28 нм; «Частота»: 950 МГц; «Потребление»: 120 мВт. Эти данные выходят за пределы допустимых норм как по частоте (более 900 МГц), так и по мощности (более 100 мВт), что позволяет проверить работоспособность системы в предельных условиях. Согласно анализу библиотек стандартных ячеек [23, 24], максимальная тактовая частота для стандартных логических блоков составляет от 500 до 950 МГц в зависимости от типа ячеек и условий эксплуатации.

Предложенный подход поддерживает гибкую настройку ограничений путём изменения атрибутов `xsd:minInclusive` в аксиомах классов или модификации *SWRL*-правил, что позволяет адаптировать систему к различным технологическим нормам без изменения общей структуры онтологии.

**Первый вычислительный эксперимент – выявление риска по частоте.** Цель эксперимента – проверка способности системы выявлять нарушения ограничений по времени (тайминг). В соответствии с (6), описывающей формализацию экспертного опыта, в онтологию введён класс «Риск высокой частоты», согласно аксиоме эквивалентности по правилу:

$$\forall x \in I: (\text{ПроектнаяСущность}(x) \wedge \exists y(\text{частота}(x, y) \wedge y \geq 900)) \Rightarrow \text{РискВысокойЧастоты}(x). \quad (9)$$

Эта аксиома формализует знание эксперта о превышении частоты в 900 МГц, что автоматически переводит объект в категорию риска по временным задержкам. В формате *OWL* эти знания представлены классом «owl:Restriction» с фасадами «xsd:minInclusive» (рисунок 4).

В языке *Manchester OWL Syntax* (стандарт *OWL 2*) класс «Риск высокой частоты» (*HighFrequencyRisk*) определяется как подкласс проектной сущности, имеющей значение частоты не менее 900 МГц:

*Class: HighFrequencyRisk*

*EquivalentTo:*

*DesignEntity and (hasFrequency some xsd:double[>= 900.0]).*

Данная аксиома эквивалентности означает, что любой индивид, удовлетворяющий условию, классифицируется как «Риск высокой частоты». Это правило на языке *SWRL*: *DesignEntity(?d) ∧ hasFrequency(?d, ?f) ∧ swrlb: greaterThanOrEqual(?f, 900.0) → HighFrequencyRisk(?d)*. Обе формы семантически эквивалентны и обеспечивают автоматическое выявление риска на этапе ЛВ.

Annotations: Риск высоких частот

Annotations +

rdfs:label [language: ru]  
Риск высоких частот

Description: Риск высоких частот

Equivalent To +

● 'Проектная сущность'  
and (частота some xsd:decimal[>= 900.0])

SubClass Of +

● 'Проектная сущность'  
● 'Риск таймингов'

Рисунок 4 – Определение аксиомы/ правила

Далее выполняется процесс классификации с применением дедуктивного ЛВ. Алгоритм работы представляется последовательностью следующих шагов.

- 1) *инициализация свойств и извлечение значений*. ЛВ проанализирован экземпляр «АЛУ 1» и извлечены значения свойств «Частота» и «Потребление».
- 2) *сопоставление с ограничениями*. Сопоставляется извлечённое значение с аксиоматическими ограничениями, заданными для класса «Риск высокой частоты» ( $950 \geq 900$ ).
- 3) *применение правила вывода*. После проверки истинности условия ЛВ применяется правило классификации. На основе логики первого порядка сформулировано заключение о том, что экземпляр удовлетворяет ограничениям целевого класса.

В результате получен выводимый тезис  $\phi$ : экземпляр «АЛУ 1» принадлежит к классу «Риск высокой частоты».

В интерфейсе *Protégé* это выражено в виде автоматического перемещения экземпляра «Тестовое АЛУ (900MHz)» в рубрику «Риск высокой частоты» (рисунок 5).

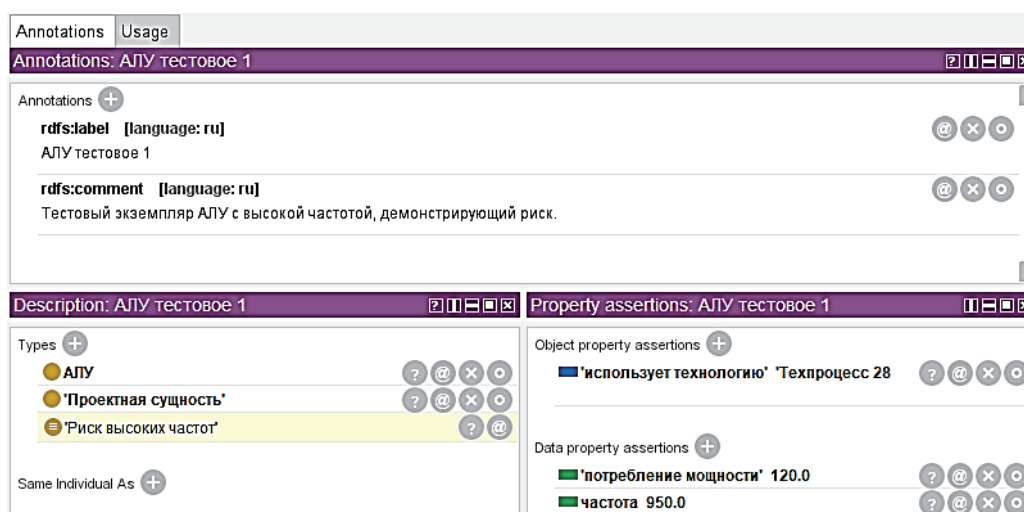


Рисунок 5 – Результат определения принадлежности экземпляра АЛУ 1 с высокой частотой, демонстрирующий риск

Данный эксперимент показал способность системы обнаруживать неявные знания, которые не были прописаны разработчиком, а выведены логически.

**Второй вид вычислительного эксперимента.** Масштабируемость и универсальность гибридного подхода проверены введением второй критерий оценки в условия задачи – «Энергопотребление». В соответствии с экспертными знаниями, заложенными в онтологию *O*, определён критический порог потребления в 100 мВт. Для формализации этого знания в онтологии создан класс «Риск высокого потребления», который определён через аксиому эквивалентности, использующую ограничение типа данных:

$$\forall x \in I: (\text{ПроектнаяСущность}(x) \wedge \exists z(\text{потребление}(x, z) \wedge z \geq 100) \Rightarrow \text{РискВысокогоПотребления}(x)). \quad (10)$$

Данная аксиома эквивалентности означает, что любой индивид, удовлетворяющий условию, классифицируется как «Риск высокого потребления». Это правило на языке *SWRL* позволяет комбинировать правила с более сложной логикой, например, с учётом технологических норм или температурных ограничений.

В множество фактов *F*, используемых для верификации, включено описание экземпляра «АЛУ 1», для которого значение свойства «Потребление задано 120 мВт», что существенно превышает безопасный порог. В процессе классификации МЛВ последовательно выполнила ряд операций, результат которых представлен на рисунке 6.

Определено, что значение свойства «Потребление» для экземпляра «АЛУ 1» превышает порог ( $120 \geq 100$ ). В соответствии с (7) сделан вывод о выполнимости ограничений для класса «Риск высокого потребления». В результате получен выводимый тезис ф: экземпляр «АЛУ 1» принадлежит классу «Риск высокого потребления».

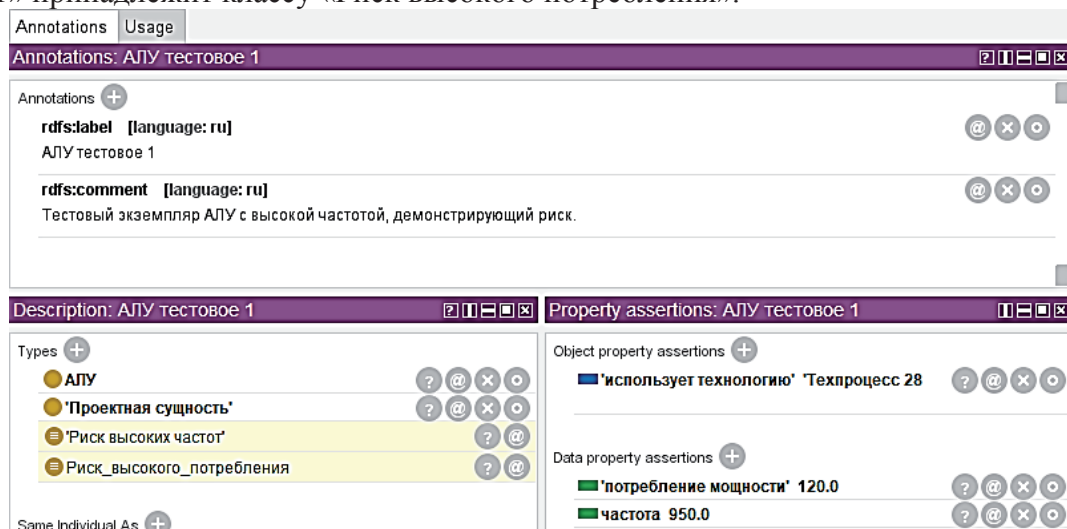


Рисунок 6 – Результат определения принадлежности экземпляра АЛУ 1 с высоким энергопотреблением, демонстрирующий риск

Полученный результат подтверждает, что ОМ способна поддерживать независимые проверки с различными параметрами в рамках единой модели. В случае не заданного класса риска для данного объекта ОМ автоматически выявляет эту категорию риска на основе анализа формализованных правил, демонстрируя способность ЛВ.

**Третий вид вычислительного эксперимента.** Моделируется проектный риск, связанный с выявлением компонентов, комбинация параметров которых может привести к проблемам. Для этого в онтологию введён класс «Критический компонент», логическое правило которого основано на двух рассмотренных классах. При этом компонент считается критическим, только если он одновременно имеет высокую частоту и высокое энергопотребление. Формальная запись аксиомы  $A$  выглядит следующим образом (см. также рисунок 7):

$$\text{КритическийКомпонент} \equiv \text{РискВысокойЧастоты} \sqcap \text{РискВысокогоПотребления} \quad (11)$$

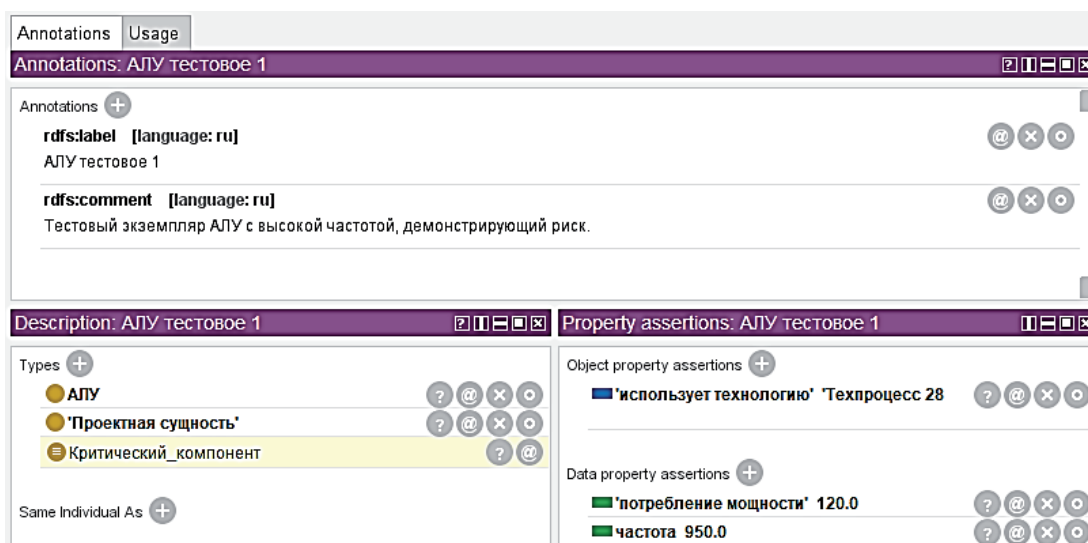


Рисунок 7 – Логический вывод для класса «Критический компонент»

## 5 Оценка эффективности и масштабируемости предложенного подхода

Цель эксперимента – исследование метрик: масштабируемости механизма ЛВ при увеличении объёма проектной информации; точности и полноты автоматического обнаружения проектных рисков по сравнению с традиционным производственным подходом; влияния семантической сложности онтологии (количества классов, свойств и аксиом) на производительность системы. В качестве базового метода для сравнения использовалась *Rule-Based* экспертная система на языке *Python* с применением библиотеки *Experta* [19]. ОМ обрабатывалась с помощью МЛВ *Pellet* в среде *Protégé* с автоматизацией замеров в *OWL-API* [5, 7, 25].

Для оценки зависимости времени классификации от объёма проектных данных сформирована серия тестовых онтологий, содержащих от 10 до 500 экземпляров класса «АЛУ» с варьируемыми значениями частоты и энергопотребления. Для каждого набора данных фиксировалось полное время, затраченное МЛВ на классификацию всех объектов. Результаты представлены на рисунке 8. Из рисунка видно, что МЛВ превосходит базовый метод в 5 раз по времени вычисления. Предложенный онтологический подход показывает близкую к линейной масштабируемость, что обусловлено оптимизированными табличными алгоритмами дескриптивной логики, используемыми в МЛВ. Полученная зависимость подтверждает применимость разработанной модели для анализа процесса проектирования СБИС, содержащих сотни и тысячи функциональных блоков.

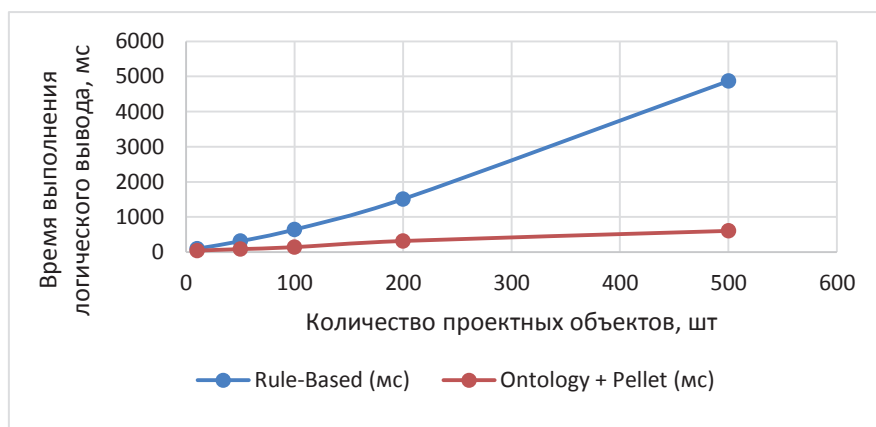


Рисунок 8 – Зависимость времени классификации от количества объектов в онтологии

Для оценки поведения предложенного подхода на объёмах данных, приближенных к реальным проектам СБИС, проведён вычислительный эксперимент на 2000 и 5000 экземпляров класса «АЛУ» со значениями частоты (300–1200 МГц) и потребления (30–200 мВт). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Масштабируемость логического вывода при увеличении числа объектов

| Количество объектов | Время загрузки, мс | Время классификации, мс | Общее время, мс | Пиковое использование ОЗУ, МБ |
|---------------------|--------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 500                 | 420                | 185                     | 605             | 310                           |
| 2000                | 1680               | 770                     | 2450            | 580                           |
| 5000                | 3950               | 2250                    | 6200            | 1240                          |

Из таблицы 1 видно, что зависимость времени классификации от числа объектов остаётся близкой к линейной. Полученные результаты подтверждают применимость предложенного подхода для анализа проектов, содержащих до нескольких тысяч функциональных блоков.

Для оценки качества классификации сформирована тестовая выборка, содержащая 50 экземпляров класса «АЛУ» с различными комбинациями параметров частоты и энергопотребления. Из них 28 экземпляров были размечены экспертом как содержащие проектные риски (высокая частота, высокое потребление либо их комбинация), в 22 экземплярах риски отсутствовали. Для каждого метода рассчитывались метрики бинарной классификации: точность (*Precision*), полнота (*Recall*) и F1-мера (*F1-score*). Результаты расчёта представлены в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что предложенный онтологический подход превосходит продукционную систему по полноте и по точности обнаружения рисков. Особенно значим прирост полноты с 71% до 96%. Это объясняется тем, что МЛВ способна выявлять комбинированные и транзитивные зависимости, которые в базовой системе требуют явного задания сложных составных условий и зачастую опускаются при формализации экспертных знаний. Можно отметить пятикратное сокращение времени обработки одного проектного объекта.

Таблица 2 – Сравнение метрик качества обнаружения проектных рисков

| Метод                     | <i>Precision</i> | <i>Recall</i> | <i>F1-score</i> | Время на 1 объект, мс |
|---------------------------|------------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| <i>Rule-Based</i>         | 0,84             | 0,71          | 0,77            | 6,4                   |
| Онтология + <i>Pellet</i> | 0,92             | 0,96          | 0,94            | 1,2                   |

Для оценки устойчивости предложенного подхода к усложнению модели знаний сформирована серия из четырёх версий онтологии (каждая содержит 100 экземпляров класса «АЛУ»): базовая таксономия  $O_1$ ;  $O_2$ , дополненная свойствами данных «Частота», «Потребление» и объектными свойствами «Технология»;  $O_3$ , включающая *SWRL*-правила для выявления рисков по отдельным параметрам; и  $O_4$ , включающая класс «Критический компонент». В эксперименте фиксировалось время загрузки онтологии в МЛВ и время полной классификации объектов. Результаты эксперимента представлены на рисунке 9.

Из анализа диаграммы видно, что основную долю времени занимает загрузка онтологии и её подготовка к ЛВ, тогда как процедура классификации выполняется за 150-320 мс. Прирост времени при переходе от  $O_1$  к  $O_4$  увеличивается в 2,4 раза для загрузки и в 2,1 раза для классификации, что является приемлемым. Добавление *SWRL*-правил и сложных аксиом не вызывает экспоненциального роста времени вывода, что подтверждает эффективность табличных алгоритмов, реализованных в МЛВ. Полученные результаты показывают, что предложенная ОМ сохраняет практическую пригодность при насыщении логическими конструкциями, необходимыми для ППР.

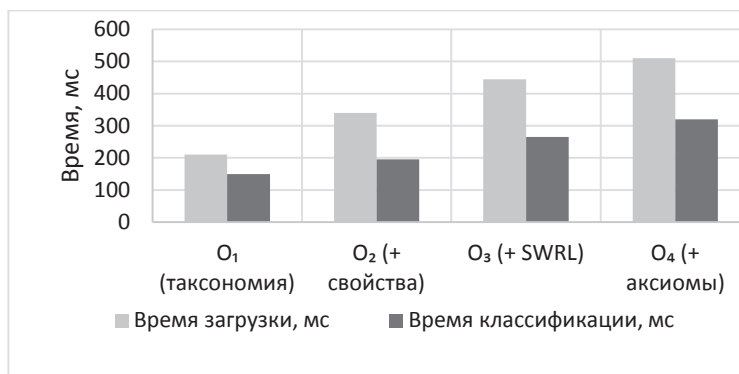


Рисунок 9 – Диаграмма сравнения метрик времени загрузки и классификации для различных онтологий

Предложенный онтологический подход не лишён ограничений, которые следует принимать во внимание при его практическом внедрении.

Формализация аксиом и правил ЛВ выполняется на основе знаний специалистов в области проектирования СБИС. Субъективность, неполнота или устаревание знаний способны приводить к некорректной классификации проектных рисков. Необходимо предусматривать механизм обратной связи для корректировки правил по результатам применения ОМ.

Технологические процессы проектирования СБИС постоянно совершенствуются, что влечёт за собой необходимость обновления пороговых значений частот, энергопотребления,

напряжений и других параметров. Онтология, изначально настроенная на конкретную технологическую норму, может оказаться неэффективной без доработки.

При значительном увеличении числа аксиом (особенно *SWRL*-правил) и количества индивидов время классификации может возрасти нелинейно. Проведённые в работе эксперименты на 5000 объектах показали приемлемое время полной классификации и близкую к линейной масштабируемость. При дальнейшем росте сложности онтологии рекомендуется использовать модульную декомпозицию, ограничивающую область вывода.

## Заключение

В работе рассмотрена актуальная задача формализации и систематизации инженерных знаний в области проектирования СБИС. Предложена и описана ОМ ПрО, отвечающая требованиям полноты, логической согласованности и масштабируемости. Разработан алгоритм её интеграции в процесс ППР в САПР. Генерация рекомендаций, основанных на результатах ЛВ, позволяет устранять выявленные риски и использовать успешные стратегии для дальнейшего «обучения» онтологии.

Результаты вычислительных экспериментов на ОМ в среде *Protégé* с использованием МЛВ подтвердили эффективность предложенного подхода. Установлено, что онтологический метод превосходит продукционный по полноте выявления рисков на 25% при пятикратном сокращении времени на обработку объекта. Усложнение онтологии свойствами, правилами и аксиомами незначительно увеличивает время классификации, что подтверждает устойчивость ОМ.

## Список источников

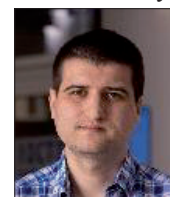
- [1] **Cirstea M., Benkrid K., Dinu A., Ghiriti R., Petreuş D.** Digital Electronic System-on-Chip Design: Methodologies, Tools, Evolution, and Trends. *Micromachines*. 2024. Vol.15(2):247. DOI: 10.3390/mi15020247.
- [2] **Lu J., Zheng X., Wang G., Li H., Kiritsis D.** Design Ontology Supporting Model-Based Systems Engineering Formalisms // *IEEE Systems Journal*. 2020. Vol.16. P.5465-5476. DOI: 10.1109/jsyst.2021.3106195.
- [3] **Demoly F., Kim K., Horváth I.** Ontological engineering for supporting semantic reasoning in design: deriving models based on ontologies for supporting engineering design. *Journal of Engineering Design*. 2019. Vol.30. P.405-416. DOI: 10.1080/09544828.2019.1633626.
- [4] **Kureychik V., Safronenkova I.** Ontology-based approach to design problem formalization. *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. 2019. P.1-5. DOI: 10.1109/sed.2019.8798464.
- [5] **Bova V.V., Kravchenko Y.A., Rodzin S.I., Kuliev E.V.** Simulation of the semantic network of knowledge representation in intelligent assistant systems based on ontological approach. *Communications in Computer and Information Science*. 2021. Vol.1396 CCIS. P.241–252. DOI: 10.1007/978-981-16-1483-5\_22.
- [6] **Bova V.V., Shcheglov S.N., Kureichik V.V., Kureichik L.V.** Multi-level ontological model of big data processing. *Adv. in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol.874. P.171-181. DOI: 10.1007/978-3-030-01818-4\_17.
- [7] **Kureichik V., Safronenkova I.** Ontology-Based Decision Support System for the Choice of Problem-Solving Procedure of Commutation Circuit Partitioning. *Communications in Computer and Information Science*. 2017. P.467-478. DOI: 10.1007/978-3-319-65551-2\_34.
- [8] **Vanommeslaeghe Y., Denil J., De Viaene J., Ceulemans D., Derammelaere S., Meulenaere P.** Ontological reasoning in the design space exploration of advanced cyber-physical systems. *Microprocess and Microsystems*. 2021. Vol.85. Article 104151. DOI: 10.1016/j.micpro.2021.104151.
- [9] **Tolpygo S.K., Bolkhovskiy V., Rastogi R., et al.** Advanced fabrication processes for superconductor electronics: Current status and new developments. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol.29, No.5. P.1-13. DOI: 10.1109/TASC.2019.2904919.
- [10] **Grosan C., Abraham, A.** Rule-Based Expert Systems. *Studies in Computational Intelligence*. 2005. Vol.2. P.149-185. DOI: 10.1007/978-3-642-21004-4\_7.
- [11] **Kumar S.** Knowledge-based expert system in manufacturing planning: state-of-the-art review. *International Journal of Production Research*. 2018. Vol.57. P.4766-4790. DOI: 10.1080/00207543.2018.1424372
- [12] **Meng L., McWilliams B., Jarosinski W., Park H., Jung Y., Lee J., Zhang J.** Additive Manufacturing: A Review. *JOM*. 2020. Vol.72. P.2363-2377. DOI: 10.1007/s11837-020-04155-y.

- [13] **Shahid N., Khan N.** A Comprehensive Analysis of Metaheuristic Optimization Approach for Engineering Design Problems Hybridized with Machine Learning for Anomaly Detection in Predictive Modelling. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2025. DOI: 10.1007/s11831-025-10308-6.
- [14] **Массель Л.В., Ерженун П.В.** Онтологический подход к представлению знаний о методологии моделирования сложной системы управления. *Онтология проектирования*. 2020. Т.10, №4(38). С.463-476. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-463-476.
- [15] **Choi S., Kim S.** Knowledge Acquisition and Representation for High-Performance Building Design: A Review for Defining Requirements for Developing a Design Expert System. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Article 4640. DOI: 10.3390/su13094640.
- [16] **Gill M.S., Westermann T., Schieseck M., Fay A.** Integration of Domain Expert-Centric Ontology Design into the CRISP-DM for Cyber-Physical Production Systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 125548–125567. DOI: 10.48550/arXiv.2307.11637.
- [17] **Bourauoi Z., Benmohamed S., Mkaouar H., et al.** Integrated Systems Ontology (ISOnto): Integrating Engineering Design and Operational Feedback for Dependable Systems. *Computers*. 2025. Vol.14, №11. 451. DOI: 10.3390/computers14110451.
- [18] **Sales D.C., Becker L.B., Koliver C.** The systems architecture ontology (SAO): an ontology-based design method for cyber-physical systems. *Applied Computing and Informatics*. 2025. Vol.21, №3-4. P.259–274. DOI: 10.1108/ACI-09-2021-0249.
- [19] **Rockwell J., Grosse I.R., Krishnamurty S., Wileden J.C.** A Decision Support Ontology for collaborative decision making in engineering design. *2009 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems. IEEE*. 2009. P.1-9. DOI:10.1109/CTS.2009.5067456.
- [20] **Никулина Н.О., Малахова А.И., Иванова И.Ф.** Интеллектуальная поддержка принятия решений при анализе рисков инновационного проекта. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №3(33). С.382-397. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-3-382-397.
- [21] **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.
- [22] **Массель Л.В., Массель А.Г.** Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №1(47). С.44-54. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-44-54.
- [23] **Li P., Zhu S., Xi W., et al.** Triple-Threshold Path-Based Static Power-Optimization Methodology (TPSPOM) for Designing SOC Applications Using 28 nm MTCMOS Technology. *Applied Sciences*. 2023. Vol.13, №6. P.3471. DOI: 10.3390/app13063471.
- [24] **Yin M., Li Z., Zhang W., et al.** Power, performance, and area evaluation across 180nm-28nm technology nodes based on benchmark circuits. *IEICE Electronics Express*. 2024. Vol.21, №9. P.20240194. DOI: 10.1587/elex.21.20240194.
- [25] **Favi C., Campi F., Germani M., Mandolini M.** Engineering knowledge formalization and proposition for informatics development towards a CAD-integrated DfX system for product design. *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol.51. P.101537. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101537.

## Сведения об авторах



**Курейчик Владимир Викторович**, 1966 г. рождения. Окончил Таганрогский радиотехнический институт (1990), д.т.н. (2001). Профессор, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования ИТА ЮФУ. Председатель Ростовского отделения Российской ассоциации искусственного интеллекта, член-корреспондент Российской академии естественных наук, действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. В списке научных трудов более 500 работ в области искусственного интеллекта и САПР. Author ID (РИНЦ): 17804; Author ID (Scopus): 56602660900; ORCID: 0000-0002-6260-4286. [vkur@sfedu.ru](mailto:vkur@sfedu.ru).



**Данильченко Владислав Иванович**, 1994 г. рождения. Окончил ЮФУ (2018), к.т.н. (2023). Доцент кафедры систем автоматизированного проектирования ИТА ЮФУ. В списке научных трудов более 70 работ. Author ID (РИНЦ): 1065818; Author ID (Scopus): 57219987745. ORCID: 0000-0002-3620-9098. [vdanilchenko@sfedu.ru](mailto:vdanilchenko@sfedu.ru) ✉.



**Мансур Али Махмуд**, 1991 г. рождения. Окончил университет Тартуса по специальности «Информационные технологии и коммуникации» (2014), к.т.н. (2025). Старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования ИТА ЮФУ. В списке научных трудов более 25 работ. Author ID (РИНЦ): 1294341; Author ID (Scopus): 57755390700. ORCID: 0009-0001-6313-0131. [mansur@sfedu.ru](mailto:mansur@sfedu.ru).



**Бова Виктория Викторовна**, 1971 г. рождения. Окончила Таганрогский радиотехнический институт в 1993 г. Доцент кафедры систем автоматизированного проектирования ИТА ЮФУ. В списке научных трудов более 140 работ. Author ID (РИНЦ): 549617; Author ID (Scopus): 55973871300. ORCID: 0000-0003-2580-7153. [vvbova@sfedu.ru](mailto:vvbova@sfedu.ru).

Поступила в редакцию 04.03.2026, после рецензирования 21.04.2026. Принята к публикации 04.05.2026.



Scientific article

DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-2-283-299

## An ontological approach to knowledge formalization in the design of very-large-scale integrated circuits

© 2026, V.V. Kureychik, V.I. Danilchenko✉, A.M. Mansour, V.V. Bova

*Engineering and Technology Academy of the Southern Federal University (ITA SFU), Taganrog, Russia*

### Abstract

An approach to formalizing engineering knowledge is proposed, aimed at systematizing the subject area of very-large-scale integrated circuit design and supporting design decision-making. The approach is based on an ontological model of very-large-scale integrated circuit design, represented as a structured tuple comprising concepts, relations, properties, and axioms. Formalizing expert rules as axioms enables the transition from fragmented data to a structured knowledge base suitable for intelligent analysis and automated decision-making at the early stages of design. The process of ontology construction using the Protégé environment is described, including the stages of expert knowledge acquisition, formalization of its characteristics, and definition of semantic relationships. The ontological model was tested on the tasks related to the selection of architectural solutions and multicriteria assessment of design risks. Experimental results demonstrate the feasibility of automated object classification, detection of hidden timing constraint violations, and confirm the practical applicability of the ontological model for reducing the probability of errors and decreasing time costs in the design of very-large-scale integrated circuits. Evaluation of the proposed approach's effectiveness revealed a linear relationship with an increase in the number of processed design objects, a fivefold reduction in processing time compared to production systems, and a 25% increase in the completeness of risk detection.

**Keywords:** *ontology, design, very-large-scale integrated circuits, knowledge formalization, decision support, design risk assessment, CAD systems.*

**For citation:** *Kureichik V.V., Danilchenko V.I., Mansur A.M., Bova V.V. An ontological approach to knowledge formalization in the design of very-large-scale integrated circuits [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2026; 16(2): 283-299. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-283-299.*

**Financial Support:** The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-71-00035, <https://rscf.ru/project/24-71-00035/> at Southern Federal University.

**Authors' contributions:** *Kureichik V.V.* – problem statement and research concept development; *Danilchenko V.I.* – ontological model development and computational experiments; *Mansur A.M.* – decision support algorithm development, software implementation, data preparation; *Bova V.V.* – results analysis and model verification.

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

## List of figures and tables

- Figure 1 – Fragment of the hierarchical ontology structure  
 Figure 2 – Scheme of the algorithm for formalization of design knowledge and decision support  
 Figure 3 – Upper level of the ontology for support of design decision  
 Figure 4 – Definition of an axiom/rule  
 Figure 5 – Result of determining the membership of ALU 1 instance with high frequency, demonstrating risk  
 Figure 6 – Result of determining the membership of ALU 1 instance with high power consumption, demonstrating risk  
 Figure 7 – Logical inference for the "Critical Component" class  
 Figure 8 – Dependence of classification time on the number of ontology objects  
 Figure 9 – Comparison diagram of loading and classification time metrics for different ontologies  
 Table 1 – Scalability of logical inference with increasing number of objects  
 Table 2 – Comparison of quality metrics for design risk detection

## References

- [1] **Cirstea M, Benkrid K, Dinu A, Ghiriti R, Petreuş D.** Digital Electronic System-on-Chip Design: Methodologies, Tools, Evolution, and Trends. *Micromachines*. 2024; 15(2): 247. DOI: 10.3390/mi15020247.
- [2] **Lu J, Zheng X, Wang G, Li H, Kiritsis D.** Design Ontology Supporting Model-Based Systems Engineering Formalisms. *IEEE Systems Journal*. 2020; 16: 5465-5476. DOI: 10.1109/jsyst.2021.3106195.
- [3] **Demoly F, Kim K, Horváth I.** Ontological engineering for supporting semantic reasoning in design: deriving models based on ontologies for supporting engineering design. *Journal of Engineering Design*. 2019; 30: 405-416. DOI: 10.1080/09544828.2019.1633626.
- [4] **Kureychik V, Safronenkova I.** Ontology-based approach to design problem formalization. *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. 2019; 1-5. DOI: 10.1109/sed.2019.8798464.
- [5] **Bova VV, Kravchenko YA, Rodzin SI, Kuliev EV.** Simulation of the semantic network of knowledge representation in intelligent assistant systems based on ontological approach. *Communications in Computer and Information Science*. 2021; 1396 CCIS:241–252. DOI: 10.1007/978-981-16-1483-5\_22.
- [6] **Bova VV, Shcheglov SN, Kureichik VV, Kureichik LV.** Multi-level ontological model of big data processing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; Vol.1. 874: 171-181. DOI: 10.1007/978-3-030-01818-4\_17.
- [7] **Kureychik V, Safronenkova I.** Ontology-Based Decision Support System for the Choice of Problem-Solving Procedure of Commutation Circuit Partitioning. *Communications in Computer and Information Science*. 2017; 467-478. DOI: 10.1007/978-3-319-65551-2\_34.
- [8] **Vanommeslaeghe Y, Denil J, De Viaene J, Ceulemans D, Derammelaere S, Meulenaere P.** Ontological reasoning in the design space exploration of advanced cyber-physical systems. *Microprocessors and Microsystems*. 2021; 85: 104151. DOI: 10.1016/j.micpro.2021.104151.
- [9] **Tolpygo SK, Bolkhovsky V, Rastogi R, et al.** Advanced fabrication processes for superconductor electronics: Current status and new developments. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019; 29(5): 1-13. DOI: 10.1109/TASC.2019.2904919.
- [10] **Grosan C, Abraham A.** Rule-Based Expert Systems. *Studies in Computational Intelligence*. 2005; 2: 149-185. DOI: 10.1007/978-3-642-21004-4\_7.
- [11] **Kumar S.** Knowledge-based expert system in manufacturing planning: state-of-the-art review. *International Journal of Production Research*. 2018; 57: 4766-4790. DOI: 10.1080/00207543.2018.1424372.
- [12] **Meng L, McWilliams B, Jarosinski W, Park H, Jung Y, Lee J, Zhang J.** Machine Learning in Additive Manufacturing: A Review. *JOM*. 2020; 72: 2363-2377. DOI: 10.1007/s11837-020-04155-y.
- [13] **Shahid N, Khan N.** A Comprehensive Analysis of Metaheuristic Optimization Approach for Engineering Design Problems Hybridized with Machine Learning for Anomaly Detection in Predictive Modelling. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2025. DOI: 10.1007/s11831-025-10308-6.
- [14] **Massel LV, Erzhenin RV.** Ontological approach to the knowledge representation about the methodology of modeling a complex control system [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2020; 10(4): 463-476. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-463-476.
- [15] **Choi S, Kim S.** Knowledge Acquisition and Representation for High-Performance Building Design: A Review for Defining Requirements for Developing a Design Expert System. *Sustainability*. 2021; 13: 4640. DOI: 10.3390/su13094640.
- [16] **Gill MS, Westermann T, Schieseck M, Fay A.** Integration of Domain Expert-Centric Ontology Design into the CRISP-DM for Cyber-Physical Production Systems. *IEEE Access*. 2023; 11: 125548–125567. DOI: 10.48550/arXiv.2307.11637.

- [17] **Bouraoui Z, Benmohamed S, Mkaouar H, et al.** Integrated Systems Ontology (ISOnto): Integrating Engineering Design and Operational Feedback for Dependable Systems. *Computers*. 2025; 14(11): 451. DOI: 10.3390/computers14110451.
- [18] **Sales DC, Becker LB, Koliver C.** The systems architecture ontology (SAO): an ontology-based design method for cyber-physical systems. *Applied Computing and Informatics*. 2025; 21(3-4): 259–274. DOI: 10.1108/ACI-09-2021-0249.
- [19] **Rockwell J, Grosse IR, Krishnamurthy S, Wileden JC.** A Decision Support Ontology for collaborative decision making in engineering design. *2009 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems. IEEE*. 2009; 1-9. DOI: 10.1109/CTS.2009.5067456.
- [20] **Nikulina NO, Malakhova AI, Ivanova IF.** Decision-making intelligent support in the risk analysis of innovative project [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2019; 9(3): 382-397. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-3-382-397.
- [21] **Shilov NG.** Development of a Multi-Aspect Ontology for Decision Support in Production Systems [In Russian]. *Information Technologies and Computing Systems*. 2024; 2: 52-64. DOI: 10.14357/20718632240205.
- [22] **Massel LV, Massel AG.** Semantic modeling in the construction of digital twins of energy objects and systems [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2023; 13(1): 44-54. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-44-54.
- [23] **Li P, Zhu S, Xi W, et al.** Triple-Threshold Path-Based Static Power-Optimization Methodology (TPSPOM) for Designing SOC Applications Using 28 nm MTCMOS Technology. *Applied Sciences*. 2023; 13(6): 3471. DOI: 10.3390/app13063471.
- [24] **Yin M, Li Z, Zhang W, et al.** Power, performance, and area evaluation across 180nm-28nm technology nodes based on benchmark circuits. *IEICE Electronics Express*. 2024; 21(9): 20240194. DOI: 10.1587/elex.21.20240194.
- [25] **Favi C, Campi F, Germani M, Mandolini M.** Engineering knowledge formalization and proposition for informatics development towards a CAD-integrated DfX system for product design. *Advanced Engineering Informatics*. 2022; 51: 101537. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101537.

## About the authors

**Vladimir Viktorovich Kureychik** (b. 1966) graduated from Taganrog Radio Engineering Institute (TRTI) in 1990. Doctor of Technical Sciences (2001). Professor, Head of the Department of Computer-Aided Design Systems at SFU. Chairman of the Rostov branch of the Russian Association for Artificial Intelligence, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Full Member of the Prokhorov Academy of Engineering Sciences. Author of over 500 scientific works in the fields of CAD systems and AI. Author ID (RSCI): 9142; Author ID (Scopus): 6603474810; Researcher ID (WoS): B-4793-2014. ORCID: 0000-0002-6260-4286. [vkur@sfedu.ru](mailto:vkur@sfedu.ru).

**Vladislav Ivanovich Danilchenko** (b. 1994) graduated from Southern Federal University (SFEDU) in 2018. Candidate of Technical Sciences (2023). Associate Professor at the Department of Computer-Aided Design Systems at SFU. Author of about 70 scientific works. Author ID (RSCI): 1065818; Author ID (Scopus): 57194559630. ORCID: 0000-0002-3620-9098. [vdanilchenko@sfedu.ru](mailto:vdanilchenko@sfedu.ru) ✉.

**Ali Mahmoud Mansur** (b. 1991) graduated from Tartus University with a degree in Information Technology and Communications in 2014, Candidate of Technical Sciences (2025). Senior lecturer at the Department of Computer-Aided Design Systems at SFU. Author of approximately 25 scientific publications. Author ID (RSCI): 1294341; Author ID (Scopus): 57755390700. ORCID: 0009-0001-6313-0131. [mansur@sfedu.ru](mailto:mansur@sfedu.ru).

**Victoria Victorovna Bova** (b. 1971) graduated from TRTI in 1993. Associate Professor at the Department of Computer-Aided Design Systems at SFU. Author of about 140 scientific works. Author ID (RSCI): 549617; Author ID (Scopus): 55973871300. ORCID: 0000-0003-2580-7153. [vvbova@sfedu.ru](mailto:vvbova@sfedu.ru)

Received March 04, 2026. Revised April.21, 2026. Accepted May 04, 2026.



## Онтология методов машинного обучения при управлении проектами

© 2026, Т.М. Мурзагалеев<sup>1,2</sup>✉, Н.А. Жукова<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО «РН-Проектирование Добыча», Томск, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

Применение методов машинного обучения в области управления проектами потенциально обеспечивает ряд преимуществ, которые могут позволить улучшить управление. Для эффективного применения методов машинного обучения используются наиболее показательные метрики с учётом разнообразия наборов данных, для которых требуется структурирование и систематизация элементов управления проектами. Целью данного исследования является разработка онтологии, позволяющей обеспечить необходимую информацию о применении методов машинного обучения в управлении проектами для прогнозирования трудозатрат и сроков выполнения проектов. Выполнен обзор методов машинного обучения, их метрик и наборов данных из научных публикаций, разработана и описана структура онтологии в области применения методов машинного обучения в управлении проектами для прогнозирования трудозатрат и сроков проектов, описана схема информационного взаимодействия пользователя с онтологией. Результаты проведённого исследования могут позволить упростить процесс поиска необходимых методов машинного обучения для их использования при управлении проектами на основе новых или общедоступных наборов данных.

**Ключевые слова:** онтология, управление проектами, прогнозирование срока проекта, трудозатраты проекта, методы машинного обучения, набор данных.

**Цитирование:** Мурзагалеев Т.М., Жукова Н.А. Онтология методов машинного обучения при управлении проектами. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.300-313. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-300-313.

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке государственного бюджета, номер проекта FFZF-2025-0019.

**Вклад авторов:** Мурзагалеев Т.М. – подбор и анализ источников, разработка онтологии; Жукова Н.А. – разработка структуры статьи, научное руководство, итоговые выводы.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Введение

Основными проблемами при управлении проектами (УП) в любой отрасли являются малоэффективное использование ресурсов, превышение ожидаемой продолжительности выполнения задачи и перерасход ресурсов, а также отсутствие непрерывного мониторинга процесса выполнения проекта [1, 2]. Точная оценка сроков и затрат проектов позволяет разрабатывать планы выполнения работ, выявлять и преодолевать потенциальные задержки и конфликты, а также обеспечивать баланс между стоимостью и качеством [3, 4].

Применение прогнозирующих методов машинного обучения (ММО) для оценки сроков и затрат при разработке проектов считается высокоэффективным способом устранения неопределённости, а также автоматизации решения повторяющихся задач, составления прогнозов и предоставления аналитических данных для эффективного принятия решений [5, 6].

Успешность применения ММО в УП зависит от наличия актуальных и высококачественных исходных данных. В качестве характеристик наборов данных (НД), используемых для построения модели, рассматриваются: размер НД, наличие выбросов, категориальных признаков, пропущенных значений и др. Разнообразие и сложность проекта в сочетании с присутствующими рисками затрудняют разработку модели, позволяющей точно оценить трудоёмкость проекта. Поэтому используется ряд подходов и методов, адаптированных к конкретным типам проектов внутри отдельных отраслей [7]. Для эффективного применения ММО с учётом разнообразия НД требуется структурирование и систематизация ММО, метрик и НД в исследуемой предметной области (ПрО).

Целью данного исследования является разработка онтологии, позволяющей обеспечить интеграцию информации о применении ММО в УП для прогнозирования трудозатрат и сроков выполнения проектов.

## 1 Проектирование онтологии

Онтология является формой целостного представления системы знаний конкретной ПрО с помощью построения иерархии понятий (классов) и структуры отношений между ними [8]. В данной статье представлена онтология использования ММО для прогнозирования трудозатрат проектов при УП, как инструмент для структурирования и классификации данных [9].

В исследовании используется редактор *Protégé*, с помощью которого разрабатывается онтология. Запись семантических моделей осуществляется на языках *RDF/RDFS* и *OWL*. *RDF/RDFS* позволяют записывать простейшие факты об объектах, классах и свойствах. *RDF* предоставляет средства для записи триплетов: субъект–предикат–объект. *OWL*-онтология может включать описания классов, свойств и их экземпляров и определяет, как получать логические следствия, которые не присутствуют непосредственно в онтологии, но могут быть выведены из существующих с использованием семантики [10].

При построении онтологии выполняется следующая последовательность действий.

1) **определение классов** (*Classes*): типов объектов, их характеристик, комплексов понятий с их участием. В состав онтологии включены следующие классы: ММО (*Method\_ML*), метрика ММО (*Metric\_ML*), эксперимент (*Experiment*). Фундаментальным таксономическим конструктором для классов является отношение «быть подклассом» (*rdfs:subClassOf*), описывающее связь частного класса с более общим [11]. В разработанной онтологии классы *Experiment*, *Method\_ML* и *Metric\_ML* являются подклассами суперкласса *owl:Thing* (см. рисунок 1).

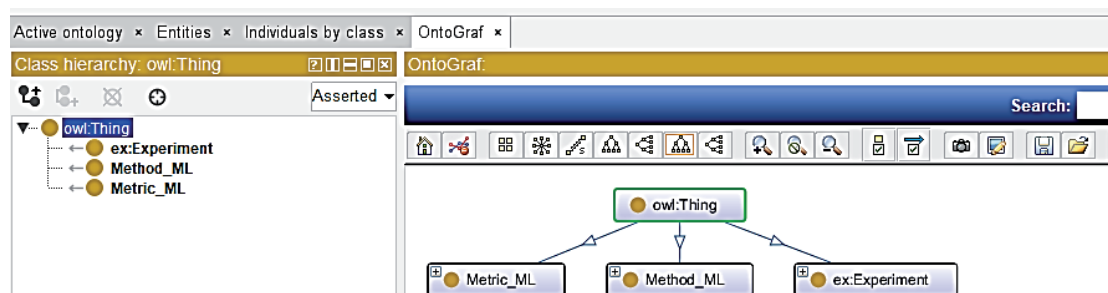


Рисунок 1 – Представление иерархии классов в редакторе *Protégé*

2) **определение отношений** (*Object properties*) (см. рисунок 2). Отношения определяют семантические связи между экземплярами (индивидами) различных классов. При связи двух сущностей через *Object properties* одно из них является объектом, а другое субъектом. Например, класс ММО имеет связь с классом метрика ММО, в онтологии – это отношение *Has\_metric*, в данной группе класс ММО определяется объектом, а класс метрика ММО – субъектом с помощью описания отношения в секциях *Domains* и *Ranges*. Отношение означает, что любой метод имеет как минимум одну метрику. Отношения, имеющиеся в онтологии, представлены в таблице 1.

3) **формирование** схемы онтологии как связанного комплекса компонентов. Схема определяется структурой подчинения классов и отношениями между классами.

4) **дополнение** онтологии экземплярами классов (*Individuals*), являющихся основными нижеуровневыми компонентами онтологии (см. рисунок 3), а также данными, имеющими физический смысл.

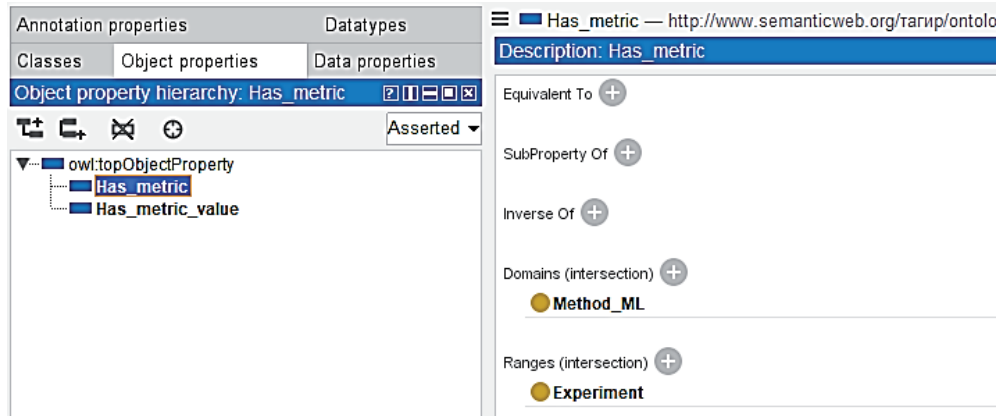


Рисунок 2 – Определение *Object properties* в редакторе *Protégé* на примере *Has\_metric*

Таблица 1 – Связь классов в онтологии через *Object properties*

| Отношения в онтологии   | Описание отношения  | Классы, участвующие в отношении         |
|-------------------------|---|---|
| <i>Has_metric</i>       | Связь указывает на наличие эксперимента со значением метрики у метода, причём экспериментов может быть несколько у метода                                   | <i>Method_ML</i> ,<br><i>Experiment</i> |
| <i>Has_metric_value</i> | Связь указывает на тип метрики в эксперименте со значением этой метрики, причём в нескольких экспериментах может быть использован один и тот же тип метрики | <i>Experiment</i> ,<br><i>Metric_ML</i> |

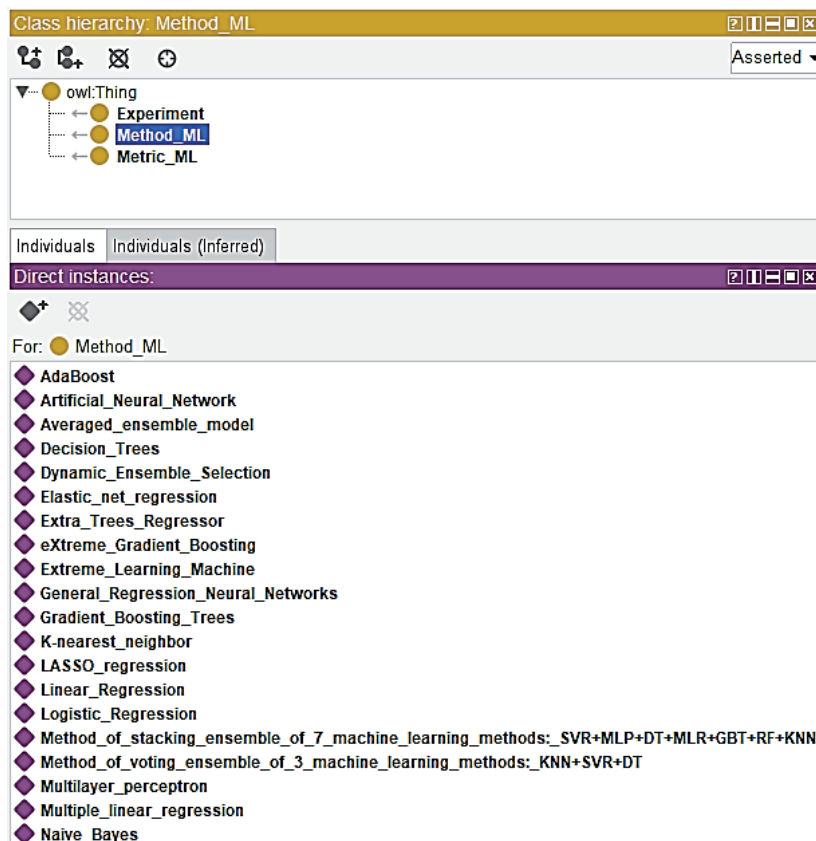


Рисунок 3 – *Individuals* класса *Method\_ML* в редакторе *Protégé*

5) **определение свойств данных (Data properties) Individuals**, связывая их с конкретными значениями, такими как строки, числа, даты или логические значения. Они не соединяют объекты между собой, а определяют их характеристики, см., например, рисунок 4: индивид *\_1* класса *Experiment* имеет свойства НД (*Data\_set*), ссылка на источник (*Source\_DOI*), значение метрики (*Value*). Свойства данных представлены в таблице 2.

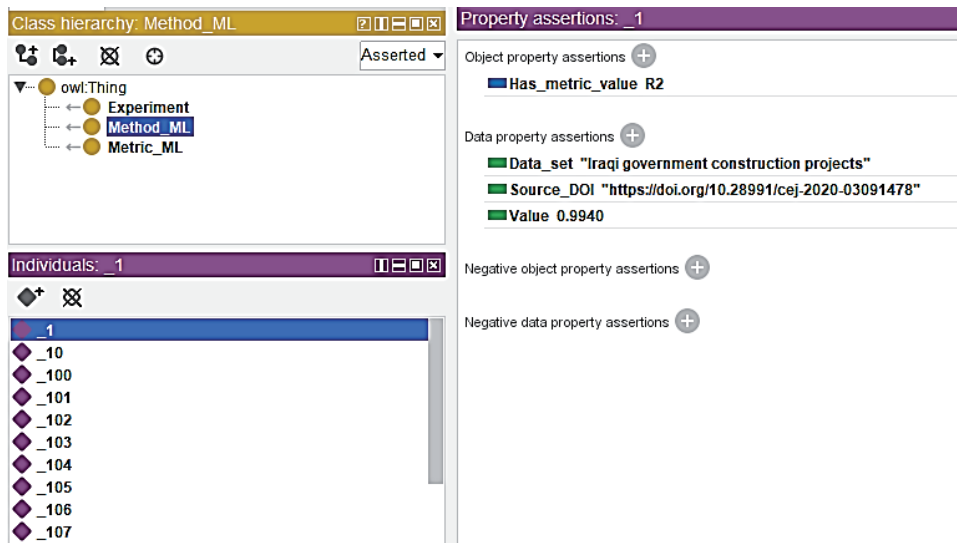


Рисунок 4 – Data properties класса *Experiment* в редакторе Protégé

Таблица 2 – Data properties индивидов классов в онтологии

| Наименование свойства данных в онтологии | Описание свойства данных                            | Класс, для которого задано свойство данных |
|--|---|--|
| <i>Value</i>                             | Полученное значение метрики в эксперименте          | <i>Experiment</i>                          |
| <i>Data_set</i>                          | Набор данных, на котором выполнялся эксперимент     |  |
| <i>Source_DOI</i>                        | Ссылка на работу, в которой представлен эксперимент |  |

Описание ПрО представлено на рисунке 5 в виде графа.

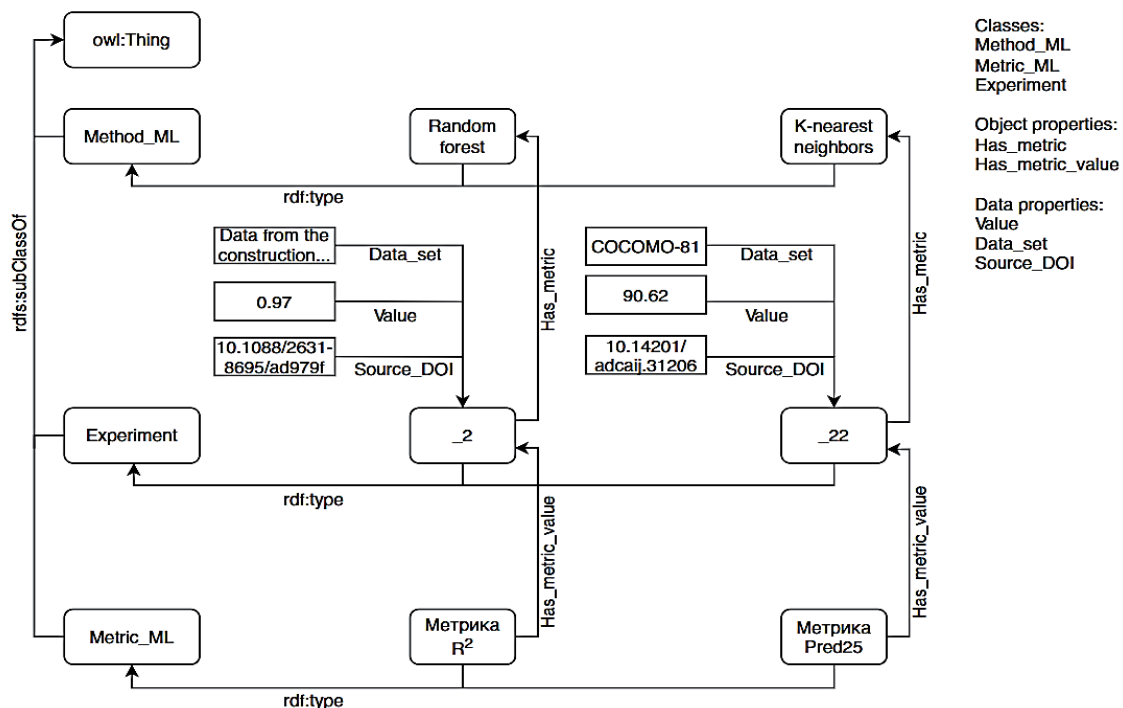


Рисунок 5 – Фрагмент графа, описывающего классы, экземпляры и их отношения в предметной области

Связи объекта и субъекта обозначены линией с направлением стрелки в сторону объекта. Линией с направлением стрелки обозначены отношения между индивидами, на которой направление стрелки обозначает, какой индивид является объектом, а какой – субъектом.

## 2 Наполнение онтологии

Для сбора применяемых ММО в УП при прогнозировании трудозатрат и сроков выполнения проектов были проанализированы публикации за период с 2017 по 2025 год.

В [12] для оценки стоимости и продолжительности строительства применён алгоритм оптимизации роя частиц. Для построения модели использована серия из 60 проектов, осуществленных в период с 2008 по 2016 года. Основными метриками в данном исследовании были корень из среднеквадратичной ошибки ( $RMSE$ ) и коэффициент детерминации ( $R^2$ ).

В [13] ММО применены для прогнозирования продолжительности строительства. При оценке ММО использовались  $RMSE$ ,  $R^2$  и средняя абсолютная погрешность ( $MAE$ ). Например, модель случайного леса (*Random Forest*,  $RF$ ) достигла значений  $RMSE$  в 74 дня и  $R^2$  0.97.

В [7] рассматривался потенциал ММО для оценки временных задержек в проектах морского строительства. Используются среднеквадратичная ошибка ( $MSE$ ),  $MAE$ ,  $RMSE$ , индекс разброса ( $SCI$ ) и коэффициент корреляции ( $R$ ). НД включал 30 проектов из государственных и частных секторов ряда стран. Искусственная нейронная сеть общей регрессии показала высокую прогностическую эффективность по сравнению с другими моделями.

В [14] исследование проведено на примере данных о строительных работах в порту. Среди использованных моделей наилучшие результаты в прогнозировании сроков выполнения проектов показала модель *Silverkite*.

В [15] использованы четыре различных ММО. В НД было 722 вектора. Сравнение результатов прогнозных моделей показало, что искусственная нейронная сеть и градиентный бустинг деревьев (*Gradient Tree Boost*,  $GBT$ ) дали лучшие результаты.

В [16] предложена модель множественной линейной регрессии для прогнозирования продолжительности строительства офисных зданий.

В [17] использованы общедоступные НД: *Albretch*, *Desharnais*, *COCOMO81*, *NASA*, *Kemerer*, *China* и *Kitchenham*. Эффективность методов измерялась с помощью показателей: средняя величина относительной погрешности ( $MMRE$ ), прогнозы, которые находятся в пределах 0.25 от фактического целевого значения  $PRED(0.25)$  и  $R^2$ . Для НД *Albretch*, *NASA* лучшая модель – гребневая регрессия, для НД *Desharnais*, *COCOMO81*, *China*, *Kitchenham* – метод деревьев принятия решений, для НД *Kemerer* – многослойный перцептрон.

В [18] предложена усовершенствованная модель ансамбля с многоуровневой структурой *Stacked Ensemble*. Используются НД *COCOMO81*, содержащий данные по 63 программным проектам, методы  $RF$  и  $GBT$  для отбора признаков. Для прогнозирования трудозатрат разработки программных продуктов рассматривали различные ММО. Модель *Stacked Ensemble* показала высокие значения точности прогнозирования  $PRED(0.25)$ .

В [19] приведено сравнение трёх моделей нечёткой логики для прогнозирования затрат на разработку программного обеспечения: *Mamdani*, *Sugeno* с постоянным выходом и *Sugeno* с линейным выходом. Используются данные промышленных проектов из НД *ISBSG* с 5000 проектами. Эти модели нечёткой логики были сравнены с моделью множественной линейной регрессии и искусственной нейронной сетью с прямой передачей.

В [20] оценены различные модели штабелирования. Для оценки использованы НД *Albrecht*, *China*, *Desharnais*, *Kemerer*, *Kitchenham*, *Maxwell* и *COCOMO81*. Лучшие результаты были получены на модели штабелирования с использованием  $RF$ .

В [21] выполнено сравнение модели экстремальной обучающей машины (*ELM*) с регрессионными моделями: линейная регрессия, многослойный перцептрон, *k*-ближайших соседей, метод опорных векторов. *ELM* показал наилучшие результаты.

В [22] сравнивали восемь алгоритмов ММО на трёх НД: *SCRAIM*, *JIRA*, *Project Control*.

В [23] выполнена оценка трудозатрат для двух НД: *Finnish* и *Maxwell*. Первый этап состоял в нормализации данных, на втором этапе предложена улучшенная версия статического отбора ансамбля, основанная на генетическом алгоритме, на третьем этапе применён динамический отбор ансамбля. Используются метрики: симметричная средняя абсолютная процентная ошибка, средняя относительная ошибка, средняя абсолютная шкалированная ошибка, коэффициент Нэша-Сатклиффа,  $R^2$ .

В [24] для анализа использования ММО для улучшения оценки производительности программного обеспечения использованы НД *ISBSG*, *NASA93*, *COCOMO*, *Maxwell* и *Desharnais*. Для НД с применением метода отбора признаков по коэффициентам корреляции линейная регрессия позволила получить  $R^2=0.77$  для НД *ISBSG* и 1.0 для НД *NASA93*, *COCOMO*, *Maxwell* и *Desharnais*. Метод *RF* для НД *NASA93* и *Desharnais* показал  $R^2$  равный 0.99.

В [25] для создания модели прогнозирования затрат применены различные ММО и метрика *MMRE*.

В [26] использован НД из семи признаков, состоявший из 2000 выборок данных, которые подавались в режиме реального времени. Результаты исследования показали, что метод дерева принятия решений даёт более точные результаты.

В [27] проанализированы восемь ММО на следующих НД: *Albrecht*, *COCOMO81*, *Desharnais*, *China*, *Finnish*, *Maxwell*, *Miyazaki*, *NASA18*, *NASA93*, *Telecom*, *Kitchenham* и *Kemerer*. Выявлено, что методы *RF* и *k*-ближайших соседей превзошли остальные.

В [28] для оценки трудозатрат использованы НД *Albrecht*, *China*, *Desharnais*, *Maxwell*. Алгоритм *RF* обеспечил лучшие результаты по метрикам *MAE*, *MSE*, *RMSE* и  $R^2$ .

В [29] разработана модель штабелирования, основанная на поправочных коэффициентах оптимизации, путём интеграции семи статистических методов и ММО. Точность оценки методов оценивалась с использованием статистических тестов и показателей эффективности на основе четырёх НД, с метриками *SSE*, *MAE*, *RMSE*, *MBRE*, *MIBRE*, *MdMRE* и *PRED(0,25)*. Ансамблевая модель показала лучшие результаты.

В [6] выполнено усреднение по совокупности трёх наиболее эффективных ММО, а в [5] описана оптимизированная модель *RF* путём изменения значений её ключевых параметров.

На основе проведённого обзора ММО, НД и метрик, отбора методов и данных с экспериментальными результатами, которые могут быть полезными в практических целях, наполнена онтология в *Protégé*. Общая графовая схема онтологии представлена на рисунке 6, а её фрагмент – на рисунке 7. На рисунках каждый индивид класса *Experiment* обозначен с использованием сквозной нумерации (например, «\_1», «\_2», «\_11»), названия методов соответствуют их общераспространённым названиям (например, «Random\_forest», «Decision\_trees»), в названиях метрик – общераспространённые обозначения. Фиолетовые сплошные линии со стрелками на схеме указывают на связь индивида с классом (стрелка по направлению к индивиду, например, *Method\_ML* и *Random\_forest*, *Metric\_ML* и *Pred25*). Прерывистые оранжевые линии на схеме указывают на отношения между классами, стрелка указывает направление от субъекта к объекту, на схеме – это связи между *Method\_ML* и *Experiment*, а также *Experiment* и *Metric\_ML*. Синяя линия со стрелкой на схеме – это связь классов с суперклассом *owl:Thing*, который является родительским классом по отношению ко всем классам. Прерывистые серые и оранжевые линии на схеме указывают на связи между индивидами различных классов, заданные через отношения между классами. Например, см. рисунок 7, оранжевая линия между индивидом \_64 класса *Experiment* и индивидом *Random\_forest* класса *Meth-*



Для возможности применения онтологии файл выложен в репозиторий *github*: [https://github.com/TagirM/Ontology\\_methods\\_ML.git](https://github.com/TagirM/Ontology_methods_ML.git).

### 3 Использование онтологии

В данной онтологии можно с помощью *SPARQL*-запроса найти интересующую информацию, например, в виде следующих запросов.

*Какие методы, с какими метриками и их значениями, НД и ссылками на исследования представлены в онтологии?* Пример запроса приведён на рисунке 8. В выводе запроса в первом столбце выведены все методы (на рисунке показана только видимая часть), во втором столбце – эксперименты. В других столбцах в соответствии с запросом, приведённом в верхней части рисунка, указаны все наименования столбцов, стоящие в запросе после ключевого слова *WHERE*: *experiment, data\_set, metric, value\_str, reference*.

*Какой НД использован, какие метрики применялись, какие значения были получены со ссылкой на исследования?* Пример такого запроса представлен на рисунке 9. Для получения информации по определённому методу в запросе добавляется ключевое слово *FILTER*, после которого указывается нужный для вывода метод (на рисунке 9 сделан фильтр по методу *RF*).

*Найти информацию с выводом всех экспериментов, в которых использована определённая метрика оценки результата работы ММО, и её значение находилось в заданном диапазоне.* Пример запроса, где в качестве метрики оценки результата работы ММО использован  $R^2$  со значением больше 0.90, с выводом используемого ММО, НД и ссылки на исследование, представлен на рисунке 10. Для получения данной информации с конкретной метрикой в запросе дважды указывается ключевое слово *FILTER*. После первого ключевого слова *FILTER* указывается необходимая для вывода метрика, после второго – диапазон величины метрики.

SPARQL query: ⏏ ⏏ ⏏

```

PREFIX db: <http://www.semanticweb.org/tagir/ontologies/2025/10/machine-learning-ontology#>

SELECT ?method ?experiment ?data_set ?metric(STR(?value) AS ?value_str) ?reference
WHERE {
?method rdf:type db:Method_ML.
?method db:Has_metric ?experiment.
?experiment db:Data_set ?data_set.
?experiment db:Has_metric_value ?metric.
?experiment db:Value ?value.
?experiment db:Source_DOI ?reference.
}

```

| method                    | experiment | data_set                   | metric | value_str | reference  |
|---------------------------|------------|----------------------------|--------|-----------|--|
| Omni-Ensemble_selection   | _46        | "Maxwell"                  | MASE   | "0.26125" | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.1713111"    |
| Logistic_Regression       | _83        | "Dataset on crowdsourcin   | Pred25 | "72.25"   | "https://doi.org/10.3233/IDA-237361"             |
| Omni-Ensemble_selection   | _47        | "Maxwell"                  | NSE    | "0.95146" | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.1713111"    |
| Averaged_ensemble_model   | _152       | "ISBSG"                    | Pred25 | "69.44"   | "https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.05.001"      |
| Logistic_Regression       | _82        | "Dataset on crowdsourcin   | MdMRE  | "0.049"   | "https://doi.org/10.3233/IDA-237361"             |
| Omni-Ensemble_selection   | _44        | "Maxwell"                  | R2     | "0.98359" | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.1713111"    |
| Random_forest             | _71        | "NASA93, Desharnais"       | R2     | "0.99"    | "https://doi.org/10.18280/isi.28061"             |
| Averaged_ensemble_model   | _153       | "ISBSG"                    | MMRE   | "0.17"    | "https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.05.001"      |
| Artificial_Neural_Network | _7         | "Construction project data | R2     | "0.944"   | "https://doi.org/10.1080/13467581.2017.13467581" |
| Logistic_Regression       | _81        | "Dataset on crowdsourcin   | MMRE   | "0.005"   | "https://doi.org/10.3233/IDA-237361"             |
| Omni-Ensemble_selection   | _45        | "Maxwell"                  | MMRE   | "0.47942" | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.1713111"    |
| Averaged_ensemble_model   | _154       | "ISBSG"                    | MMER   | "0.42"    | "https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.05.001"      |
| Averaged_ensemble_model   | _155       | "ISBSG"                    | MBRE   | "0.2"     | "https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.05.001"      |

Рисунок 8 – *SPARQL*-запрос в *Protégé* с выводом методов и экспериментов

SPARQL query:

```

PREFIX db: <http://www.semanticweb.org/taqip/ontologies/2025/10/machine-learning-ontology#>

SELECT ?method ?experiment ?data_set ?metric(STR(?value) AS ?value_str) ?reference
WHERE {
?method rdfs:type db:Method_ML.
?method db:Has_metric ?experiment.
?experiment db:Data_set ?data_set.
?experiment db:Has_metric_value ?metric.
?experiment db:Value ?value.
?experiment db:Source_DOI ?reference.
FILTER(?method = db:Random_forest)
}
    
```

| method        | experiment | data_set                          | metric | value_str | reference                                   |
|---------------|------------|-----------------------------------|--------|-----------|---|
| Random_forest | _71        | "NASA93, Desharnais"              | R2     | "0.99"    | "https://doi.org/10.18280/isi.280602"       |
| Random_forest | _2         | "Data from the construction orga  | R2     | "0.97"    | "https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad979f"  |
| Random_forest | _120       | "Historical dataset from Software | Pred25 | "1.0"     | "https://doi.org/10.1002/smr.2611"          |
| Random_forest | _121       | "Historical dataset from Software | MdMRE  | "0.013"   | "https://doi.org/10.1002/smr.2611"          |
| Random_forest | _122       | "Historical dataset from Software | MBRE   | "0.011"   | "https://doi.org/10.1002/smr.2611"          |
| Random_forest | _123       | "Historical dataset from Software | MIBRE  | "0.011"   | "https://doi.org/10.1002/smr.2611"          |
| Random_forest | _20        | "COCOMO-81"                       | Pred25 | "92.18"   | "https://doi.org/10.14201/adcaij.31206"     |
| Random_forest | _68        | "Maxwell"                         | sMAPE  | "18.274"  | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.329"   |
| Random_forest | _67        | "Maxwell"                         | NSE    | "0.88611" | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.329"   |
| Random_forest | _66        | "Maxwell"                         | MASE   | "0.32081" | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.329"   |
| Random_forest | _89        | "NASA18"                          | MdMRE  | "0.1140"  | "https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100150" |
| Random_forest | _65        | "Maxwell"                         | MMRE   | "0.69642" | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.329"   |
| Random_forest | _88        | "NASA18"                          | MMER   | "0.1748"  | "https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100150" |

Рисунок 9 – SPARQL-запрос в Protégé с выводом экспериментов при применении метода *Random\_forest*

SPARQL query:

```

PREFIX db: <http://www.semanticweb.org/taqip/ontologies/2025/10/machine-learning-ontology#>

SELECT ?method ?experiment ?data_set ?metric(STR(?value) AS ?value_str) ?reference
WHERE {
?method rdfs:type db:Method_ML.
?method db:Has_metric ?experiment.
?experiment db:Data_set ?data_set.
?experiment db:Has_metric_value ?metric.
?experiment db:Value ?value.
?experiment db:Source_DOI ?reference.
FILTER(?metric = db:R2)
FILTER(?value > 0.9)
}
    
```

| method                     | experiment | data_set                 | metric | value_str | reference                                  |
|----------------------------|------------|--------------------------|--------|-----------|--|
| Gradient_Boosting_Trees    | _8         | "Construction project da | R2     | "0.935"   | "https://doi.org/10.1080/13467581.2023."   |
| Random_forest              | _71        | "NASA93, Desharnais"     | R2     | "0.99"    | "https://doi.org/10.18280/isi.280602"      |
| Omni-Ensemble_selection    | _44        | "Maxwell"                | R2     | "0.98359" | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3"    |
| Linear_Regression          | _102       | "NASA18"                 | R2     | "0.9972"  | "https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10015" |
| Extra_Trees_Regressor      | _41        | "Project Control"        | R2     | "0.96"    | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3"    |
| Stacking_ensemble_model_   | _31        | "China"                  | R2     | "0.984"   | "https://doi.org/10.3390/electronics1010"  |
| eXtreme_Gradient_Boosting  | _43        | "Project Control"        | R2     | "0.96"    | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3"    |
| Particle_Swarm_Optimizator | _1         | "Iraqi government constr | R2     | "0.9940"  | "https://doi.org/10.28991/cej-2020-0309"   |
| Linear_Regression          | _69        | "NASA93, Desharnais"     | R2     | "1.00"    | "https://doi.org/10.18280/isi.280602"      |
| eXtreme_Gradient_Boosting  | _70        | "NASA93, Desharnais"     | R2     | "0.99"    | "https://doi.org/10.18280/isi.280602"      |
| Dynamic_Ensemble_Selectio  | _59        | "Maxwell"                | R2     | "0.9522"  | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3"    |
| Random_forest              | _37        | "Project Control"        | R2     | "0.96"    | "https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3"    |
| Support_vector_regression  | _9         | "Construction project da | R2     | "0.931"   | "https://doi.org/10.1080/13467581.2023."   |

Рисунок 10 – SPARQL-запрос в Protégé с выводом экспериментов, в которых в качестве метрики оценки результата работы метода машинного обучения использован  $R^2 > 0.90$

## Заключение

Для описания ПрО «Прогнозирование трудозатрат и сроков выполнения задач при УП» построена онтология, при разработке которой выполнен анализ и систематизированы различные методы прогнозирования. Разработанная онтология является основой для структурирования исследований, проводимых в области применения ММО, извлечения необходимых пользователям данных и их контекстуализации. Применение результатов исследования может позволить упростить процесс поиска необходимых методов для их использования при прогнозировании трудозатрат и сроков выполнения проектов на основе новых или общедоступных НД.

Разработанная онтология имеет ограничения: не все существующие исследования занесены в базу знаний; не учтены параметры НД, такие как размер данных, количество признаков, форматы признаков (категориальные и числовые); ограниченное количество метрик.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Prasad K.S.N., Vijaya Saradhi M.V.** Comprehensive project management framework using machine learning. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019. Vol.8. Issue 2S3. DOI: 10.35940/ijrte.B1256.0782S319.
- [2] **Santos J.I., Pereda M., Ahedo V., Galán J.M.** Explainable machine learning for project management control. *Computers & Industrial Engineering*. 2023. Vol.180. 109261. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109261.
- [3] **Forouzesht Nejad A.A., Arabikhan F., Aheleroff S.** Optimizing project time and cost prediction using a hybrid XGBoost and simulated annealing algorithm. *Machines*. 2024. №12(12). 867. DOI: 10.3390/machines12120867.
- [4] **Дударин П.В., Тронин В.Г., Святлов К.В.** Подход к оценке трудоёмкости задач в процессе разработки программного обеспечения на основе нейронных сетей. *Автоматизация процессов управления*. 2019. №3(57). С.65–72. DOI: 10.35752/1991-2927-2019-3-57-65-72.
- [5] **Abdelali Z., Mustapha H., Abdelwahed N.** Investigating the use of random forest in software effort estimation. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol.148, P.343-352. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.042.
- [6] **Pospieszny P., Czarnacka-Chrobot B., Kobylinski A.** An effective approach for software project effort and duration estimation with machine learning algorithms. *Journal of Systems and Software*. 2018. Vol.137. P.184-196. DOI: 10.1016/j.jss.2017.11.066.
- [7] **Nassar A.H., Elbisy A.M.** A machine learning approach to predict time delays in marine construction projects. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2024. Vol.14. №5. P.16125–16134. DOI: 10.48084/etasr.8173.
- [8] **Напольских Д.Л.** Представление экономической концепции кластера с помощью специализированной онтологии. *Программные продукты и системы*. 2024. Т.37. №2. С.155–163. DOI: 10.15827/0236-235X.142.155-163.
- [9] **Gruber T.R.** A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993.
- [10] **Исаева О.С.** Построение онтологии для систематизации характеристик сети Интернета вещей. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14. №2(52). С.243-255. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-243-255.
- [11] **Гусенков А.М., Бухараев Н.Р., Бирияльцев Е.В.** Построение онтологии предметной области на основе логической модели данных. *Электронные библиотеки*. 2020. №23(3). С.390-417. DOI: 10.26907/1562-5419-2020-23-3-390-417.
- [12] **Khalaf T.Z., Çağlar H., Çağlar A., Hanoon A.N.** Particle swarm optimization based approach for estimation of costs and duration of construction projects. *Civil Engineering Journal*. 2020. №6(2). P.384–401. DOI: 10.28991/cej-2020-03091478.
- [13] **Soreti M. Liben, Demiss A. Belachew, Walied A. Elsaigh.** Comparing advanced and traditional machine learning algorithms for construction duration prediction: a case study of Addis Ababa's public sector. *Engineering Research Express*. 2024. Vol. 6. № 4. DOI: 10.1088/2631-8695/ad979f.
- [14] **Sklias G., Gkelios S., Dimitriou D., Sartzetaki M., Chatzichristofis S.A.** Synergizing global and local strategies for dynamic project management: An Advanced Machine Learning-Enhanced Framework. *IEEE Access*. 2024. Vol.12. P.85955-85968. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3413890.
- [15] **Zhang S., Xuechun Li.** A comparative study of machine learning regression models for predicting construction duration. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2023. №23(6). DOI: 10.1080/13467581.2023.2278887.

- [16] **Yeom D.J., Seo H.M., Kim Y.J., Cho C.S., Kim Y.** Development of an approximate construction duration prediction model during the project planning phase for general office buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2018. №24(3). P.238-253. DOI: 10.3846/jcem.2018.1646.
- [17] **Israr ur Rehmana, Zulfiqar Alib, Zahoor Jana.** An empirical analysis on software development efforts estimation in machine learning perspective. *Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*. 2021. Vol.10. №3. P.227-240. DOI: 10.14201/ADCAIJ2021103227240.
- [18] **Eswara Rao K., Pydi B., Annan Naidu P., Prasann U.D., Anjaneyulu P.** Ensemble learning approach for effective software development effort estimation with future ranking. *ADCAIJ: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*. 2023. №12(1). e31206. DOI: 10.14201/adcaij.31206.
- [19] **Ali Bou Nassif, Mohammad Azzeq, Ali Idri, Alain Abran.** Software development effort estimation using regression fuzzy models. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2019. 8367214. DOI: 10.1155/2019/8367214.
- [20] **Priya Varshini A.G., Anitha Kumari K., Vijayakumar Varadarajan.** Estimating software development efforts using a random forest-based stacked ensemble approach. *Electronics*. 2021. №10. 1195. DOI: 10.3390/electronics10101195.
- [21] **De Carvalho H.D.P., Fagundes R., Santos W.** Extreme learning machine applied to software development effort estimation. *IEEE Access*. 2021. Vol.9. P.92676-92687. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3091313.
- [22] **Sousa A.O. et al.** Applying machine learning to estimate the effort and duration of individual tasks in software projects. *IEEE Access*. 2023. Vol.11. P.89933-89946. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3307310.
- [23] **Jadhav A., Shandilya S.K., Izonin I., Gregus M.** Effective software effort estimation leveraging machine learning for digital transformation. *IEEE Access*. 2023. Vol.11. P.83523-83536. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3293432.
- [24] **Meharunnisa Saqlain M., Abid M., Awais M., Stević Ž.** Analysis of software effort estimation by machine learning techniques. *Ingénierie des Systèmes d'Information*. 2023. Vol.28. №6. P.1445-1457. DOI: 10.18280/isi.280602.
- [25] **Yasmin A., Haider W., Daud A., Banjar A.** Machine learning based software effort estimation using development-centric features for crowdsourcing platform. *Intelligent Data Analysis*. 2023. №28(1). P.299-329. DOI: 10.3233/IDA-237366.
- [26] **Mizanur Rahman, Partha Protim Roy, Mohammad Ali, Teresa Gonc, alves, Hasan Sarwar.** Software effort estimation using machine learning technique. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2023. №14. DOI: 10.14569/IJACSA.2023.0140491.
- [27] **Akshay Jadhav, Shishir Kumar Shandilya.** Reliable machine learning models for estimating effective software development efforts: A comparative analysis. *Journal of Engineering Research*. 2023. Vol.11. Issue 4. P.362-376. DOI: 10.1016/j.jer.2023.100150.
- [28] **Priya Varshini A.G., Anitha Kumari K., Janani D., Soundariya S.** Comparative analysis of machine learning and deep learning algorithms for software effort estimation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1767. №1. DOI: 10.1088/1742-6596/1767/1/012019.
- [29] **Nhung H.L.T.K., Van Hai V., Silhavy P., Prokopova Z., Silhavy R.** Incorporating statistical and machine learning techniques into the optimization of correction factors for software development effort estimation. *J Softw Evol Proc*. 2024. №6(5). e2611. DOI: 10.1002/smr.2611.

## Сведения об авторах



**Мурзагалеев Тагир Муратович**, 1985 г. рождения. Окончил Томский политехнический университет (2008), к.х.н. (2012). Главный инженер проектов в ООО «РН-Проектирование Добыча» в области управления проектами и автоматизации процессов управления проектами. С 2024 года аспирант СПбГЭТУ «ЛЭТИ», по специальности «Искусственный интеллект и машинное обучение». ORCID: 0009-0004-1166-9487 [tmurzagaleev@yandex.ru](mailto:tmurzagaleev@yandex.ru). ✉.

**Жукова Наталия Александровна**, 1983 г. рождения. Окончила СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2006), к.т.н. (2008). Ведущий научный сотрудник СПб ФИЦ РАН, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Соавтор более 75 научных работ в области адаптивных измерительных процессов, интеллектуальных методов и алгоритмов анализа и оценки данных, технологий синтеза информации и знаний, обработки больших данных. ORCID: 0000-0001-5877-4461; Author ID (Scopus): 56406142300; Researcher ID (WoS): K-9143-2018. [nazhukova@mail.ru](mailto:nazhukova@mail.ru).



Поступила в редакцию 28.02.2026, после рецензирования 11.05.2026. Принята к публикации 26.05.2026.



# Ontology of machine learning methods in project management

© 2026, T.M. Murzagaleev<sup>1,2</sup>✉, N.A. Zhukova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin) (ETU "LETI"), Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Limited Liability Company "RN-Proektirovanie Dobycha", Tomsk, Russia

<sup>3</sup> Federal State Budgetary Institution of Science "Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences", Saint Petersburg, Russia

## Abstract

The application of machine learning methods in project management offers a number of potential advantages that can contribute to improving project management processes. Effective use of machine learning methods requires the identification of the most informative performance metrics while taking into account the diversity of available datasets, which in turn necessitates the structuring and systematization of project management elements. The aim of this study is to develop an ontology that provides the information necessary for the application of machine learning methods in project management, particularly for forecasting project effort and completion time. A review of machine learning methods, evaluation metrics, and datasets reported in scientific publications was conducted. Based on the results of this review, an ontology structure was developed and described for the application of machine learning methods in project management for effort estimation and project schedule forecasting. In addition, a scheme of user interaction with the ontology is presented. The results of the study may facilitate the process of identifying appropriate machine learning methods for project management tasks using new or publicly available datasets.

**Keywords:** ontology, project management, project schedule forecasting, project effort estimation, machine learning methods, dataset.

**For citation:** Murzagaleev T.M., Zhukova N.A. Ontology of machine learning methods in project management [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 300-313. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-300-313.

**Financial Support:** This work was supported by the state budget, project No. FFZF-2025-0019.

**Authors' contributions:** Murzagaleev T.M. – source selection and analysis, ontology development; Zhukova N.A. – article structure development, scientific supervision, final conclusions.

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

## List of figures and tables

Figure 1 – Representation of the class hierarchy in the Protégé editor

Figure 2 – Definition of "Object properties" in the Protégé editor using the example of "Has\_metric"

Figure 3 – Individuals of the "Method\_ML" class in the Protégé editor

Figure 4 – Data properties of the "Experiment" class in the Protégé editor

Figure 5 – Fragment of the graph describing classes, instances, and their relationships within the domain

Figure 6 – General graph representation of the ontology in Protégé

Figure 7 – Fragment of the ontology graph in Protégé

Figure 8 – SPARQL query in Protégé displaying methods and experiments

Figure 9 – SPARQL query in Protégé displaying experiments using the Random\_forest method

Figure 10 – SPARQL query in Protégé displaying experiments in which  $R2 > 0.90$  was used as the evaluation metric for machine learning model performance

Table 1 – Relationships between ontology classes through Object properties

Table 2 – Data properties of ontology class individuals

## References

- [1] **Kalli Srinivasa Nageswara Prasad, Vijaya Saradhi MV.** Comprehensive project management framework using machine learning. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019; 8(2S3). DOI: 10.35940/ijrte.B1256.0782S319.
- [2] **José Ignacio Santos, María Pereda, Virginia Ahedo, José Manuel Galán.** Explainable machine learning for project management control. *Computers & Industrial Engineering*. 2023; 180: 109261. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109261.
- [3] **Forouzesh Nejad AA, Arabikhan F, Aheleroff S.** Optimizing project time and cost prediction using a hybrid XGBoost and simulated annealing algorithm. *Machines*. 2024; 12: 867. DOI: 10.3390/machines12120867.
- [4] **Dudarin PV, Tronin VG, Svyatov KV.** An approach to labor intensity evaluation in software development process based on neural networks [In Russian]. *Automation of control processes*. 2019; 3(57): 65–72. DOI: 10.35752/1991-2927-2019-3-57-65-72.
- [5] **Zakrani Abdelali, Hain Mustapha, Namir Abdelwahed.** Investigating the use of random forest in software effort estimation. *Procedia Computer Science*. 2019: 148: 343-352. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.042.
- [6] **Przemyslaw Pospieszny, Beata Czarnacka-Chrobot, Andrzej Kobylinski.** An effective approach for software project effort and duration estimation with machine learning algorithms. *Journal of Systems and Software*. 2018: 137: 184-196. DOI: 10.1016/j.jss.2017.11.066.
- [7] **Nassar AH, Elbisy AM.** A machine learning approach to predict time delays in marine construction projects. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2024; 14(5): 16125–16134. DOI: 10.48084/etasr.8173.
- [8] **Napolskikh DL.** Developing a specialized ontology to represent the economic concept of a cluster [In Russian]. *Software products and systems*. 2024; 37(2): 155–163. DOI: 10.15827/0236-235X.142.155-163.
- [9] **Gruber TR.** A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 1993.
- [10] **Isaeva OS.** Building an ontology to systematize the characteristics of the Internet of Things network [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2024; 14 (2): 243-255. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-243-255.
- [11] **Gusenkov AM, Bukharaev NR, Biryaltsev EV.** Building subject domain ontology on the base of a logical data model [In Russian]. *Electronic libraries*. 2020; 23(3): 390-417. DOI: 10.26907/1562-5419-2020-23-3-390-417.
- [12] **Khalaf TZ, Çağlar H, Çağlar A, Hanoon AN.** Particle swarm optimization based approach for estimation of costs and duration of construction projects. *Civil Engineering Journal*. 2020; 6(2): 384–401. DOI: 10.28991/cej-2020-03091478.
- [13] **Soreti M. Liben, Demiss A. Belachew, Walied A. Elsaigh.** Comparing advanced and traditional machine learning algorithms for construction duration prediction: a case study of Addis Ababa's public sector. *Engineering Research Express*. 2024; 6(4): DOI: 10.1088/2631-8695/ad979f.
- [14] **Sklias G, Gkelios S, Dimitriou D, Sartzetaki M, Chatzichristofis SA.** Synergizing global and local strategies for dynamic project management: An Advanced Machine Learning-Enhanced Framework. *IEEE Access*. 2024; 12: 85955-85968. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3413890.
- [15] **Shen Zhang, Xuechun Li.** A comparative study of machine learning regression models for predicting construction duration. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2023; 23(6). DOI: 10.1080/13467581.2023.2278887.
- [16] **Yeom DJ, Seo HM, Kim YJ, Cho CS, Kim Y.** Development of an approximate construction duration prediction model during the project planning phase for general office buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2018; 24(3): 238-253. DOI: 10.3846/jcem.2018.1646.
- [17] **Israr ur Rehmana, Zulfiqar Alib, Zahoor Jana.** An empirical analysis on software development efforts estimation in machine learning perspective. *Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*. 2021; 10(3): 227-240. DOI: 10.14201/ADCAIJ2021103227240.
- [18] **Eswara Rao K, Pydi B, Annan Naidu P, Prasann UD, Anjaneyulu P.** Ensemble learning approach for effective software development effort estimation with future ranking. *ADCAIJ: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*. 2023; 12(1): e31206. DOI: 10.14201/adcaij.31206.
- [19] **Ali Bou Nassif, Mohammad Azzeh, Ali Idri, Alain Abran.** Software development effort estimation using regression fuzzy models. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2019: 8367214. DOI: 10.1155/2019/8367214.
- [20] **Priya Varshini AG, Anitha Kumari K, Varadarajan Vijayakumar.** Estimating software development efforts using a random forest-based stacked ensemble approach. *Electronics*. 2021; 10: 1195. DOI: 10.3390/electronics10101195.
- [21] **De Carvalho HDP, Fagundes R, Santos W.** Extreme learning machine applied to software development effort estimation. *IEEE Access*. 2021; 9: 92676-92687. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3091313.
- [22] **Sousa A.O. et al.** Applying machine learning to estimate the effort and duration of individual tasks in software projects. *IEEE Access*. 2023; 11: 89933-89946. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3307310.

- [23] **Jadhav A, Shandilya SK, Izonin I, Gregus M.** Effective software effort estimation leveraging machine learning for digital transformation. *IEEE Access*. 2023; 11: 83523-83536. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3293432.
- [24] **Meharunnisa Saqlain M, Abid M, Awais M, Stević Ž.** Analysis of software effort estimation by machine learning techniques. *Ingénierie des Systèmes d'Information*. 2023; 28(6): 1445-1457. DOI: 10.18280/isi.280602.
- [25] **Yasmin A, Haider W, Daud A, Banjar A.** Machine learning based software effort estimation using development-centric features for crowdsourcing platform. *Intelligent Data Analysis*. 2023; 28(1): 299-329. DOI: 10.3233/IDA-237366.
- [26] **Mizanur Rahman, Partha Protim Roy, Mohammad Ali, Teresa Gonc, Hasan Sarwar.** Software effort estimation using machine learning technique. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2023; 14. DOI: 10.14569/IJACSA.2023.0140491.
- [27] **Akshay Jadhav, Shishir Kumar Shandilya.** Reliable machine learning models for estimating effective software development efforts: A comparative analysis. *Journal of Engineering Research*. 2023; 11(4): 362-376. DOI: 10.1016/j.jer.2023.100150.
- [28] **Priya Varshini A.G., Anitha Kumari K, Janani D, Soundariya S.** Comparative analysis of machine learning and deep learning algorithms for software effort estimation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1767(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1767/1/012019.
- [29] **Nhung HLTK, Van Hai V, Silhavy P, Prokopova Z, Silhavy R.** Incorporating statistical and machine learning techniques into the optimization of correction factors for software development effort estimation. *J Softw Evol Proc*. 2024; 6(5): e2611. DOI: 10.1002/smr.2611.
- 

## About the authors

**Tagir Muratovich Murzagaleev** (b. 1985) graduated from Tomsk Polytechnic University in 2008; Candidate of Chemical Sciences (2012). Chief Project Engineer at RN-Project Development and Production LLC, specializing in project management and the automation of project management processes. Since 2024, he has been a PhD student at Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” in the field of Artificial Intelligence and Machine Learning. ORCID: 0009-0004-1166-9487. [tmurzagaleev@yandex.ru](mailto:tmurzagaleev@yandex.ru). ✉.

**Natalia Alexandrovna Zhukova** (b. 1983) graduated from Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” in 2006; Candidate of Technical Sciences (2008). Leading Researcher at St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences and Associate Professor at Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”. Co-author of more than 75 scientific publications in the fields of adaptive measurement processes, intelligent methods and algorithms for data analysis and evaluation, information and knowledge synthesis technologies, and big data processing. ORCID: 0000-0001-5877-4461; Author ID (Scopus): 56406142300; Researcher ID (WoS): K-9143-2018. [nazhukova@mail.ru](mailto:nazhukova@mail.ru).

---

Received February 28, 2026. Revised May 11, 2026. Accepted May 26, 2026.

---

## МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.94:519.714

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-314-326



### Проектирование конфигурации оборудования производственного участка на основе генетического алгоритма

© 2026, А.И. Сергеев ✉, С.А. Гуньков

Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, Оренбург, Россия

#### Аннотация

Предложен подход к оптимизации конфигурации оборудования, основанный на интеграции генетического алгоритма с имитационной моделью производственного участка. Представлена онтология предметной области, формализующая ключевые сущности производственного участка и их взаимосвязи, что обеспечивает концептуальную основу построения модели и интерпретации результатов. Особенность алгоритма – структура хромосомы в виде двухмерного массива, включающего параметры оборудования: скорость перемещения, временные характеристики операций, ёмкость накопителей робокаров, станков и манипуляторов. Для оценки проектных решений разработана функция приспособленности, объединяющая нормализованные критерии простоев и стоимости оборудования с возможностью гибкой настройки приоритетов через весовые коэффициенты. Для прогнозирования рыночной стоимости оборудования, нелинейно зависящей от его технических характеристик, использована экспертная система на базе алгоритма случайного леса. Архитектура программного комплекса, реализующего предложенный подход, включает этапы отбора, скрещивания и формирования новых поколений. Разработанное программное обеспечение позволяет находить оптимальные конфигурации оборудования по критериям производительности и стоимости в изменяющихся производственных условиях. Приводится пример оптимизации конфигурации оборудования производственного участка.

**Ключевые слова:** матричный генетический алгоритм, компьютерное моделирование, оптимизация, алгоритм случайного леса, производственный процесс, конфигурация оборудования.

**Цитирование:** Сергеев А.И., Гуньков С.А. Проектирование конфигурации оборудования производственного участка на основе генетического алгоритма. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С. 314-326. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-314-326.

**Финансирование:** исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-01405, <https://rscf.ru/project/25-29-01405>.

**Вклад авторов:** Сергеев А.И. – разработка концепции и плана исследования; Гуньков С.А. – разработка алгоритмов и программная реализация, проведение вычислительных экспериментов.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Введение. Цель и задачи работ

Планирование и оптимизация производственных процессов на современных предприятиях относятся к классу *NP*-трудных, многокритериальных задач. Традиционные методы математического программирования в таких условиях оказываются недостаточно эффективными, что стимулирует развитие и применение эволюционных методов, в частности, генетических алгоритмов (ГА), позволяющих учитывать широкий спектр факторов.

Цель статьи – разработка и апробация подхода к проектированию конфигурации оборудования на основе интеграции онтологического моделирования, матричного ГА и имитаци-

онной модели производственного участка (ПУ), обеспечивающего сокращение простоев оборудования и его стоимости.

В [1, 2] показано применение имитационного подхода для анализа технологических комплексов. Систематизация инструментов для этих целей представлена в [3]. Принципы работы ГА, их архитектура и операторы изложены в [4]. Развитие ГА идёт по пути адаптации их операторов к особенностям предметных областей (ПрО). Так, в [5] исследуется использование генетического оператора старения для борьбы с преждевременной сходимостью. В [6] рассматриваются модели ГА для оптимизации гиперпараметров нейронных сетей, а в [7] показано их применение для топологической оптимизации электрических машин. В [8] представлен ГА для синтеза технических параметров оборудования, а в [9] эта тема расширена до масштаба производственных систем. Подход в [10] фокусируется на применении ГА для оперативного планирования с учётом временных ограничений.

Одним из подходов является совместное использование ГА и имитационного моделирования [11]. Интеграция с оптимизационными алгоритмами, среди которых ГА наиболее распространены, отмечается как вектор развития цифровых двойников (ЦД) [12].

В [13] предлагается гибридный подход, сочетающий глубокое обучение для трёхмерного распознавания объектов и семантическое моделирование на основе онтологий. В [14] рассматривается сопряжение данных и моделей в рамках ЦД, где онтология описывает структуру данных, параметры моделей, а также динамические связи между ними, что позволяет унифицировать обмен информацией на семантическом уровне. Онтология используется как связующее звено между разнородными источниками данных (сенсоры, системы управления, исторические записи) и различными видами моделей (геометрические, физические, поведенческие). Поддержание актуальности ЦД в условиях динамически изменяющейся производственной среды рассмотрено в [15], где онтологическая модель описывает структуру сборочного цеха и позволяет поддерживать её изменения во времени. Разработанная онтология включает классы для элементов цеха (оборудование, оснастка, продукция, операции), а также отношения, фиксирующие временные интервалы.

В [16] разработан онтологический словарь, который систематизирует термины, атрибуты, параметры процессов и их взаимосвязи в данной ПрО. Словарь позволяет унифицировать описание производственных ресурсов (станки, оснастка, материалы, заказы) и обеспечить бесшовный обмен данными между различными системами планирования и ЦД.

В [17] онтология используется для семантического описания структуры оборудования, истории отказов, параметров состояния, а также доступных ремонтных воздействий и ресурсов. Разработанная система поддержки принятия решений на основе правил и онтологического вывода позволяет формировать рекомендации по времени и типу обслуживания, учитывая текущую загрузку производства и приоритеты.

На основе приведённого обзора выделены идеи и методы, которые нашли применение при разработке программного комплекса проектирования конфигурации оборудования ПУ: для формализации связей между параметрами оборудования и показателями эффективности применён подход к сопряжению данных и моделей в ЦД на основе онтологии [14]; задание границ изменения параметров в ГА позволяет осуществить онтологическое моделирование эволюции состояний ПУ [15]; при разработке онтологии ПУ использованы принципы семантического описания производственных ресурсов [16, 17].

В работе поставлена следующая проектная задача: определить оптимальную конфигурацию оборудования ПУ (значения скоростей, ускорений, времени погрузки/разгрузки, ёмкости накопителей для станков, робокаров и манипуляторов), которая обеспечит минимизацию критерия, объединяющего оценку простоев оборудования и его стоимости.

## 1 Онтология производственного участка

Онтология ПУ определяет его сущности, их атрибуты и отношения, обеспечивая единый понятийный аппарат и структурную основу для конфигурирования имитационной модели ПУ, задания пространства поиска и границ параметров для ГА, интерпретации результатов оптимизации в терминах ПрО. Онтология включает следующие основные классы и их взаимосвязи.

*Сменное задание* – набор деталей, определяемых на основе параметров технологических процессов, связывает деталь с «Плановым объёмом» производства за одну смену;

*Деталь* – класс, представляющий производимое изделие, связан отношениями:

- имеет «Тип\_детали», определяет технологическую группу;
- включается в «Сменное задание», характеризуется «Временем изготовления»;

*Технологический процесс* определяет маршруты обработки деталей, включенных в сменное задание, связан отношениями:

- имеет «Маршрут обработки», задаёт последовательность выполнения операций и технологическое оборудование, на котором будет производиться обработка;
- включается в «Деталь», характеризуется «Длительностью операции» на каждом этапе обработки;

*Оборудование* – абстрактный класс, конкретизируемый через дочерние классы:

- «Станок» характеризуется атрибутами «Тип станка» (например, токарный, фрезерный) и «Скорость смены заготовки», является параметром, влияющим на простои;
- «Робокар» характеризуется атрибутом «Скорость движения», обеспечивает транспортировку деталей между станками, влияет на общее время цикла и возникновение простоев;
- «Манипулятор» характеризуется атрибутом «Скорость подачи», обеспечивает загрузку/разгрузку станков, влияет на вспомогательное время операций.

*Производственный показатель* – класс, объединяющий метрики ПУ. Включает следующие свойства и размерности данных:

- «Время изготовления» – показатель (мин), зависящий от параметров оборудования;
- «Стоимость» – рыночная стоимость оборудования (руб.);
- «Простои» – суммарное время простоев (мин).

*Модель* – класс, описывающий процесс управления ПУ.

Все классы оборудования связаны отношением «Имеет параметры», которые являются целевыми переменными для ГА.

Для формального описания каждый класс онтологии наделён набором атрибутов, характеризующих его свойства. Ключевые атрибуты классов онтологии представлены в таблице 1.

*Примеры конкретных значений экземпляров классов онтологии.*

*Станок:* токарный\_станок\_1: тип\_станка = «токарный»; скорость\_смены\_заготовки = 34 с; количество\_ячеек\_накопителя = 10 шт.

*Робокар:* робокар\_транспортный\_2: скорость\_движения = 1,8 м/с; ускорение = 0,8 м/с<sup>2</sup>; торможение = 0,8 м/с<sup>2</sup>.

*Манипулятор:* манипулятор\_загрузочный\_А: время\_погрузки = 40 с; время\_разгрузки = 35 с; количество\_схватов = 2 шт.

*Деталь:* вал\_приводной: тип\_детали = «вал»; время\_изготовления = 185 с.

*Сменное задание:* задание\_смены: плановый\_объём = 150 шт.; связано с деталями вал\_приводной, корпус.

Данные экземпляры показывают, каким образом классы онтологии наполняются конкретными значениями, которые в дальнейшем используются ГА в качестве генов хромосом (для оборудования) либо как входные условия и целевые показатели (для деталей и заданий).

Разработанная онтология реализована на языке *OWL 2* в редакторе *Protégé*.

*Пример основных аксиом онтологии.*

*Иерархия классов:* Станок  $\sqsubseteq$  Оборудование; Робокар  $\sqsubseteq$  Оборудование; Манипулятор  $\sqsubseteq$  Оборудование; ТокарныйСтанок  $\sqsubseteq$  Станок; ФрезерныйСтанок  $\sqsubseteq$  Станок.

*Ограничения на свойства:* Скорость\_движения только xsd:float [ $\geq 0.0$ ]; Ускорение только xsd:float [ $\geq 0.0$ ]; Торможение только xsd:float [ $\leq 0.0$ ]; Тип\_станка только {токарный, фрезерный, сверлильный}.

*Объектные свойства:* обслуживает\_станок (домен: Манипулятор); транспортирует\_деталь (домен: Робокар); имеет\_в\_составе один Манипулятор (для производственной ячейки).

Таблица 1 – Атрибуты классов онтологии

| Класс                   | Атрибут                     | Диапазон / допустимые значения      | Ед. изм.         | Связь с генетическим алгоритмом |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Станок                  | Скорость смены заготовки    | 15–60                               | с                | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Минимальное отклонение      | 1–15                                | %                | Параметр устойчивости           |
|                         | Максимальное отклонение     | 3–22                                | %                | Параметр устойчивости           |
|                         | Количество ячеек накопителя | 2–20                                | шт.              | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Тип_станка                  | {токарный, фрезерный, шлифовальный} | —                | Ограничивающее условие          |
| Робокар                 | Скорость_движения           | 0.5–3.0                             | м/с              | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Отклонение скорости         | 1–25                                | %                | Параметр устойчивости           |
|                         | Ускорение                   | 0.5–2.0                             | м/с <sup>2</sup> | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Отклонение ускорения        | 1–23                                | %                | Параметр устойчивости           |
|                         | Торможение                  | 0.5–2.5                             | м/с <sup>2</sup> | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Отклонение торможения       | 1–24                                | %                | Параметр устойчивости           |
|                         | Время погрузки              | 20–60                               | с                | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Время разгрузки             | 15–55                               | с                | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Количество ячеек накопителя | 1–6                                 | шт.              | Целевой параметр (ген)          |
| Манипулятор             | Время погрузки              | 18–42                               | с                | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Отклонение погрузки         | 1–48                                | %                | Параметр устойчивости           |
|                         | Время разгрузки             | 18–42                               | с                | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Отклонение разгрузки        | 2–50                                | %                | Параметр устойчивости           |
|                         | Количество ячеек накопителя | 5–40                                | шт.              | Целевой параметр (ген)          |
|                         | Количество схватов          | 1–4                                 | шт.              | Целевой параметр (ген)          |
| Деталь                  | Тип_детали                  | {вал, шестерня, корпус}             | —                | Входное условие                 |
|                         | Время_изготовления          | вычисляется моделью                 | мин              | Целевой показатель              |
| Сменное задание         | Плановый_объём              | 50–500                              | шт.              | Входное условие                 |
| Технологический процесс | Маршрут_обработки           | [1..100]                            | —                | Входное условие                 |
|                         | Длительность_операции       | [1..100]                            | —                | Входное условие                 |

Такая формализация обеспечивает однозначную интерпретацию терминов ПрО, возможность автоматической проверки непротиворечивости модели, формирует основу для генерации пространства поиска ГА с учётом всех ограничений ПрО.

Онтология интегрирована с ГА следующим образом:

- на этапе запуска ГА задаются границы допустимых значений параметров (ограничение пространства поиска) в соответствии с атрибутами и ограничениями из таблицы 1;
- в процессе работы ГА проверяется согласованность решений (например, наличие всех необходимых связей между единицами оборудования);
- при выводе результатов обеспечивается их интерпретация в терминах ПрО (формирование описания параметров конкретных станков, робокаров и манипуляторов).

На основе разработанной онтологии формируется пространство поиска: для каждого класса оборудования («Станок», «Робокар», «Манипулятор») задаётся набор генов (свойств данных из таблицы 1), а объектные свойства («Влияет\_на», «Формирует\_состав\_работ») определяют структуру целевой функции. В отличие от известных ГА [4, 18], в данной работе предложены следующие дополнения, обусловленные особенностями проектной задачи:

- матричное представление хромосомы в виде двухмерного массива, где строки соответствуют типам оборудования, а столбцы – конкретным параметрам;
- нормализованная функция приспособленности – значения целевой функции для каждой особи вычисляются относительно базового (эталонного) решения (исходной конфигурации ПУ до оптимизации); это позволяет интерпретировать результат в терминах улучшения: значение меньше 1 означает, что решение лучше базового, больше 1 – хуже, равно 1 – эквивалентно;
- интеграция с экспертной системой на основе алгоритма случайного леса для прогнозирования рыночной стоимости оборудования;
- использование кроссовера [18], адаптированного для вещественного кодирования параметров, что обеспечивает плавное изменение их значений и поиск в непрерывном пространстве.

Базовая архитектура ГА взята из работы [4], кроссовер – из работы [18]. Авторским вкладом является адаптация ГА к матричному представлению и его интеграция с имитационной моделью ПУ на основе предложенной онтологии.

## 2 Описание работы генетического алгоритма

В основе разрабатываемого ГА лежит представление решения в виде двухмерного массива. Каждая ячейка такого массива соответствует конкретному значению параметра, а массив в целом представляет полный набор оптимизируемых параметров ПУ.

Выбор исходной популяции ГА для оптимизации выполняется путём случайного определения значений изменяемых параметров в заданной области. Хромосомы алгоритма представляют собой совокупность параметров. Набор хромосом, составляющих популяцию, можно представить в виде:

$$H^0 = \begin{bmatrix} h_1^0 \{ v_{wi}; a_{wp}; -a_{wp}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; q_{pl}; t_{in}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; v_{wr} \} \\ h_2^0 \{ v_{wi}; a_{wp}; -a_{wp}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; q_{pl}; t_{in}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; v_{wr} \} \\ \dots \\ h_i^0 \{ v_{wi}; a_{wp}; -a_{wp}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; q_{pl}; t_{in}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; v_{wr} \} \end{bmatrix}, \text{ при } i = 1 \dots N_h \quad (1)$$

где  $h_i^0$  –  $i$ -я хромосома популяции, содержащая параметры (гены) ПУ начального поколения работы ГА;  $N_h$  – число хромосом в популяции (принято равным 100), ед.; параметры, определяемые в ГА, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры, определяемые генетическим алгоритмом

| Параметр                           | Обозначение | Оборудование | Параметр                           | Обозначение | Оборудование |
|------------------------------------|-------------|--------------|------------------------------------|-------------|--------------|
| Скорость перемещения, м/с          | $v_{wi}$    | Робочар      | Количество ячеек в накопителе, шт. | $q_{pl}$    | Станок       |
| Ускорение, м/сек <sup>2</sup>      | $a_{wp}$    |              | Время смены заготовок, с           | $t_{in}$    |              |
| Торможение, м/сек <sup>2</sup>     | $-a_{wp}$   |              | Время погрузки, с                  | $t_{cp}$    | Манипулятор  |
| Время погрузки, с                  | $t_{cp}$    |              | Время разгрузки, с                 | $t_{dp}$    |              |
| Время разгрузки, с                 | $t_{dp}$    |              | Количество ячеек в накопителе, шт. | $q_{tp}$    |              |
| Количество ячеек в накопителе, шт. | $q_{tp}$    |              | Количество схватов, шт.            | $v_{wr}$    |              |

Ключевым показателем для работы ПУ является соотношение эффективности и стоимости. В данной работе под эффективностью понимается степень реализации производственного потенциала, которая зависит от использования рабочего времени в условиях производства продукции с заданным уровнем качества. Стоимость рассматривается как объем инвестиций в оборудование, необходимый для обеспечения заданного уровня технической готовности.

Для объединения критериев, имеющих разные единицы измерения (время и деньги), их необходимо привести к сопоставимому виду. Используется нормализация относительно базового решения, в качестве которого принимается исходная конфигурация ПУ.

Пусть:  $Cost_{base}$  – стоимость оборудования в базовом решении (руб.);  $Down_{base}$  – суммарное время простоев в базовом решении (мин). Вводится защита от нулевых значений ( $\epsilon = 10^{-9}$ ):

$$Cost_{base}^{safe} = \max(Cost_{base}, \epsilon), Down_{base}^{safe} = \max(Down_{base}, \epsilon), \quad (2)$$

Тогда для  $i$ -й особи (варианта конфигурации) с фактической стоимостью  $Cost_i$  и фактическими простоями  $Down_i$  вычисляются нормированные показатели:

$$r_{Cost,i} = \frac{Cost_i}{Cost_{base}^{safe}}, r_{Down,i} = \frac{Down_i}{Down_{base}^{safe}}. \quad (3)$$

Целевая функция формируется как взвешенная сумма:

$$J_i = W_{Cost} \cdot r_{Cost,i} + W_{Down} \cdot r_{Down,i} \quad (4)$$

где  $W_{cost}$  и  $W_{down}$  – весовые коэффициенты, задаваемые пользователем и удовлетворяющие условиям:  $W_{cost} \geq 0, W_{down} \geq 0, W_{cost} + W_{down} = 1$ .

Значение целевой функции интерпретируется следующим образом:  $J_i < 1$  – решение лучше базового;  $J_i = 1$  – решение эквивалентно базовому;  $J_i > 1$  – решение хуже базового. Значение функции приспособленности  $J_i$ , близкое к нулю, свидетельствует об идеально функционирующем объекте с минимальными простоями и приемлемыми затратами. Значения больше единицы характеризуют нежелательные варианты с высокими расходами и несогласованной работой оборудования.

Предложенный подход обеспечивает сопоставимость значений целевой функции на любых итерациях алгоритма благодаря фиксированной базе, что позволяет оценивать прогресс оптимизации. Результаты выражаются в терминах улучшения относительно исходной конфигурации (что делает их интуитивно понятными для лица, принимающего решения).

### 3 Применение генетического алгоритма

Общая структура и последовательность операций разработанного ГА представлены на рисунке 1. В ГА реализуется известная эволюционная схема, адаптированная для работы с двумерным представлением особей.

Работа ГА начинается с задания входных параметров: вероятностей генетических операторов, размера популяции и параметров ПУ. На этапе «Задание начальной популяции» формируется множество решений, где каждая особь (хромосома) представляет собой вектор значений оптимизируемых параметров ПУ.

Далее выполняется основной эволюционный цикл, который включает следующую последовательность генетических операторов.

1) *Отбор* – процедура выбора родительских особей для последующего скрещивания на основе значения их функции приспособленности. Приме-



Рисунок 1 – Схема генетического алгоритма параметрического синтеза

няется турнирный метод, обеспечивающий баланс между селективным давлением и поддержанием генетического разнообразия популяции.

- 2) *Скращивание* – операция рекомбинации генетического материала родительских особей с использованием кроссовера [18], который имитирует односточный кроссовер для вещественного кодирования.
- 3) *Формирование новой популяции* – объединение родителей и потомков с последующим отбором наиболее приспособленных особей для следующего поколения.

После формирования новой популяции выполняется проверка критерия останова. Критерием служит либо достижение заданного числа поколений, либо выполнение условия по минимальному значению целевой функции, либо достижение заданной разности между значениями целевой функции на предыдущей и текущей итерациях. Расчёт выполняется с использованием имитационной модели производственного процесса, которая оценивает эффективность каждой особи.

Если критерий останова не достигнут, происходит возврат к началу цикла для продолжения эволюционного процесса. Если критерий выполнен, формируется набор оптимальных параметров производственного оборудования, обеспечивающий минимальное значение целевой функции.

Для определения стоимости оборудования используется регрессионная модель на основе алгоритма случайного леса. Модель обучена на выборке, включающей данные более 500 моделей оборудования с известными техническими характеристиками и рыночной стоимостью (цены производителей<sup>1</sup>, аналитические обзоры<sup>2</sup>). Для оценки точности прогнозов использовалась тестовая выборка (20 % данных).

Критерий оценки простоев рассчитывается на основе временных характеристик работы оборудования.

*Пример.* На рисунке 2 представлены результаты моделирования ПУ с параметрами оборудования, заданными по умолчанию (базовое решение).

Для каждой единицы оборудования отображаются значения времени обработки, простоев и ожидания, а также итоговые показатели: общий коэффициент загрузки 61,45 %, общая стоимость оборудования – 78 510 000 руб. Продолжительность смены в базовом сценарии – 861,53 мин.

Загрузка оборудования по сменам для базового решения показана на рисунке 3. Можно отметить неравномерность загрузки единиц оборудования и наличие значительных простоев.

Для поиска оптимальной конфигурации применён разработанный ГА. На рисунке 4 показаны результаты моделирования для лучшего найденного решения после 100 поколений оптимизации. Весовые коэффициенты целевой функции были приняты равными  $W_{\text{cost}} = 0,5$  и  $W_{\text{down}} = 0,5$ . Время смены в оптимизированном сценарии сократилось до 510,70 мин. Достигнутые показатели: общий коэффициент загрузки 90,86 %; общая стоимость оборудования 50 909 699 руб.

Загрузка оборудования по сменам для оптимизированной конфигурации представлена на рисунке 5. Видно существенное снижение доли простоев и ожидания по сравнению с базовым сценарием.

Сравнение базового и оптимизированного решений приведено в таблице 3. Как видно из таблицы 3, применение ГА позволило повысить загрузку оборудования почти на 48 % при одновременном снижении стоимости оборудования более чем на треть. Время выполнения

<sup>1</sup> Металлообрабатывающее оборудование: станки с ЧПУ. Официальный сайт компании «Промойл». <https://promoil.com/>.  
Каталоги станков и кузнечно-прессового оборудования металлорежущие станки, кузнечно-прессовое оборудование, деревообрабатывающее оборудование. Официальный сайт компании «Рубикон». <https://stanki-katalog.ru>.

<sup>2</sup> Ярмушевская В.Н. Металлорежущие станки: номенклатурный каталог. ВНИИТЭМР. М.: Каталог, 2005. 154 с.  
JET Tools. Станки с ЧПУ // Официальный сайт JET Tools Россия. <https://www.jettools.ru/catalog/stanki-s-chpu/>.

смены сократилось на 40 %, что отражает рост производительности ПУ. Значение целевой функции  $J$  уменьшилось с 1,00 (базовый уровень) до 0,72, что свидетельствует о существенном улучшении интегрального показателя эффективности с учётом заданных приоритетов.

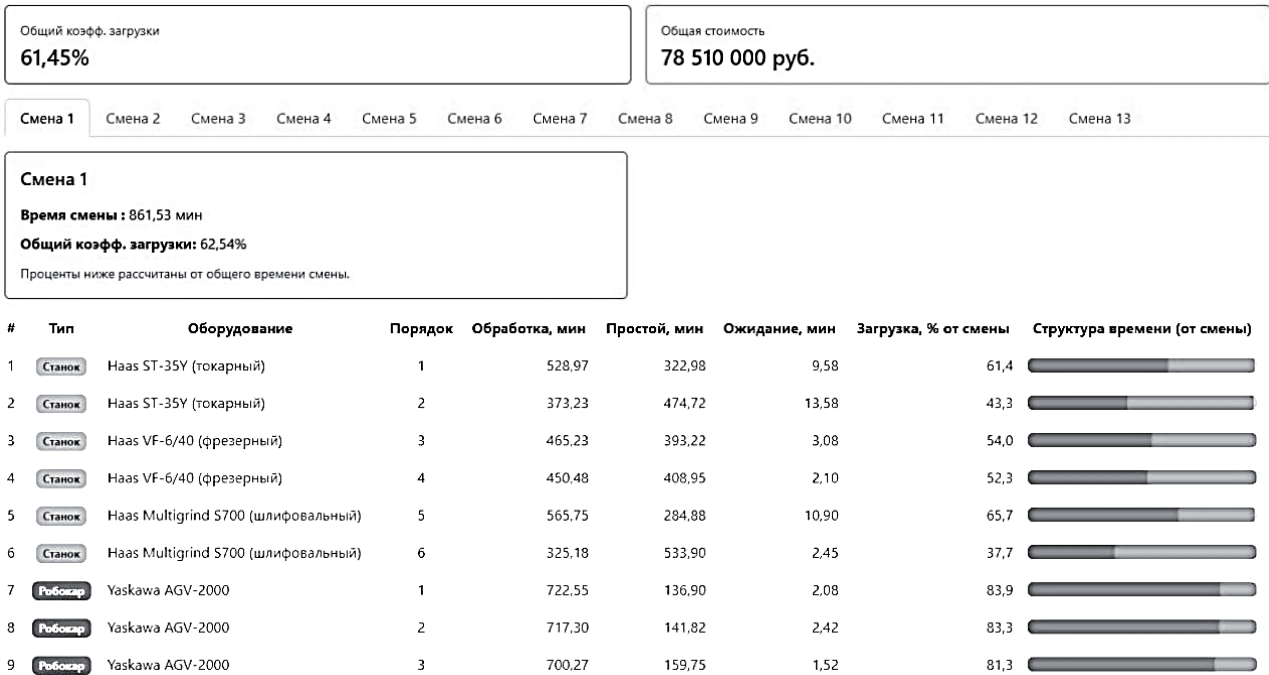


Рисунок 2 – Результаты моделирования с базовыми параметрами оборудования

Проценты рассчитываются относительно времени соответствующей смены.

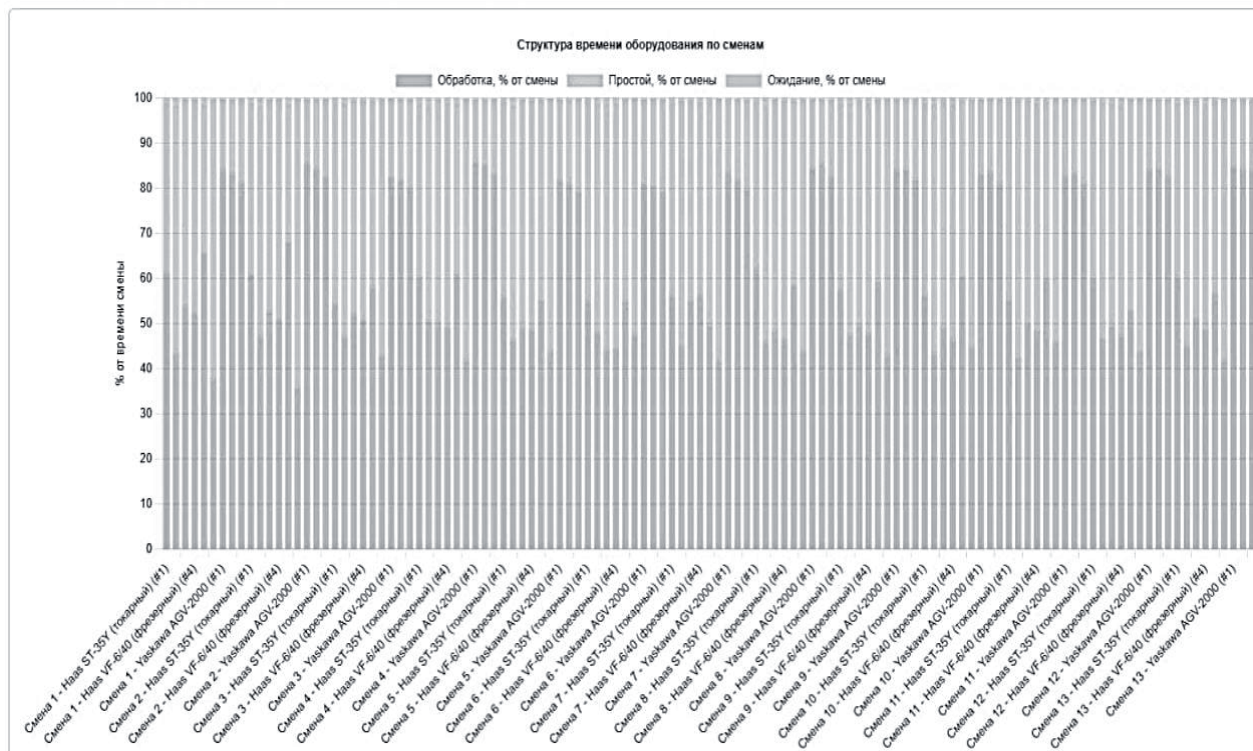


Рисунок 3 – График загрузки оборудования (базовое решение)

Таблица 3 – Сравнение показателей производственного участка до и после оптимизации его конфигурации

| Показатель                         | До оптимизации | После оптимизации | Изменение, % |
|------------------------------------|----------------|-------------------|--------------|
| Средняя загрузка оборудования, %   | 61,45          | 90,86             | +47,8        |
| Общая стоимость оборудования, руб. | 78 510 000     | 50 909 699        | -35,2        |
| Время смены, мин                   | 861,53         | 510,70            | -40,7        |
| Целевая функция $J$                | 1,00 (база)    | 0,72              | -28,0        |

Моделирование (ГА): результаты

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| Общий коэф. загрузки<br><b>90,86%</b> | Общая стоимость<br><b>50 909 699 руб.</b> |
|---------------------------------------|---|

Смена 1    Смена 2    Смена 3    Смена 4    Смена 5    Смена 6    Смена 7    Смена 8    Смена 9    Смена 10    Смена 11    Смена 12    Смена 13

**Смена 1**  
 Время смены : 510,70 мин  
 Общий коэф. загрузки: 91,19%

| # | Тип     | Оборудование                        | Порядок | Загрузка, мин | Простой, мин | Ожидание, мин | Загрузка, % смены | Структура времени |
|---|---------|-------------------------------------|---------|---------------|--------------|---------------|-------------------|-------------------|
| 1 | Станок  | Станок №1 (Токарный (Lathe))        | 1       | 470,48        | 38,84        | 1,37          | 92,1              |                   |
| 2 | Станок  | Станок №2 (Токарный (Lathe))        | 2       | 458,50        | 50,84        | 1,36          | 89,8              |                   |
| 3 | Станок  | Станок №3 (Фрезерный (Milling))     | 3       | 472,65        | 37,59        | 0,46          | 92,6              |                   |
| 4 | Станок  | Станок №4 (Фрезерный (Milling))     | 4       | 506,05        | 3,48         | 1,17          | 99,1              |                   |
| 5 | Станок  | Станок №5 (Шлифовальный (Grinding)) | 5       | 477,38        | 32,93        | 0,38          | 93,5              |                   |
| 6 | Станок  | Станок №6 (Шлифовальный (Grinding)) | 6       | 476,93        | 32,63        | 1,13          | 93,4              |                   |
| 7 | Роботар | Роботар №1                          | 1       | 458,82        | 50,67        | 1,20          | 89,8              |                   |
| 8 | Роботар | Роботар №2                          | 2       | 442,22        | 66,89        | 1,59          | 86,6              |                   |
| 9 | Роботар | Роботар №3                          | 3       | 428,25        | 82,15        | 0,30          | 83,9              |                   |

Рисунок 4 – Результаты моделирования с оптимальными параметрами оборудования

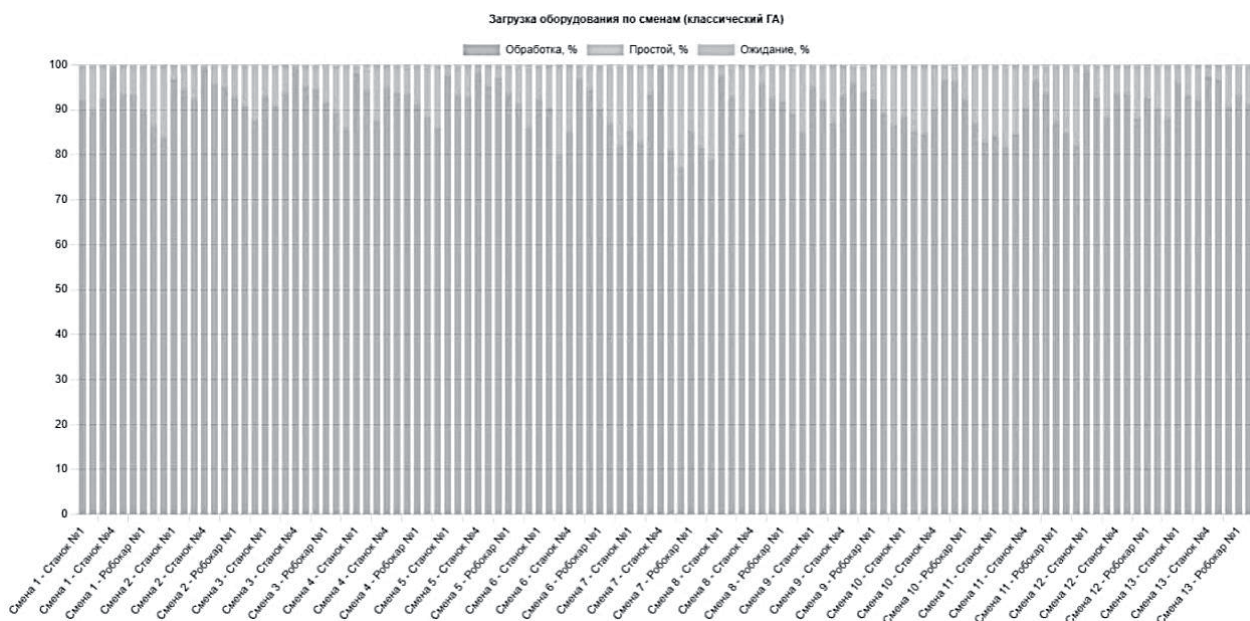


Рисунок 5 – График загрузки оборудования (оптимизированная конфигурация)

## Заключение

В исследовании рассмотрена задача оптимизации конфигурации оборудования ПУ на основе матричного ГА. Разработана онтология ПрО, включающая сущности «Сменное задание», «Деталь», «Технологический процесс», «Станок», «Роботар», «Манипулятор» и их атрибуты, которая положена в основу постановки задачи оптимизации. Предложена модификация матричного ГА с турнирным отбором, кроссовером и функцией приспособленности, объединяющей нормализованные критерии простоев и стоимость оборудования. Разработано программное обеспечение, объединяющее ГА, имитационную модель ПУ и экспертную систему на основе случайного леса. На выполненном примере показана возможность повысить среднюю загрузку оборудования (на 47,8 %), снизить его стоимость (на 35,2 %) и сократить время выполнения смены (на 40,7 %).

## Список литературы

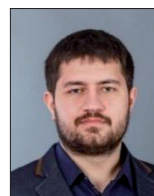
- [1] **Ковалев А.А., Скаков М.Д.** Имитационное моделирование технологических комплексов механосборочных производств в программной среде AnyLogic. *Технологии разработки и отладки сложных технических систем: IX Всероссийская научно-практическая конференция*, Москва, 05–06 апреля 2023 года. Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2024. Том 1. С.288-296.
- [2] **Салаев Р.А., Федоров А.А., Салаева А.В.** Имитационное моделирование процессов агрегатно-сборочного производства. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2021. Т.23, №1(99). С.60-66. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-60-66.
- [3] **Жаров М.В.** Обзор программных средств имитационного моделирования для исследования технологий и производств машиностроения. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2021. Т.23, №4. С.85-92.
- [4] **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия –Телеком, 2013. 384 с.
- [5] **Курейчик В.М. Гогохия Л.Р.** Решения задачи коммивояжера с применением генетического оператора старения. *Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2020»* в 2-х томах (2–8 сентября 2020 г., Дивноморское, Россия). Дивноморское: Издательство Ступина С.А., 2020. Том 1. С.7-17.
- [6] **Ершов В.В.** Перспективные модели генетических алгоритмов в задачах оптимизации нейронных сетей. *Перспективы науки*. 2022. №8(155). С.21-25.
- [7] **Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., Максимов В.В., Цветков А.Н., Гибадуллин Р.Р., Петров Т.И.** Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2018. № 4(40). С. 77-85.
- [8] **Сергеев А.И., Русяев А.С., Кузнецова В.Б.** Генетический алгоритм синтеза технических параметров производственного оборудования. *СТИН*. 2014. №3. С.29-34.
- [9] **Сергеев А.И., Русяев А.С., Корнипаев М.А., Попов А.Н.** Исследование генетических алгоритмов параметрического синтеза высокоавтоматизированных производственных систем. *Автоматизация в промышленности*. 2022. №1. С.13-17. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.03.
- [10] **Гладков Л.А., Гладкова Н.В., Громов С.А.** Модифицированный генетический алгоритм для решения задач оперативного планирования. *Информатика, вычислительная техника и инженерное образование*. 2016. №4(28). С.1-8.
- [11] **Сочнев А.Н.** Планирование производства на основе управляемой генетическим алгоритмом имитационной модели. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии»*. 2021. Т.14. №2. С. 233-243. DOI: 10.17516/1999-494X-0304.
- [12] **Зайцева Н.М., Семькина И.Ю.** Создание интеллектуальной системы управления для технологических комплексов предприятий алюминиевой промышленности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т.335, №11. С.119-132. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4613.
- [13] **Boroukhanian T., Supyen K., Samson J.B., Bashyal A., Wicaksono H.** Integrating 3D object detection with ontologies for accurate digital twin creation in manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol.140, No.9. P.4679-4711. DOI: 10.1007/s00170-025-16548-x.
- [14] **Ma X., Qi Q., Tao F.** An ontology-based data-model coupling approach for digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol.87. P.102649. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102649.

- [15] **Bao Q., Zhao G., Yu Y., Dai S., Wang W.** The ontology-based modeling and evolution of digital twin for assembly workshop. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol.117, No.1. P.395-411. DOI: 10.1007/s00170-021-07773-1.
- [16] **Sapel P., Hopmann C.** Towards an ontology-based dictionary for production planning and control in the domain of injection molding as a basis for standardized asset administration shells. *Journal of Industrial Information Integration*. 2023. Vol.35. P.100488. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100488.
- [17] **Mohammed A., Chaimae A., Hussain B.-A.** A Smart Decision Making System for the Optimization of Manufacturing Systems Maintenance using Digital Twins and Ontologies. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022. Vol.13, No.8. P.661-672. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130811.
- [18] **Акопов А.С., Бекларян А.Л., Тхакур М., Верма Б.Д.** Разработка параллельных генетических алгоритмов вещественного кодирования для систем поддержки принятия решений социально-экономического и экологического планирования. *Бизнес-информатика*. 2019. Т.13, №1. С.33-44. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.1.33.44.

## Сведения об авторах



**Сергеев Александр Иванович**, 1979 г. рождения. Окончил Оренбургский государственный университет (ОГУ) в 2003 г., д-р техн. наук (2017). Директор Аэрокосмического института ОГУ, профессор кафедры систем автоматизации производства ОГУ. В списке научных трудов более 300 работ. Author ID (РИНЦ): 159650; Author ID (Scopus): 55424212300; ORCID: 0000-0002-1104-7424; Researcher ID (WoS): E-6655-2015. [alexandr\\_sergeew@mail.ru](mailto:alexandr_sergeew@mail.ru). ✉



**Гунков Сергей Алексеевич**, 1994 г. рождения. Окончил ОГУ в 2021 г. Соискатель кафедры систем автоматизации производства ОГУ. В списке научных трудов около 8 работ. Author ID (РИНЦ): 1335092; ORCID 0009-0001-7104-1649; Researcher ID (WoS): AEC-6051-2022. [roughst56@gmail.com](mailto:roughst56@gmail.com).

Поступила в редакцию 24.02.2026, после рецензирования 23.04.2026. Принята к публикации 30.04.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-314-326

## Design of production area equipment configuration based on a genetic algorithm

© 2026, A.I. Sergeev ✉, S.A. Gunkov

Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia

### Abstract

This article proposes an approach to equipment configuration optimization based on the integration of a genetic algorithm with a simulation model of a production area. Domain ontology is presented that formalizes the key entities of the production area and their interrelations, thereby providing a conceptual basis for model construction and interpretation of the results. A distinctive feature of the algorithm is the chromosome structure represented as a two-dimensional array that incorporates equipment parameters, including movement speed, temporal characteristics of operations, and the storage capacities of robotic carts, machines, and manipulators. To evaluate design solutions, a fitness function was developed that combines normalized criteria of equipment downtime and cost, with the possibility of flexible priority adjustment through weighting coefficients. To predict the market value of equipment, which depends nonlinearly on its technical characteristics, an expert system based on the random forest algorithm was employed. The architecture of the software system implementing the proposed approach includes the stages of selection, crossover, and generation of new populations. The developed software enables finding optimal equipment configurations based on performance and cost

criteria under changing production conditions. An example of optimization of the equipment configuration of a production area is provided.

**Keywords:** matrix genetic algorithm, computer simulation, optimization, random forest algorithm, production process, equipment configuration.

**For citation:** *Sergeev A.I., Gunkov S.A.* Design of production area equipment configuration based on a genetic algorithm [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 314-326. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-314-326.

**Financial Support:** The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-29-01405, <https://rscf.ru/project/25-29-01405>.

**Authors' contributions:** *Sergeev A.I.* – development of the concept and research plan; *Gunkov S.A.* – development of algorithms and software implementation, conducting computational experiments.

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

## List of figures and tables

Figure 1 – Scheme of the genetic algorithm for parametric synthesis

Figure 2 – Simulation results with baseline equipment parameters

Figure 3 – Equipment utilization graph (baseline solution)

Figure 4 – Simulation results with optimal equipment parameters

Figure 5 – Equipment utilization graph (optimized configuration)

Table 1 – Attributes of ontology classes

Table 2 – Parameters determined by the genetic algorithm

Table 3 – Comparison of production area performance indicators before and after configuration optimization

## References

- [1] **Kovalev AA, Skakov MD.** Simulation modeling of technological complexes of mechanical assembly plants in the AnyLogic software environment [In Russian]. *Technologies for the development and debugging of complex technical systems: IX All-Russian Scientific and Practical Conference*, Moscow, 05-06 April 2023. Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2024, pp. 288-296.
- [2] **Salaev RA, Fedorov AA, Salaeva AV.** Simulation modeling of processes of unit-assembly production of aircraft products [In Russian]. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021; 23(1): 60-66. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-60-66.
- [3] **Zharov MV.** Review of simulation software tools for the study of technologies and industries of mechanical engineering [In Russian]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*. 2021; 23(4): 85-92.
- [4] **Rutkovskaya D, Pilinsky M, Rutkovsky L.** Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems [In Russian]. Moscow : Hotline –Telecom, 2013. 384 p.
- [5] **Kureichik VM, Gogokhia LR.** Solving the traveling salesman problem using the genetic aging operator [In Russian]. *Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent Systems and Information Technologies 2020" (IS & IT 2020, IS&IT'20) in 2 volumes (02-08 September 2020, Divnomorskoe, Russia)*. Divnomorskoe: Stupina S.A. Publishing House, 2020. Volume 1. pp. 7-17.
- [6] **Yershov VV.** Promising models of genetic algorithms in neural network optimization problems [In Russian]. *Perspectives of science*. 2022; 8(155): 21-25.
- [7] **Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, Maksimov VV, Tsvetkov AN, Gibadullin RR, Petrov TI.** Development of a method for topological optimization of electric machines based on a genetic algorithm [In Russian]. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2018; 4(40): 77-85.
- [8] **Sergeev AI, Rusyaev AS, Kuznetsova VB.** A Genetic algorithm for the synthesis of technical parameters of industrial equipment [In Russian]. *STIN*. 2014; 3: 29-34.
- [9] **Sergeev AI, Rusyaev AS, Kornipaev MA, Popov AN.** Investigation of genetic algorithms for parametric synthesis of highly automated production systems [In Russian]. *Automation in industry*. 2022; 1: 13-17. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.03.
- [10] **Gladkov LA, Gladkova NV, Gromov SA.** A modified genetic algorithm for solving operational planning problems [In Russian]. *Informatics, computer engineering and engineering education*. 2016; 4(28): 1-8.

- [11] **Sochnev AN.** Production planning based on a genetic algorithm controlled simulation model [In Russian]. *Journal of the Siberian Federal University. The series "Engineering and technology"*. 2021; 14(2): 233-243. DOI: 10.17516/1999-494X-0304.
  - [12] **Zaitseva NM, Semykina IY.** Creation of an intelligent control system for technological complexes of aluminum industry enterprises [In Russian]. *Izvestia of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2024; 335(11): 119-132. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4613.
  - [13] **Boroukhan T., Supyen K., Samson J.B., Bashyal A., Wicaksono H.** Integrating 3D object detection with ontologies for accurate digital twin creation in manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025; 140(9): 4679-4711. DOI: 10.1007/s00170-025-16548-x.
  - [14] **Ma X., Qi Q., Tao F.** An ontology-based data-model coupling approach for digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024; 87: 102649. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102649.
  - [15] **Bao Q., Zhao G., Yu Y., Dai S., Wang W.** The ontology-based modeling and evolution of digital twin for assembly workshop. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021; 117(1): 395-411. DOI: 10.1007/s00170-021-07773-1.
  - [16] **Sapel P., Hopmann C.** Towards an ontology-based dictionary for production planning and control in the domain of injection molding as a basis for standardized asset administration shells. *Journal of Industrial Information Integration*. 2023; 35: 100488. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100488.
  - [17] **Mohammed A., Chaimae A., Hussain B.-A.** A Smart Decision Making System for the Optimization of Manufacturing Systems Maintenance using Digital Twins and Ontologies. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022; 13(8): 661-672. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130811.
  - [18] **Akopov AS, Beklaryan AL, Thakur M, Verma BD.** Developing parallel real-coded genetic algorithms for decision-making systems of socio-ecological and economic planning [In Russian]. *Business Informatics*. 2019; 13(1): 33-44. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.1.33.44.
- 

## About the authors

**Alexander Ivanovich Sergeev** (b. 1979) graduated from Orenburg State University (OSU) in 2003, Doctor of Technical Sciences (2017). Director of the Aerospace Institute of OSU and Professor at the Department of Production Automation Systems of the same university. The list of scientific papers includes more than 300 works. Author ID (RSCI): 159650; ORCID: 0000-0002-1104-7424; Author ID (Scopus): 55424212300; Researcher ID (WoS): E-6655-2015. [alexandr\\_sergeew@mail.ru](mailto:alexandr_sergeew@mail.ru) ✉.

**Sergey Alekseevich Gunkov** (b. 1994) graduated from OSU in 2021. Research applicant at the Department of Production Automation Systems of OSU. The list of scientific papers includes about 8 works. Author ID (РИНЦ): 1335092; ORCID: 0009-0001-7104-1649; Researcher ID (WoS): AEC-6051-2022. [roughest56@gmail.com](mailto:roughest56@gmail.com).

---

Received February 24, 2026. Revised April 23, 2026. Accepted April 30, 2026.

---



## Построение правовой онтологии для поддержки принятия решений

© 2026, А.А. Борисова

Воронежский государственный университет (ВГУ), Воронеж, Россия

### Аннотация

Предложен подход к построению онтологии предметной области интеллектуальных прав, предназначенной для использования в системах поддержки принятия решений. Актуальность работы связана с тем, что используемые реляционные модели ориентированы преимущественно на хранение явно заданных сведений и не позволяют в полной мере учитывать семантические связи, нормативные ограничения и логически выводимые зависимости между объектами. В качестве формального основания в работе используются аппарат дескриптивной логики и язык *OWL DL*. Разработанная онтология включает иерархию классов, систему объектных свойств и набор аксиом. Аксиомы задают условия принадлежности объектов к классам, а также ограничения и исключения. Реализация модели выполнена в среде *Protégé* с применением логического вывода, обеспечивающего автоматическую классификацию экземпляров, проверку согласованности модели и выявление неявных связей. Разработанная методика включает построение онтологической модели, процедуры формирования запросов, отбора допустимых альтернатив и выработки рекомендаций для системы поддержки принятия решений. Показано, что применение онтологической модели позволяет переходить от описания знаний о предметной области к их операциональному использованию при анализе объектов интеллектуальных прав. Предложенный подход обеспечивает расширяемость модели знаний, согласованность её структуры и возможность обработки частично заданных сведений, что делает его применимым при проектировании систем поддержки принятия решений в юридически значимых и семантически сложных областях.

**Ключевые слова:** правовая онтология, дескриптивная логика, логический вывод, системы поддержки принятия решений, интеллектуальное право.

**Цитирование:** Борисова А.А. Построение правовой онтологии для поддержки принятия решений. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.327-340. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-327-340.

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

### Введение

Современные информационные системы, применяемые в правовой сфере, работают с данными, которые имеют неполную, слабо структурированную и контекстно-зависимую природу. В области интеллектуальных прав (ИнП) это проявляется особенно отчётливо: объекты охраны, субъекты права, способы использования, регистрационные процедуры и правовые ограничения образуют сложную сеть взаимосвязей, не всегда явно представленную.

Реляционные модели данных эффективны в решении задач хранения и выборки структурированной информации, однако их возможностей недостаточно для интерпретации правовых знаний. Они не позволяют автоматически устанавливать принадлежность объекта к определённой категории и выявлять неявные ограничения. В результате значительная часть аналитической работы переносится на эксперта, что увеличивает трудоёмкость проверки и снижает воспроизводимость принимаемых решений.

Одним из способов преодоления указанных ограничений является применение онтологического подхода [1]. Он позволяет представить знания в виде формальной системы понятий, отношений и аксиом, а также использовать автоматический вывод для уточнения статуса

объектов и выявления скрытых зависимостей. Для предметной области (ПрО) ИнП такой подход особенно значим, поскольку здесь требуется учитывать не только иерархию объектов, но и условия охраноспособности, ограничения использования, наличие лицензий и особенности правового режима.

Целью работы является построение онтологической модели (ОМ) ПрО ИнП и методики её использования для поддержки принятия решений (ППР).

Задачи работы: выделить ключевые классы, свойства и ограничения ПрО ИнП; формализовать структуру ОМ средствами дескриптивной логики (ДЛ) и *OWL DL*; разработать систему аксиом, обеспечивающих автоматическую классификацию объектов и выявление неявных связей [2, 3]; определить роль *DL*-запросов<sup>1</sup> в извлечении знаний и формировании множества допустимых альтернатив; провести оценку ОМ в среде *Protégé*.

Особенностью предлагаемого подхода является ориентация не только на представление знаний, но и на их операциональное использование в задачах ППР в ПрО ИнП [4, 5].

## 1 Особенности предметной области

Для области ИнП определение понятий, связей и ограничений в ПрО для их представления в машинно-обрабатываемом виде осложняется тем, что значительная часть знаний имеет качественный и/или нормативный характер. Здесь важны не только объекты, но и условия их охраны, допустимые способы использования, а также исключения и зависимости от правового контекста.

Существующие правовые онтологии (например, *LKIF-Core* [6]) ориентированы преимущественно на описание общих юридических категорий. При решении прикладных задач, связанных с ИнП, требуется специализированная ОМ, учитывающая особенности национального законодательства, классификацию объектов охраны, регистрационные процедуры и ограничения использования.

Прикладная онтология должна содержать перечень понятий и формальные отношения между ними, а также аксиомы, задающие условия вывода. Наличие аксиоматического слоя позволяет использовать ОМ для автоматической классификации объектов, проверки согласованности описаний и выявления фактов, не заданных явно.

В терминах ДЛ структура онтологии задаётся через три группы элементов: концепты, роли и аксиомы [7]. Концепты соответствуют классам объектов ПрО, роли описывают бинарные отношения между экземплярами, а аксиомы фиксируют включение, эквивалентность, несовместимость классов и ограничения на свойства. Такой способ представления задаёт формальное описание структуры знаний и позволяет автоматически получать новые утверждения на основе заданных фактов [8].

В области ИнП концептами могут быть классы *Изобретение*, *Полезная Модель*, *Авторское Право*, *Лицензия*, *Правовое Ограничение*. Ролями являются отношения *имеет Лицензию*, *имеет Ограничение*, *создано Автором*, *зарегистрировано В*. На основе атомарных понятий и ролей формируются более сложные описания, задающие условия принадлежности объекта к определённому классу. Например, класс изобретений может быть задан через совокупность признаков новизны, промышленной применимости и изобретательского уровня. Класс объектов с ограниченным режимом использования определяется через наличие соответствующего правового ограничения. Такая формализация позволяет машине логического вывода (МЛВ) автоматически относить экземпляры к нужным классам даже в тех случаях, когда соответствующая принадлежность не была указана [9, 10].

<sup>1</sup> *DL*-запрос – это запрос к онтологии, формируемый с использованием *Manchester Syntax* (манчестерского синтаксиса *OWL*).

Для формирования отношений и записи связей между понятиями и ролями используют терминологические аксиомы. Аксиомы данного вида называют равенствами:  $C \equiv D$  ( $R \equiv S$ ), где  $C, D$  – понятия, а  $R, S$  – роли.

В качестве примеров, приведены описания онтологии объектов ИнП.

*Изобретение*  $\equiv$  *Новизна*  $\cap$  *ПромышленнаяПрименимость*  $\cap$  *Изобретательский уровень*; данное соотношение фиксирует пересечение трёх признаков Изобретения.

*ПолезнаяМодель*  $\equiv$  *ОбъектПатентногоПрава*  $\cap$  *Новизна*  $\cap$  *ПромышленнаяПрименимость*; приведённое выражение задаёт класс полезных моделей через набор существенных признаков, необходимых для отнесения объекта к данной категории.

ДЛ позволяет не только описывать структуру ПрО, но и получать новые знания посредством автоматического вывода.

Сфера ИнП характеризуется разветвлённой иерархией понятий. Объекты данной ПрО могут классифицироваться по различным основаниям, при этом отдельные классы имеют как общие, так и отличительные признаки [11]. Особенностью ПрО является её изменяемость в связи с действующим законодательством. Поэтому при проектировании онтологии учитывается не только текущее состояние ПрО, но и возможность последующего добавления новых классов, экземпляров и отношений [12].

## 2 Онтология для поддержки принятия решений

### 2.1 Методика построения онтологии

В предлагаемой методике описывается переход от анализа ПрО к формированию рекомендаций в системе ППР (СППР). Методика включает последовательность этапов.

$$M = \langle S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 \rangle,$$

где  $S1 - S4$  относятся к построению и проверке онтологии, а  $S5 - S7$  обеспечивают её включение в процедуру принятия решений.

*S1. Концептуализация.* Выделяются сущности ПрО, их свойства и взаимосвязи. Результатом является множество концептов  $C$  и отношений  $R$ , формирующих основу ОМ.

*S2. Формализация.* Построенная основа ОМ преобразуется в формальное описание:  $O = \langle C, R, A \rangle$ , где  $C$  – конечное множество классов (концептов),  $R$  – множество объектных свойств (ролей),  $A$  – система аксиом, определяющих семантику классов и ограничений.

*S3. Задание ограничений.* Формируются логические условия, определяющие допустимость объектов и их свойств. Ограничения задают пространство возможных интерпретаций и используются при последующем выводе.

*S4. ЛВ.* С использованием МЛВ выполняется автоматическое получение новых фактов.

*S5: Формирование запросов.* DL-запросы используются как инструмент извлечения альтернатив, учитывающий как явные, так и выведенные знания.

*S6: Генерация альтернатив.* Множество допустимых решений определяется как:

$$A = \{x \mid x \models Q\}, \text{ где } Q - \text{DL-запрос.}$$

*S7: Выбор решения.* Окончательный выбор осуществляется на основе функции предпочтений:  $x^* = \arg \max_{x \in A} U(x)$ , где  $U(x)$  – функция предпочтений. Предпочтения могут быть заданы логически (через классы и ограничения) или количественно (в случае многокритериальной оценки).

## 2.2 Описание фрагмента онтологии

Устранение неоднозначности интерпретации ПрО и обеспечение воспроизводимости результатов показано на формализованном фрагменте разработанной онтологии ИнП, заданном в терминах ДЛ и языка *OWL DL* [13].

*Классы (концепты).* В онтологии выделено множество базовых концептов, отражающих ключевые сущности ПрО: *IntellectualPropertyObject* – объект ИнП; *Patent* – объект патентного права; *Copyright* – объект авторского права; *License* – лицензия; *LegalRestriction* – правовое ограничение; *Invention* – изобретение; *UtilityModel* – полезная модель; *Trademark* – товарный знак; *Author* – автор; *LegalEntity* – правообладатель. Указанные классы образуют таксономическую структуру, в которой специализированные понятия определяются через более общие категории.

*Объектные свойства (роли).* Множество отношений задаёт семантические связи между объектами:  $hasLicense \subseteq IntellectualPropertyObject \times License$  (функциональное свойство);  $hasRestriction \subseteq IntellectualPropertyObject \times LegalRestriction$  (транзитивное свойство);  $ownedBy \subseteq IntellectualPropertyObject \times LegalEntity$ ;  $createdBy \subseteq IntellectualPropertyObject \times Author$ ;  $registeredIn \subseteq Patent \times Organization$  (функциональное ограничение);  $hasFeature \subseteq Patent \times Feature$ . Задание характеристик свойств (функциональность, транзитивность) ограничивает пространство допустимых интерпретаций и обеспечивает корректность МЛВ [14].

Онтология включает набор аксиом, задающих семантику ПрО.

*Иерархические зависимости:*

$Patent \subseteq IntellectualPropertyObject$ ;  $Copyright \subseteq IntellectualPropertyObject$ .

*Несовместимость понятий:*  $Patent \cap Copyright \subseteq \perp$ .

*Определение лицензируемого объекта:*

$LicensedObject \equiv IntellectualPropertyObject \cap \exists hasLicense.License$ .

*Формализация объектов патентного права:*

$Invention \equiv Patent \cap Novelty \cap IndustrialApplicability \cap InventiveStep$ ;

$UtilityModel \equiv Patent \cap Novelty \cap IndustrialApplicability \cap \neg InventiveStep$ .

*Ограничения на свойства:*  $Patent \subseteq \exists registeredIn.Organization$ .

*Классы, определяемые условиями:*

$RestrictedObject \equiv IntellectualPropertyObject \cap \exists hasRestriction.CommercialUse$ .

Представленные классы и свойства являются частью ОМ в среде *Protégé*, включающей более 60 концептов и систему аксиом. Указанные классы и свойства используются при описании экземпляров ПрО, что служит основанием для интерпретации их характеристики в терминах построенной ОМ.

МЛВ использует указанные аксиомы для автоматической классификации экземпляров, выявления неявных зависимостей между объектами и построения дополнительных таксономических связей. Процедуры вывода интерпретируются в терминах ПрО как рекомендации (например, необходимость правовой проверки), сигналы о рисках и уточнение статуса объектов [15]. Представленная ОМ обеспечивает переход от декларативного описания знаний к их операциональному использованию в СППР.

## 2.3 Проверка и уточнение онтологии

Завершающим этапом создания ОМ является проверка её логической корректности и уточнение структуры по результатам работы МЛВ. Выполняется проверка согласованности онтологии, корректности иерархии и непротиворечивости заданных аксиом. При обнаружении противоречий выполняется корректировка соответствующих классов, свойств или аксиом, после чего процедура проверки повторяется. Итеративное уточнение придаёт устойчи-

вость ОМ к расширению и сохраняет её логическую целостность при добавлении новых понятий, экземпляров и отношений ПрО [16].

## 2.4 Структура онтологической модели

ОМ имеет иерархическую структуру и отражает основные группы объектов ИнП. На рисунке 1 представлена обобщённая структура прикладной онтологии ПрО и её взаимодействие с СППР. Онтология включает иерархию классов ПрО (рисунок 2), систему объектных свойств и аксиомы ДЛ, формализующие ограничения и условия вывода. На верхнем уровне выделены шесть базовых классов: Авторское право, Патентное право, Средства индивидуализации, Смежные права, Нетрадиционные объекты и Защита ИнП. Эти классы задают основу таксономии и детализируются через подклассы, отражающие конкретные виды объектов, правовых режимов и способов защиты.

Класс Авторское право включает 24 подкласса, описывающих основные категории объектов авторско-правовой охраны. Класс Патентное право содержит 10 подклассов, связанных с объектами и признаками патентоспособности.



Рисунок 1 – Структура прикладной онтологии для поддержки принятия решений

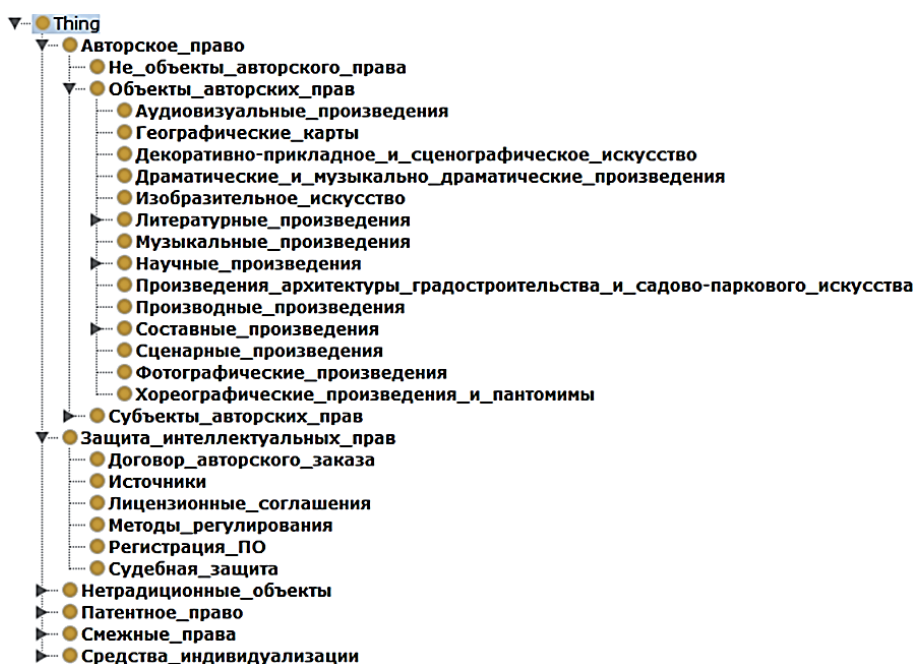


Рисунок 2 – Иерархия классов

В составе класса Защита ИнП представлены договорные, регулятивные и судебные механизмы защиты. Отдельно представлены Смежные права, Средства индивидуализации и Нетрадиционные объекты, что позволяет учитывать различные правовые режимы и основания классификации [17]. Некоторые классы созданы как непересекающиеся (Изобретение, Полезная модель, Промышленный образец).

МЛВ с помощью DL-запросов использует данную ОМ для получения неявных знаний, которые применяются в СППР.

## 2.5 Формализация отношений между объектами

Отношения между объектами реализованы через объектные свойства *OWL DL*. Для каждого свойства определяются область определения, область значений и логические характеристики: функциональность, транзитивность, симметричность или наличие обратного свойства. Эти характеристики влияют на результаты автоматической классификации и выявления опосредованных связей. В ОМ выделены отношения, описывающие правовую охрану, регистрацию, наличие признаков патентоспособности, срок действия исключительных прав, ограничения использования и связь объекта с правообладателем. Например, свойство *Охраняется\_законом* связывает объект интеллектуальной деятельности с нормативным правовым актом, а свойство *Должна\_быть\_зарегистрирована* фиксирует необходимость регистрации отдельных объектов в уполномоченной организации.

Выделены следующие отношения.

*Охраняется\_законом* (отношение между объектами интеллектуальной деятельности и нормативно-правовым актом); связь обладает свойствами инверсности и транзитивности.

*Должна\_быть\_зарегистрирована* (отношение между объектами патентного права и Роспатентом); связь наследуется от свойства *Охраняется\_законом*, инверсна по отношению к свойствам *является\_патентным\_правом*, регистрируется *в\_Роспатенте* и транзитивна.

*Может\_быть\_зарегистрирована* (отношение между объектами, для которых допускается регистрационный или учётный режим); связь наследуется от свойства *Охраняется\_законом* и обладает характеристикой транзитивности.

*Имеет\_коммерческое\_обозначение* (отношение между фирменными наименованиями и коммерческими обозначениями); сторона может иметь только одно коммерческое обозначение, поэтому связи присвоено свойство функциональности и инверсивности свойству *является\_коммерческим\_обозначением*.

*Имеет\_срок\_исключительных\_прав* (отношение между патентным правом и сроком).

*Не\_охраняется\_законом* (отношение между источниками права и объектами, которые по закону не обладают охраноспособностью); обладает характеристиками инверсивности по отношению к свойству *Не\_является*, транзитивности и симметричности.

*Регистрируется\_в* (отношение между классом *Регистрация* и средствами индивидуализации); связь обладает характеристикой функциональности, поскольку только одна организация может владеть одним товарным знаком, и инверсности по отношению к свойству *Регистрирует*.

*Является\_признаком* (отношение между объектами патентных прав при определении этих объектов).

Указанные ограничения по обязательности и количеству объектов, находящихся в соответствующем отношении, задаются с помощью свойств объектов [18]. На рисунке 3 показаны связи построенной онтологии.

Задание свойств и их характеристик показывает согласованность ОМ и предотвращает появление некорректных выводов МЛВ. Для проверки работоспособности ОМ и МЛВ в онтологию включены экземпляры классов, представляющие объекты ПрО. Экземпляры связываются между собой и с классами с помощью свойств объектов, формируя базу знаний.

## 2.6 Автоматический логический вывод

Автоматический вывод реализован с использованием МЛВ, поддерживаемой *OWL DL*. Её применение позволяет: проверять согласованность онтологии, классифицировать экземпляры и выявлять связи, которые логически следуют из заданных аксиом, но не внесены в модель явно.

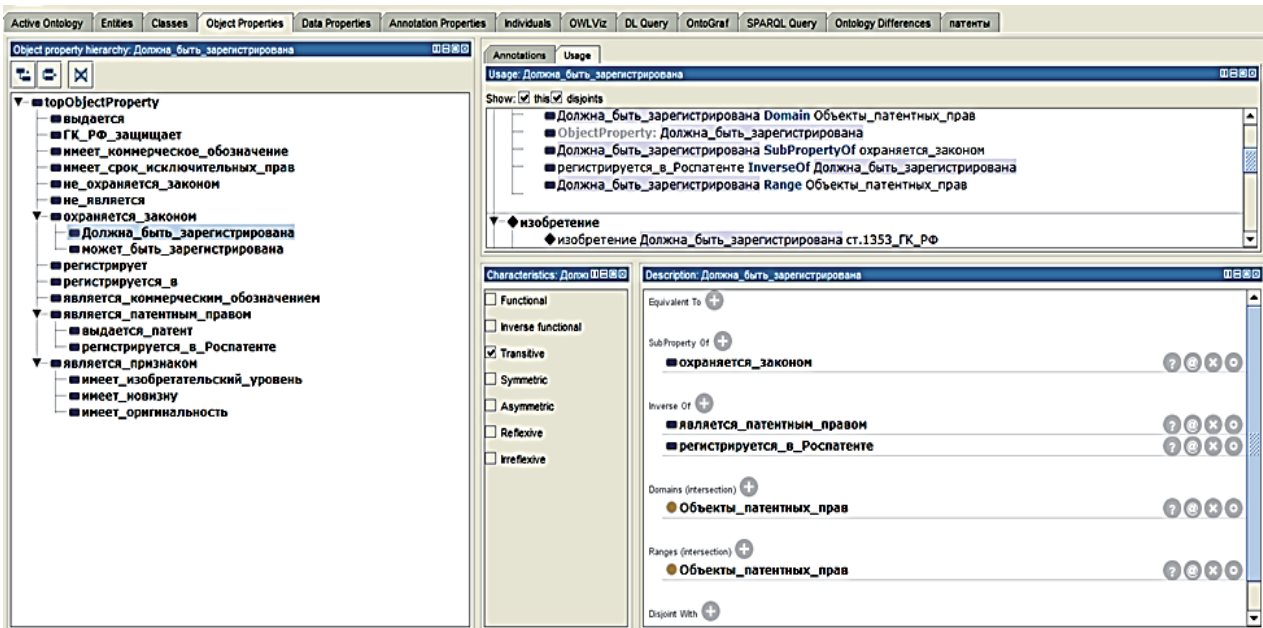


Рисунок 3 – Иерархия свойств объектов

В разработанной системе МЛВ используется для семантической обработки знаний. Если объект обладает набором признаков, достаточных для отнесения к определённому классу, МЛВ автоматически устанавливает соответствующую принадлежность. При наличии транзитивных или обратных свойств могут быть выявлены дополнительные отношения между экземплярами.

На рисунке 4 представлен пример *DL*-запросов. Такие запросы учитывают не только явно заданные утверждения, но и факты, полученные в результате вывода. Это позволяет работать с неполными описаниями объектов и формировать более обоснованные рекомендации для пользователя.

### 3 Использование онтологии для поддержки принятия решений

На этапе применения ОМ используется как семантический слой СППР. Её задача состоит не в окончательной юридической квалификации объекта, а в предварительном анализе: выявлении возможных ограничений, уточнении статуса объекта, обнаружении неполных описаний и формировании оснований для экспертной проверки.

Этапы S5-S7 обеспечивают переход от результатов МЛВ к практическим действиям системы. Формируется *DL*-запрос, определяется множество объектов, удовлетворяющих заданным условиям, результат интерпретируется как рекомендация, сигнал риска или основание для дополнительного анализа (рисунок 5).

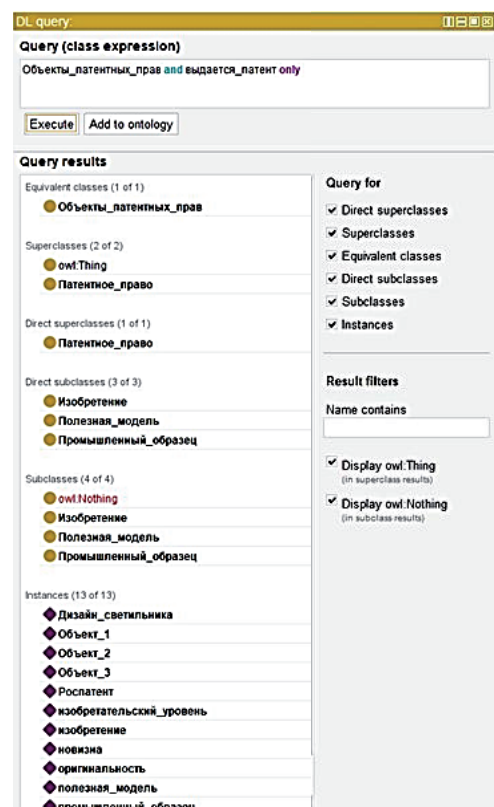


Рисунок 4 – Пример *DL*-запросов к онтологии

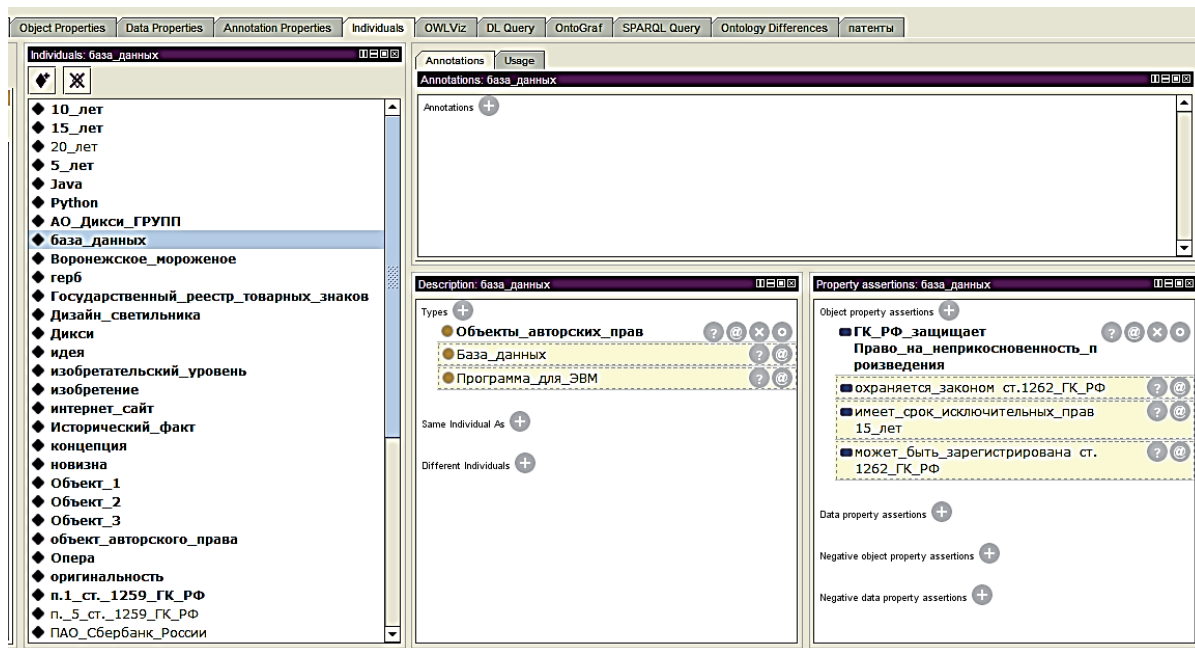


Рисунок 5 – Пример транзитивной связи экземпляра «База данных»

Результаты МЛВ интерпретируются в терминах ПрО и используются при формировании решений.

### 3.1 Выявление неявных знаний как основа поддержки решений

Выявление неявных знаний является ключевой функцией разработанной ОМ. Под неявными знаниями понимаются сведения, которые отсутствуют в исходном описании объекта, но могут быть получены на основе заданных классов, свойств и аксиом. Такие результаты позволяют уточнять правовой статус объекта, определять допустимые способы его использования и выявлять ограничения, требующие экспертной проверки.

На рисунке 6 представлен пример экземпляра объекта ПрО с частичным набором формализованных признаков и связей. Часть характеристик объекта явно не указана, однако в онтологии присутствуют аксиомы ДЛ, определяющие условия принадлежности объектов к определённым классам и ограничения на свойства [19].

### 3.2 Интеграция онтологии в программную систему

Разработанная ОМ включена в СППР через экспорт в машинно-обрабатываемый формат. В этом случае онтология выполняет роль базы знаний, к которой обращаются компоненты системы при решении задач анализа, классификации и оценки объектов ПрО [20]. Основные компоненты ОМ и их функции в СППР представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Компоненты онтологической модели

| Компонент модели             | Функция в системе поддержки принятия решений       |
|------------------------------|--|
| Класс                        | Классификация объектов предметной области          |
| Иерархия классов             | Автоматическое наследование свойств и признаков    |
| Свойства объектов            | Формализация связей и зависимостей между объектами |
| Характеристики свойств       | Учёт функциональности, транзитивности и инверсии   |
| Аксиомы дескриптивной логики | Формализация условий и логических ограничений      |
| Механизм логического вывода  | Получение неявных знаний и логических следствий    |
| DL-запросы                   | Извлечение знаний с учётом логического вывода      |

Использование онтологии в качестве самостоятельного слоя знаний позволяет отделить содержательную модель ПрО от программной логики приложения. Благодаря этому изменение состава классов, свойств, аксиом или экземпляров может выполняться без существенной переработки архитектуры программной системы.

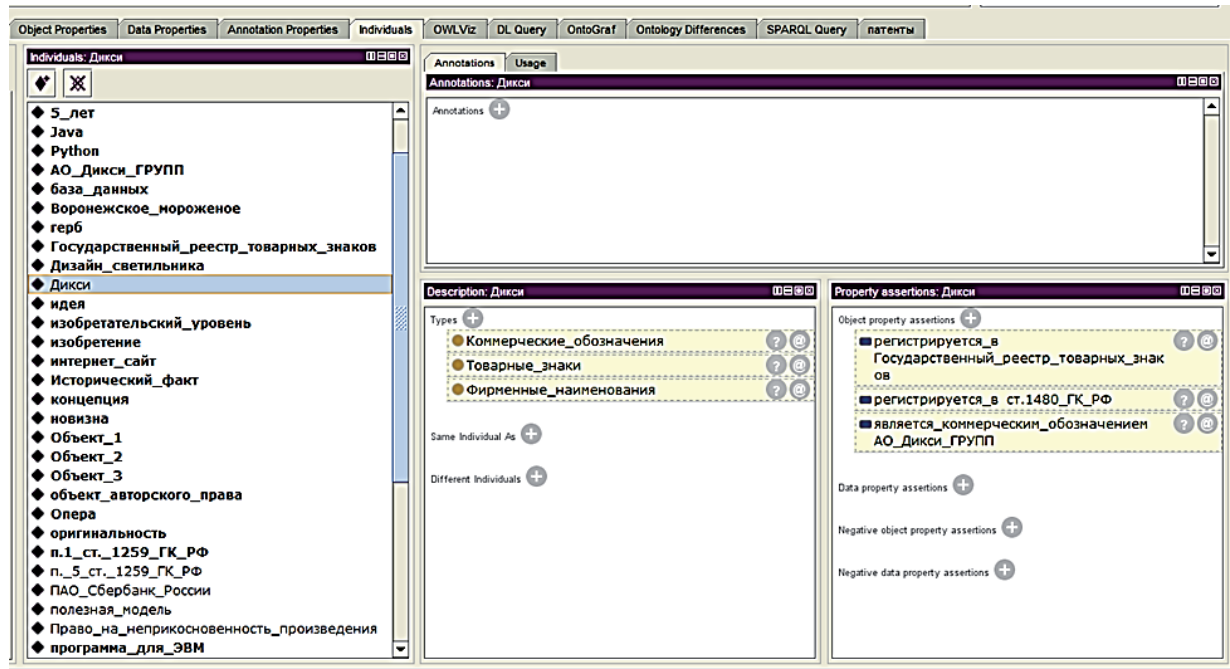


Рисунок 6 – Пример экземпляра объекта после логического вывода

### 3.3 Сценарии использования

*Сценарий 1. Классификация объекта.* Пусть задан объект  $X$ , для которого известны признаки новизны и промышленной применимости. В ОМ такое описание может быть представлено следующим образом:  $X \cap \text{Новизна} \cap \text{ПромышленнаяПрименимость}$ . После запуска МЛВ объект  $X$  может быть отнесён к классу изобретений:  $X \in \text{Изобретение}$ . Полученный результат используется СППР для предварительной классификации объекта.

*Сценарий 2. Определение ограничений использования.* Если для объекта задан запрет коммерческого применения, то он может быть классифицирован как объект с ограниченным режимом использования. Соответствующая аксиома имеет вид:  $\text{RestrictedObject} \equiv \text{IObject} \cap \exists \text{hasRestriction. CommercialUse}$ . В результате работы МЛВ объект автоматически относится к классу  $\text{RestrictedObject}$ . Для СППР это означает необходимость дополнительной правовой проверки перед использованием объекта.

*Сценарий 3. Анализ объекта при неполных данных.* Сведения об объекте могут быть неполными. Например, известен правообладатель, но отсутствуют данные о лицензии. Для выявления таких случаев может использоваться  $DL$ -запрос:  $\text{IObject and not (hasLicense some License)}$ . Результатом выполнения запроса является выделение объектов с неопределённым лицензионным статусом. СППР интерпретирует такой результат как сигнал о необходимости уточнения данных перед принятием решения.

*Сценарий 4. Поддержка экспертной оценки.* ОМ может применяться как основа экспертного анализа. В данном случае автоматически можно классифицировать объекты, выявлять конфликты прав и подготовить информацию для эксперта. Такой подход снижает трудоёмкость проверки и повышает воспроизводимость экспертных решений.

### 3.4 Выявление ограничений использования объектов

В ОМ выделен класс объектов с ограниченным режимом использования. Пусть имеется объект  $X$ , описание которого является неполным, и для него известно следующее: объект относится к классу *IntellectualPropertyObject*; для объекта задано ограничение *hasRestriction = CommercialUse*; сведения о наличии или отсутствии лицензии в базе знаний не указаны.

Результаты, представленные в таблице 2, показывают, что при частично заданных характеристиках объекта модель позволяет определить его статус и сформировать рекомендацию для дальнейшего анализа. Полученный результат интерпретируется СППР как рекомендация: объект требует дополнительной правовой проверки перед использованием. Данный сценарий демонстрирует полный цикл применения предложенной методики: от неполного описания объекта до формирования *DL*-запроса и выдачи обоснованной рекомендации пользователю. Примеры *DL*-запросов и результаты их выполнения приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Сценарий принятия решений при неполной информации

| Этап                         | Содержание   |
|------------------------------|--|
| Входные данные               | объект $X$ принадлежит классу <i>IntellectualPropertyObject</i> ; для него задано ограничение <i>CommercialUse</i> ; сведения о лицензии отсутствуют               |
| Неполнота описания           | В базе знаний отсутствует утверждение <i>hasLicense(X, License)</i> , однако в рамках предположения открытого мира это не интерпретируется как отсутствие лицензии |
| Аксиома классификации        | $RestrictedObject \equiv IntellectualPropertyObject \cap \exists hasRestriction.CommercialUse$   |
| Результат логического вывода | $X \in RestrictedObject$   |
| <i>DL</i> -запрос            | <i>IntellectualPropertyObject and hasRestriction some CommercialUse</i>  |
| Рекомендация СППР            | объект требует дополнительной правовой проверки перед использованием   |

Таблица 3 – *DL*-запросы и интерпретация результата

| Тип запроса                            | <i>DL</i> -запрос                                      | Интерпретация результата  |
|--|--|---|
| Поиск объектов с патентными признаками | ОбъектПатентногоПрава and (имеет признак some Новизна) | выявление объектов, потенциально относящихся к патентному праву |
| Поиск объектов с ограничениями         | <i>IObject and (hasRestriction some CommercialUse)</i> | выделение объектов, требующих правовой проверки                 |
| Поиск неполных описаний                | <i>IObject and not (hasLicense some License)</i>       | выявление объектов с неопределённым лицензионным статусом       |

### 3.5 Экспериментальная оценка онтологической модели

Для проверки работоспособности разработанной ОМ проведена экспериментальная апробация в среде *Protégé* с использованием МЛВ *HermiT*. Задачи эксперимента заключались в оценке времени выполнения ЛВ, количества автоматически полученных фактов и степени совпадения результатов МЛВ с экспертной проверкой. В экспериментальный набор включены экземпляры объектов авторского права, патентного права, средств индивидуализации и объектов с ограничениями использования. Для каждого экземпляра заданы исходные утверждения о принадлежности к классу, наличии признаков, ограничений, лицензии, правообладателя и условий регистрации.

Проверка проводилась для трёх наборов данных: 100, 150 и 200 экземпляров. Для каждого набора запуск классификации выполнялся три раза, в таблице 4 приведено среднее значение времени работы МЛВ. Под автоматически выведенными фактами понимаются новые утверждения МЛВ о принадлежности экземпляров к классам и наличии дополнительных связей. Эти связи формируются после выполнения МЛВ. Результаты проверки представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Экспериментальная оценка логического вывода

| Количество классов | Количество экземпляров | Время логического вывода, с | Явно заданные факты | Автоматически выведенные факты | Совпадение с экспертной проверкой |
|--------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 60                 | 100                    | 1,6                         | 315                 | 86                             | 94%                               |
|                    | 150                    | 2,4                         | 472                 | 129                            | 93%                               |
|                    | 200                    | 3,2                         | 628                 | 171                            | 92%                               |

Результаты эксперимента показывают, что увеличение числа экземпляров от 100 до 200 приводит к росту времени МЛВ с 1,6 до 3,2 с. Это свидетельствует о возможности интерактивного использования модели в составе СППР. Число автоматически выведенных фактов составило около 27% от количества явно заданных утверждений для всех экземпляров. Это подтверждает, что разработанная ОМ обеспечивает семантическое обогащение данных. Сопоставление результатов автоматической классификации с экспертной проверкой показало совпадение на уровне 92–94%. Основные расхождения связаны с неполным описанием отдельных экземпляров и отсутствием уточняющих свойств, необходимых для однозначной классификации. Качество вывода зависит не только от структуры аксиом, но и от полноты исходного наполнения модели.

### Заключение

В работе предложена методика построения онтологии ПрО ИнП, ориентированная на использование в СППР и включающая этапы формализации аксиом, автоматического вывода, формирования *DL*-запросов и отбора допустимых альтернатив.

В разработанной ОМ использован *OWL DL*, содержится более 60 концептов, свойства объектов и набор логических ограничений. Её применение позволяет классифицировать объекты ИнП, выявлять неявные связи, определять случаи неполного описания и формировать основания для последующей экспертной проверки.

Проверка ОМ в среде *Protégé* с использованием МЛВ *Hermit* показала приемлемое время выполнения логического вывода при наборах из 100–200 экземпляров, а также возможность автоматического получения дополнительных фактов, не заданных в модели явно. Совпадение результатов с экспертной проверкой на уровне 92–94% подтверждает применимость предложенного подхода для задач предварительного анализа и ППР в ПрО ИнП.

### Список источников

- [1] *Casellas N.* Legal Ontology Engineering: Methodologies, Modelling Trends, and the Ontology of Professional Judicial Knowledge (Law, Governance and Technology Series, 3) 2011th Edition. Springer. 320 p.
- [2] *Калиниченко Л.А.* Эффективная поддержка баз данных с онтологическими зависимостями: реляционные языки вместо дескриптивных логик. *Программирование*. 2012. Т.38. №6. С.45-62.
- [3] *Миронов В.В., Миронов К.В.* МП-целостность при проектировании реляционных моделей баз данных. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №4(58). С.552-565. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-552-565.
- [4] *Валькман Ю.Р., Хала Е.А.* Проектирование онтологии для правовой предметной области на основе текстового контента с использованием нечёткой логики. *Онтология проектирования*. 2014. №2. С.19-37.
- [5] *Липшин В.А.* Онтологии в информационных системах. М.: Научный мир, 2020. 224 с.
- [6] *Hoekstra R., Breuker J., Di Bello M., Alexander B.* LKIF Core: Principled Ontology Development for the Legal Domain. In book: Law, Ontologies and the Semantic Web. January 2009. DOI: 10.3233/978-1-58603-942-4-21.
- [7] *Понкин И.В., Редькина А.И.* Цифровые онтологии права и цифровое правовое пространство. *Пермский юридический альманах*. 2019. №2. С.24-37.
- [8] *Малых А.А., Манцивода А.В.* Объектно-ориентированная дескриптивная логика. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика*. 2011. Т.4, №1. С.57-72.

- [9] **Миролюбова С.Ю.** Правовые онтологии в машиночитаемом формате – инструмент продвижения юридических знаний в семантической сети. *Мониторинг правоприменения*. 2022. № 1(42). С.39-44. DOI: 10.21681/2226-0692-2022-1-39-45.
- [10] **Вахитов А.Р., Новосельцев В.Б.** Преимущества дескриптивной логики при обработке знаний. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2008. №5. С.73-76.
- [11] **Giri K., Gokhale P.** Developing a banking service ontology using Protégé, an open source software. *Annals of Library and Information Studies*. December 2015. Vol. 62. P.281-285.
- [12] **Константинова Н.С., Митрофанова О.А.** Онтологии как системы хранения знаний. *Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы»*. Санкт-Петербургский государственный университет, 2008. 54 с.
- [13] **Тузовский А.Ф.** Работа с онтологической моделью организации на основе дескриптивной логики. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2006. Т.309. №7. С.134-137.
- [14] **Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2001. 384 с.
- [15] **Сычёв О.А., Пенской Н.А., Терехов Г.В.** Метод разработки интеллектуальных тренажёров на основе онтологии предметной области. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №1. С.67-81. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-67-81.
- [16] **Понкин И.В.** Онтологии как инструментарий прикладной аналитики. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023. Т.11. №2. С.77-84.
- [17] **Борисова А.А., Гаршина В.В.** Разработка и реализация онтологии в сфере интеллектуальной собственности. *Труды молодых учёных факультета компьютерных наук ВГУ: Сб. ст. ВГУ*. 2024. Выпуск 4. С.323-328.
- [18] **Борисова А.А.** Разработка онтологии в юридической деятельности на примере трудового права. *Цифровая трансформация социальных и экономических систем: материалы международной научно-практической конференции / Отв. ред. И.А. Королькова; Моск. ун-т им. С.Ю. Витте. М.: изд. МУ им. С.Ю. Витте. 2023. С.558-565.*
- [19] **Плешкова А.Ю.** Онтологии в управлении образовательным процессом. *Онтология проектирования*. 2022. Т.12, №4(46). С.506-517. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-4-506-517.
- [20] **Боргест Н.М.** Ключевые термины онтологии проектирования: обзор, анализ, обобщения. *Онтология проектирования*. 2013. №3(9). С.9-31.
- 

### Сведения об авторе

**Борисова Алла Александровна**, 1981 г. рождения. Окончила исторический факультет ВГУ (2004), к.и.н. (2008), юридический факультет Московского университета им. С.Ю. Витте (2012), магистратуру по направлению «Математика и компьютерные науки» (2024). Доцент кафедры информационных систем факультета компьютерных наук ВГУ. В списке научных трудов более 60 работ. Author ID (РИНЦ): 672151. ORCID: 0009-0001-7264-947X. [borisova\\_a\\_a@sc.vsu.ru](mailto:borisova_a_a@sc.vsu.ru).



---

Поступила в редакцию 12.03.2026, после рецензирования 04.05.2026. Принята к публикации 12.05.2026.

---



## Construction of a legal ontology for decision support

© 2026, A.A. Borisova

Voronezh State University (VSU), Voronezh, Russia

### Abstract

An approach to constructing an ontology for the intellectual property domain, intended for use in decision support systems, is proposed. The relevance of this work is associated with the fact that conventional relational models are primarily oriented toward storing explicitly defined information and do not fully account for semantic relationships, regulatory constraints, and logically derived dependencies between objects. The paper utilizes descriptive logic and the OWL DL language as a formal foundation. The developed ontology includes a class hierarchy, a system of object properties, and a set of axioms. These axioms define the conditions for object membership in classes, as well as limitations and exceptions. The model was implemented in the Protégé environment using logical inference, which provides automatic classification of instances, model consistency checking, and identification of implicit relationships. The developed methodology includes the construction of the ontological model, procedures for generating queries, selection of admissible alternatives, and generation of recommendations for a decision support system. It is demonstrated that the application of the ontological model enables the transition from the descriptive representation of domain knowledge to its operational use in the analysis of intellectual property. The proposed approach ensures extensibility of the knowledge model, consistency of its structure, and the possibility to process partially specified information, making it applicable to the design of decision support systems in legally significant and semantically complex domains.

**Keywords:** legal ontology, descriptive logic, logical inference, decision support systems, intellectual property law.

**For citation:** Borisova AA. Construction of a legal ontology for decision support [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 327-340. DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-2-327-340.

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

### List of figures and tables

Figure 1 – Structure of the applied domain ontology for decision support

Figure 2 – Class hierarchy

Figure 3 – Object property hierarchy

Figure 4 – Examples of DL queries to the ontology

Figure 5 – Example of a transitive relationship for the “Database” instance

Figure 6 – Example of an object instant after logical inference

Table 1 – Components of the ontological model

Table 2 – Decision-making scenario under incomplete information

Table 3 – DL queries and interpretation of results

Table 4 – Experimental evaluation of logical inference

### References

- [1] Casellas N. Legal Ontology Engineering: Methodologies, Modelling Trends, and the Ontology of Professional Judicial Knowledge (Law, Governance and Technology Series, 3) 2011th Edition. Springer. 320 p.
- [2] Kalinichenko LA. Efficient support of databases with ontological dependencies: relational languages instead of description logics [In Russian]. *Programming and Computer Software*. 2012; 38(6): 45–62.
- [3] Mironov VV, Mironov KV. AM-integrity in designing relational database models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(4): 552-565. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-552-565.
- [4] Valkman YuR, Hala CA. Ontology design based on the text content with fuzzy logic for legal domain [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2014; 2(12): 19–37.
- [5] Lapshin VA. Ontologies in Information Systems [In Russian]. Moscow: Nauchny Mir Publ.; 2020. 224 p.

- [6] **Hoekstra R., Breuker J., Di Bello M., Alexander B.** LKIF Core: Principled Ontology Development for the Legal Domain. In book: Law, Ontologies and the Semantic Web. January 2009. DOI: 10.3233/978-1-58603-942-4-21.
- [7] **Ponkin IV, Redkina AI.** Digital ontologies of law and digital legal space [In Russian]. Perm Legal Almanac. 2019; 2: 24–37.
- [8] **Malykh A.A., Mantsivoda A.V.** Object-Oriented Description Logic [In Russian]. *Proceedings of Irkutsk State University. Series: Mathematics*. 2011; 1: 57–72.
- [9] **Mirolubova SYu.** Legal ontologies in a machine-readable format: a tool for navigating legal knowledge in the semantic web [In Russian]. *Monitoring of Law Enforcement*. 2022; 1(42): 39–44. DOI: 10.21681/2226-0692-2022-1-39-45.
- [10] **Vakhitov AR, Novoseltsev VB.** Advantages of description logic in knowledge processing [In Russian]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2008; 5: 73–76.
- [11] **Giri K, Gokhale P.** Developing a banking service ontology using Protégé, an open-source software. *Annals of Library and Information Studies*. 2015; 62: 281–285.
- [12] **Konstantinova NS, Mitrofanova OA.** Ontologies as knowledge storage systems [In Russian]. *All-Russian Competitive Selection of Review and Analytical Articles in the Priority Area “Information and Telecommunication Systems”*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University. 2008. 54 p.
- [13] **Tuzovskiy AF.** Working with an Ontological Model of an Organization Based on Description Logic [In Russian]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2006: 309(7): 134–137.
- [14] **Gavrilova TA, Khoroshevsky VF.** Knowledge bases of intelligent systems [In Russian]. Saint Petersburg: Piter Publ.; 2001. 384 p.
- [15] **Sychev OA, Penskoj NA, Terekhov GV.** A method for developing intelligent simulators based on ontology of the subject domain [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2025; 15(1): 67–81.
- [16] **Ponkin IV.** Ontologies as a tool for applied analytics [In Russian]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023; 11(2): 77–84.
- [17] **Borisova AA, Garshina VV.** Development and implementation of an ontology in the field of intellectual property [In Russian]. In: *Proceedings of Young Scientists of the Faculty of Computer Science, Voronezh State University*. Voronezh; 2024: 323–328.
- [18] **Borisova AA.** Ontology development in legal practice: a case study of labor law [In Russian]. In: *Digital Transformation of Social and Economic Systems. Proc. of the Int. Scientific and Practical Conf.*; ed. by IA Korolkova. Moscow: Moscow Witte University Publ.; 2023: 558–565.
- [19] **Pleshkova AYu.** Ontologies in educational process management [In Russian]. *Ontology of designing*. 2022; 12(4): 506–517. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-4-506-517.
- [20] **Borgest NM.** Key terms of ontology of designing: review, analysis, generalizations [In Russian]. *Ontology of designing*. 2013; 3(9): 9–31.
- 

## About the author

**Alla Aleksandrovna Borisova** (b. 1981) graduated from the Faculty of History of Voronezh State University in 2004, Candidate of Historical Sciences in 2008, graduated from the Faculty of Law of Moscow Witte University in 2012, and completed a Master’s degree in Mathematics and Computer Science in 2024. She is an Associate Professor at the Department of Information Systems, Faculty of Computer Science, Voronezh State University. She is the author of more than 60 scientific publications. Author ID (RSCI): 672151. ORCID: 0009-0001-7264-947X. [borisova\\_a\\_a@sc.vsu.ru](mailto:borisova_a_a@sc.vsu.ru).

---

*Received March 12, 2026. Revised May, 04. 2026. Accepted May, 12. 2026.*

---



## Построение графа знаний предметной области на основе открытых электронных словарей

© 2026, Н.А. Евстифеева ✉, И.А. Ширеторова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (МИСиС), Москва, Россия

### Аннотация

Рассматривается построение графа знаний с целью объединения знаний по химии, физике и физической химии в области водородной энергетики и технологических процессов получения водорода. Разработанный граф знаний содержит формализацию семантических связей и абстрактную организацию классов, сопоставимую с онтологиями предметной области. Описана система поддержки принятия решений для расширения графа знаний на основе алгоритма многокритериальной оценки валидации внешних источников данных в виде открытых электронных словарей. При валидации источника терминологических данных предметной области в системе поддержки принятия решений используется Интернет-сервис стандартизованной оценки. Собранные в интерфейсе оценочные средства автоматически предоставляют данные для экспертного заключения с принятием решения и собирают дополнительные данные для нейронной сети, которая обучается верификации внешних источников на прецедентах с экспертным решением. Граф знаний содержит 23,5 тысячи уникальных сущностей, представленных на русском языке с дублированным значением на английском языке.

**Ключевые слова:** граф знаний, онтологическая модель, предметная область, электронный словарь, многокритериальная оценка, открытые сервисы, валидация онтологии.

**Цитирование:** Евстифеева Н.А., Ширеторова И.А. Построение графа знаний предметной области на основе открытых электронных словарей. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.341-354. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-341-354.

**Вклад авторов:** Евстифеева Н.А. – разработка графа знаний; формализация обратной связи и ситуационного управления; Ширеторова И.А. – выбор внешних сервисов для оценки; разработка программного комплекса.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Введение

Современные большие языковые модели (БЯМ) имеют склонность к галлюцинациям. Для устранения галлюцинаций в ответах БЯМ используются мультиагентный подход или технологии, связанные с дополнительной оценкой и принятием решения (ПР) [1]. Для увеличения глубины знаний БЯМ в предметной области (ПрО) часто применяются генерация с расширением через поиск (*Retrieval Augmented Generation, RAG-архитектура*) и выравнивание с применением метода адаптации предварительно обученной модели [2].

Онтологические модели (ОМ) ПрО используются для формирования границ информационных полей ПрО, покрывающих большие области знаний. Это позволяет формализовать разрабатываемую модель знаний как граф знаний (ГЗ) в мультиграфовой объектно-ориентированной структуре. *Целью данной статьи* является разработка структурированной модели знаний ПрО, ограниченной физическими и химическими процессами, технологиями и инженерными решениями для технологического процесса получения водорода. Для этого необходимо построить алгоритм автоматического мониторинга информационного пространства ПрО с автоматизацией оценки и последующего ПР по валидации внешнего источника данных с целью расширения разработанного ГЗ.

Декомпозиция поставленной цели привела к решению двух задач: разработка специализированной структуры ГЗ и первичное её наполнение на основе подобранного экспертами корпуса текстов; создание средств для расширения ГЗ за счёт знаний из тематически близких открытых Интернет-источников, которые можно типизировать как Ом ПрО. Для решения задачи расширения разработанной структуры необходима система многокритериальной оценки и валидации источника в виде электронного словаря (ЭлС).

## 1 Онтологическая модель в формализме графа знаний

В компьютерной реализации структуры текстовой информации ПрО при построении Ом часто используется набор представительских примитивов [3]. В данной статье под представительскими примитивами понимаются: классы и множество их экземпляров; атрибуты, являющиеся свойствами классов и их экземпляров; отношения, характеризующие связи между экземплярами классов. Словари ПрО формально причисляются к онтологиям, но не все словари могут считаться Ом ПрО [4].

В Интернете доступны открытые источники в виде ЭлС по различным ПрО в форме глоссариев, тезаурусов, семантических словарей и др. Они отличаются по структуре данных и по составу содержащейся информации. Для компьютерного представления Ом принято использовать *Resource Description Framework (RDF)*, который согласуется с *Ontology Web Language (OWL)* [5]. Применимость открытых источников из Интернета для автоматизации процесса расширения ГЗ как Ом ПрО зависит от их состава и структуры и требует дополнительной оценки с ПР [6, 7].

Онтологии делятся на три класса: онтологии верхнего уровня, онтологии ПрО и прикладные онтологии [8]. Большинство известных онтологий в рассматриваемой ПрО либо узкоспециализированы, либо формализованы из базовых объектов ПрО и не имеют междисциплинарных связей, характерных для водородной энергетики [9].

Разработанная модель представляет собой гибридную структуру, сочетающую свойства ГЗ и Ом, предназначена для структурирования и объединения междисциплинарных знаний из разнородных источников [10].

На рисунке 1 представлена диаграмма классов верхнего уровня разработанного ГЗ.

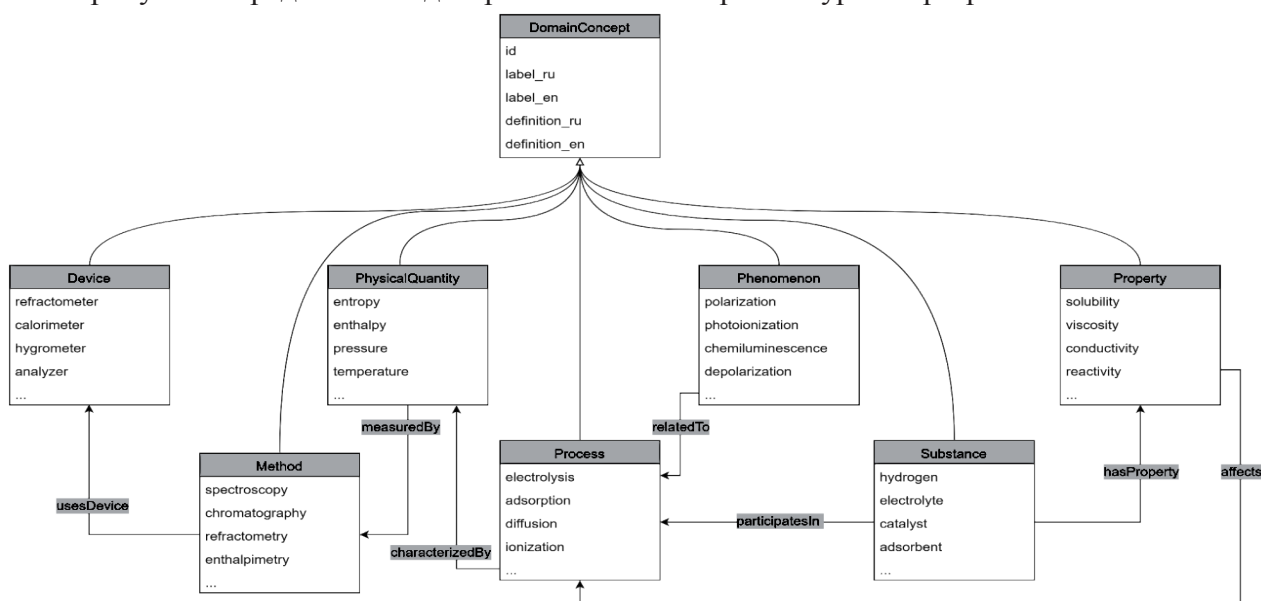


Рисунок 1 – Диаграмма классов верхнего уровня разработанного графа знаний

Базовый класс *DomainConcept* задаёт общие атрибуты понятий ПрО, включая идентификаторы, наименования и определения. Производные классы *Substance*, *Process*, *Property*, *PhysicalQuantity*, *Method*, *Device* и *Phenomenon* формируют семантическую структуру ГЗ, которая включает отношения, соответствующие предикатам: *hasProperty*, *participatesIn*, *characterizedBy*, *measuredBy*, *usesDevice*, *relatedTo*, *affects*.

Все вершины в разработанном ГЗ представляют собой фреймы, которые приведены к стандарту представления данных *OWL* и включают классы *owl:Class* либо экземпляры классов *owl:NamedIndividual*. Атрибуты вершин ГЗ представляют собой слоты фреймов, типизированные по свойствам и методам, и в рамках *OWL* им сопоставлены: *owl:DatatypeProperty* для типа слотов свойства из ГЗ; слоты, отражающие функциональные и семантические связи в ГЗ, которые соответствуют объектным свойствам *owl:ObjectProperty*. Триpletное представление знаний в разработанном ГЗ вида *subject-predicate-object* (*SPO*) соответствует структуре *RDF/OWL*, где субъект и объект интерпретируются как индивидуумы или классы, а предикат – как объектное свойство, задающее отношение между ними. Иерархическая структура классов отображается в виде отношений наследования *rdfs:subClassOf*.

## 2 Сравнение графа знаний с открытыми электронными словарями

Применение машинного перевода с учётом специфики ПрО в рамках БЯМ показывает высокое качество результатов [10]. Для оценки качества автоматического перевода с английского языка на русский сформирована контрольная выборка из 100 терминов, случайным образом отобранных из химических и физико-химических групп ГЗ. Экспертная проверка показала, что 84% переводов являются полностью корректными, 11% – частично корректными и требуют редакторской правки, а 5% – некорректными. Это позволяет использовать машинный перевод как рабочий инструмент первичного пополнения при расширении ГЗ в автоматическом режиме из англоязычных открытых источников.

В качестве примера приведены ОМ из области химии, которые представляют собой ЭлС на английском языке. Они покрывают разные аспекты ПрО и поддерживаются проектными экспертными группами в ручном режиме обновления.

- *Chemical Entities of Biological Interest (ChEBI)* является онтологией в виде тезауруса, активно используемого с 2008 года [11], содержит описание малых молекул и биологически значимых веществ.
- *Chemical Functional Ontology (ChemFOnT)* – это иерархическая онтология, содержащая функции и роли химических веществ. Она содержит более 341000 химических веществ и 515000 терминов и определений, структурированных в четыре базовых функциональных аспекта, 12 суперкатегорий и более 173700 ветвлений внутри иерархии [12].
- *Chemical Methods Ontology (CMO)* является ОМ, ориентированной на описание аналитических методов, например методов масс-спектрометрии, хроматографии и др. [13]. Термины построены на основе *IUPAC Orange Book*<sup>1</sup>. Онтология имеет более 3000 классов.

Количественная оценка перекрытия терминологии между открытыми онтологиями и разработанным ГЗ проводилась на основе сопоставления векторных представлений терминов, сформированных с использованием многоязычной нейросетевой модели (*НСМ paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2*). С её помощью получены семантические представления пар на русском и английском языках для терминов. Векторизация выполнялась по нормализованным и лематизированным текстовым представлениям пар терминов, а текстовые определения использовались как дополнительный контекст при экспертной проверке пограничных случаев. Векторное представление формировалось по всей фразе целиком без усреднения отдельных слов, что позволяло учитывать контекстное значение. В качестве меры близости использовалась косинусная метрика, а термин считался покрытым при превышении

<sup>1</sup> Gold Book. Compendium of Chemical Terminology. Version 5.0.0. (14588 Terms). <https://goldbook.iupac.org/>.

порогового значения сходства 0.7. Результаты показали, что степень пересечения реализованного на первичном этапе ГЗ с рассматриваемыми онтологиями остаётся ограниченной и существенно зависит от их тематической направленности. Так, для онтологии *CHMO* общее покрытие составляет 2–3%. Онтология *ChemFont* показала более высокий уровень соответствия: *Structure* ~24%; *DomainConcept* ~13%; *Substance* ~12%. Однако общее покрытие полного словаря не превысило ~6%.

Проведённое сравнение показывает, что существующие онтологии могут быть использованы как внешние источники терминологии и частично – структурные ориентиры, однако не могут быть применены в качестве основы для ГЗ в ПрО, связанной с производством водорода. Необходимо расширить наполнение разработанного ГЗ знаниями разнородных типов, включая химические и физические закономерности, математические расчёты и инженерные решения, формализацию межсущностных связей в рамках единой семантической модели.

### 3 Оценка выбора источника данных для расширения графа знаний

На первом этапе расширения ГЗ как ОМ ПрО необходимо произвести оценку и принять решения по валидации ЭлС как источника данных. Разработанный алгоритм основан на ситуационной модели управления с применением обратной связи, как управляющего воздействия в случае принятия допустимости применения источника данных. При валидации источника производится предварительная коррекция данных, и верифицированный ЭлС приводится к стандартизованной модели с учётом особенностей разработанного ГЗ.

ГЗ имеет в качестве источников не только ЭлС, но и корпус текстов, подобранных экспертами, в виде документов, обеспечивающих расширенную информацию о ПрО. Схема программного комплекса представлена на рисунке 2. Корпус текстов подобран экспертной группой по заданной ПрО для автоматического анализа с целью построения ГЗ как ОМ по принципу триплетной формализации с представлением предиката в виде функциональной связи первого уровня.

В таком наполнении разработанного ГЗ данные ЭлС формируют базовую терминологическую основу классов и их экземпляров как ОМ ПрО, а корпус текстов увеличивает полноту междисциплинарного пересечения областей знаний. Модули, представленные на рисунке 2, позволяют проводить добавление источников текстовых данных с последующей реструктуризацией ГЗ. Валидация источников в форме ЭлС выполняется в два этапа: автоматическая оценка модулем с системой количественных критериев; автоматизированное экспертное решение с использованием системы поддержки и ПР.

Модуль многокритериальной оценки источников содержит два алгоритма, исполняемых в параллельных потоках: расчёт многокритериальной оценки; проверка на внешних сервисах по стандартизованным критериям. Внешние веб-сервисы для оценки источников подобраны

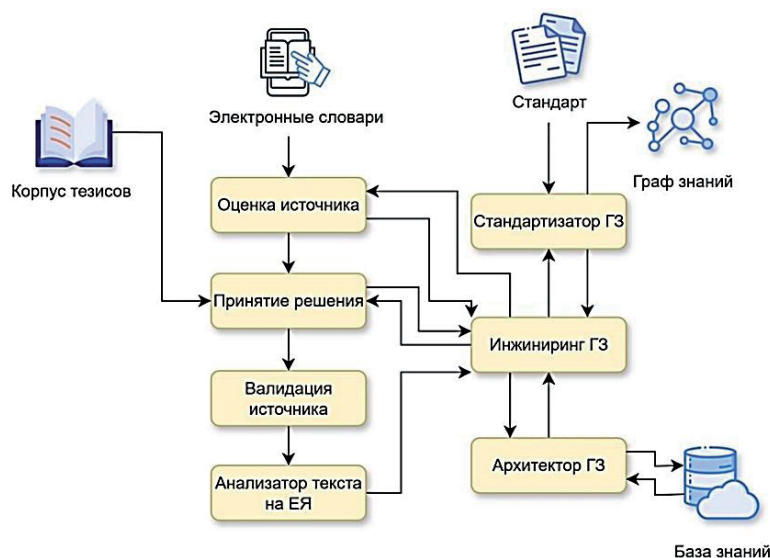


Рисунок 2 – Схема разработанного программного комплекса

в соответствии с международным стандартом ISO 25964 [14, 15], в котором указаны правила создания и обмена словарями и тезаурусами, включая мультязычные и совместимые по требованиям *Simple Knowledge Organization System (SKOS)*. Задачей *SKOS* является обеспечение представления тезаурусов и других видов онтологий в Интернете.

Сервис *Ontology Evaluation Framework* использован для оценки онтологий на непротиворечивость, полноту, когерентность и гибкость. С помощью *Ontology Recommender 2.0* можно по заданным параметрам, используемым как ключевые слова для поиска, подобрать онтологию с последующей оценкой по метрикам покрытия и валидации.

Для многокритериальной оценки источников разработаны пять групп критериев с индивидуальным весом для каждого критерия в группе:

- *надёжность*: открытость источника, *API*, *FAIR*-принципы (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable* – находимость, доступность, совместимость и пригодность);
- *масштабируемость*: совместимость с графовой моделью и *SPO*;
- *непротиворечивость*: уникальность, абсолютная частотная индивидуальная характеристика, относительная частотная парная характеристика, относительная частотная индивидуальная характеристика, синонимия, омонимия;
- *полнота*: объём классов, объём экземпляров, объём связей, полнота связанности, полнота элементов связи, полнота фрейма сущности;
- *формальная совместимость*: соответствие стандартам *RDF, OWL* и *SKOS*.

Для расчёта критерия соответствия *FAIR*-принципам в разработанном алгоритме используется Интернет-сервис *FAIR Ontology Testing (FOOPS!)* [16]. Оценки возможности использования Интернет-источника для расширения ГЗ, полученные с применением *FOOPS!*, позволяют верифицировать корректность используемых источников и служат встроенным в общий интерфейс разработанной системы инструментом для экспертной оценки.

По указанным группам критериев автоматически вычисляется поэтапная свёртка в соответствии с эмпирически подобранными весовыми коэффициентами значимости критериев. В процессе свёртки значений частных критериев используется взвешенная линейная комбинация, позволяющая получить интегральную оценку валидности источника, как сумму нормированных критериев с учётом их весовых коэффициентов. Последовательность выполнения многокритериальной оценки внешнего источника представлена на рисунке 3.

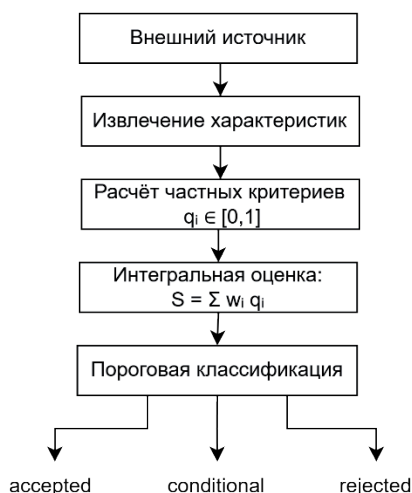


Рисунок 3 – Схема алгоритма многокритериальной оценки внешнего источника

Подбор весовых коэффициентов выполнялся на основе экспертной калибровки по контрольной выборке внешних источников данных. В оценке участвовали три эксперта, которые оценивали значимость пяти групп критериев для задачи расширения ГЗ по пятибалльной шкале с последующим усреднением и нормировкой результатов. В результате получены следующие значения весов: надёжность 0.30, полнота 0.25, непротиворечивость 0.20, масштабируемость 0.15 и формальная совместимость 0.10. Более высокие значения коэффициентов для надёжности и полноты обусловлены критической важностью достоверности источника и достаточности терминологической информации при расширении ГЗ.

Для проверки согласованности экспертных оценок использовался коэффициент Кендалла. При проведении анализа чувствительности веса варьировались в пределах 10% с последующим пересчётом итоговых оценок. Анализ показал, что для большинства источников итоговый класс сохраняется («условно принятый» – *conditional*, «принятый» – *accepted* и «отклонённый» – *rejected*). На основе разметки источников обучена

НСМ, позволяющая определять допустимость использования ЭлС для расширения ГЗ.

#### 4 Использование нейросетевой модели в условиях неоднозначности

Алгоритм ПР на основе НСМ повышает устойчивость системы в условиях неоднозначности. На вход модели подаётся вектор признаков, сформированный на основе агрегированных значений пяти групп критериев. Интегральный показатель в состав входных признаков не включается, что позволяет избежать влияния целевой переменной и обеспечивает корректность обучения модели. Архитектура НСМ включает два скрытых слоя размерности 16 и 8 нейронов с функцией активации *ReLU*. На выходе формируется вероятностная оценка принадлежности источника к одному из классов: принятый, условно принятый, отклонённый.

Обучение НСМ проводилось на выборке из 360 источников, размеченных экспертами. При формировании обучающей выборки экспертами учтено частичное пересечение значений критериев между классами, что позволило смоделировать реальные условия ПР. В качестве целевой переменной использовалась экспертная оценка допустимости интеграции источника. Для сопоставления использовалась базовая модель, основанная на пороговой классификации по интегральной оценке. Качество модели оценивалось с использованием стандартных метрик многоклассовой классификации. При разделении выборки в соотношении 80/20 тестовая часть составила 72 источника из 360 размеченных объектов. Базовая модель показала  $accuracy \approx 0.82$  и  $F1-score \approx 0.81$ , тогда как НСМ достигла  $accuracy \approx 0.89$  и  $F1-score \approx 0.89$ . Это показывает, что НСМ более устойчиво обрабатывает пограничные случаи, в которых базовая модель недостаточно учитывает их совместное влияние при линейной свёртке критериев. НСМ показала хорошую степень согласованности с экспертными решениями при сохранении способности к обобщению.

В качестве примера экспертной оценки внешнего источника с использованием разработанной системы ПР получены значения критериев надёжности 0.29, полноты 0.81, согласованности 1.00, масштабируемости 0.93 и формальной совместимости 0.78; итоговое значение критерия допустимости интеграции источника в ГЗ составило 0.732.

Анализ результатов валидации Интернет-источников показал, что НСМ позволяет корректировать решения, полученные на основе критериальной оценки. Для источников с высокой полнотой и надёжностью, но частично выраженной формальной совместимостью, линейная модель даёт заниженную итоговую оценку, относя такие источники к классу условно принятых; НСМ классифицировала их как принятые, учитывая совокупное влияние признаков. Для источников с неоднородной структурой НСМ в ряде случаев понижала оценку по сравнению с пороговым правилом, что позволяет избежать ложноположительных решений.

На рисунке 4 представлена матрица ошибок модели классификации. Анализ матрицы ошибок показывает, что НСМ демонстрирует высокую точность классификации, что выражается в преобладании значений на главной диагонали.

Функция потерь, представленная на рисунке 5, показывает устойчивую сходимость модели в процессе обучения, что свидетельствует о корректной настройке параметров модели и отсутствии выраженного переобучения.

Комбинация многокритериальной оценки и обучаемой НСМ обеспечивает баланс между интерпретируемостью и адаптивностью принимаемых решений, а полученные результаты показывают работоспособность предложенного подхода.

Для оценки применимости разработанного ГЗ проведён эксперимент по сравнению ответов БЯМ в двух режимах: без использования ГЗ; с использованием структурированного контекста, извлекаемого из ГЗ. Тестовая выборка формировалась автоматически на основе терминов и определений, входящих в разработанный ГЗ. Для каждого элемента из тестовой выборки извлекалось определение термина и выполнялась автоматическая оценка семантического соответствия эталонному определению с выявлением признаков галлюцинаций.

Оценка качества ответов проводилась автоматически на основе косинусного сходства векторных представлений, проверки появления отсутствующих в ГЗ терминов и числовых значений. На рисунке 6 представлены результаты сравнения двух режимов.

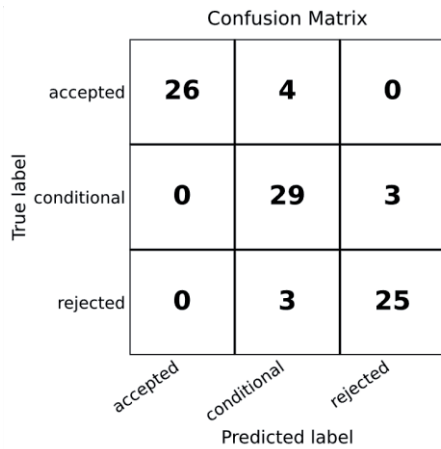


Рисунок 4 – Матрица ошибок нейросетевой модели классификации источников

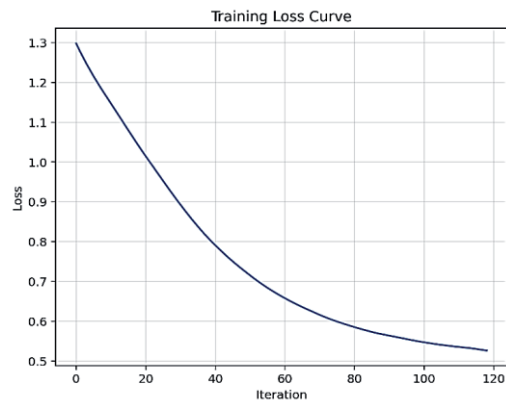


Рисунок 5 – Кривая функции потерь в процессе обучения нейросетевой модели

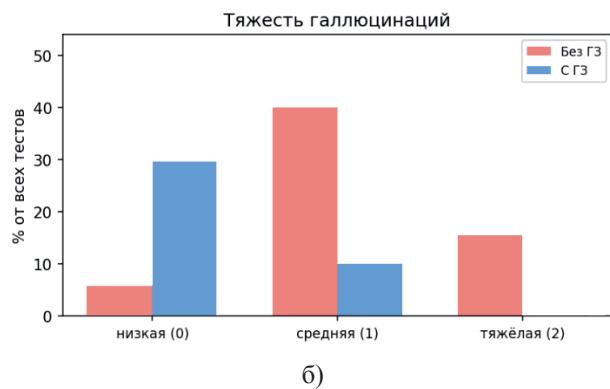
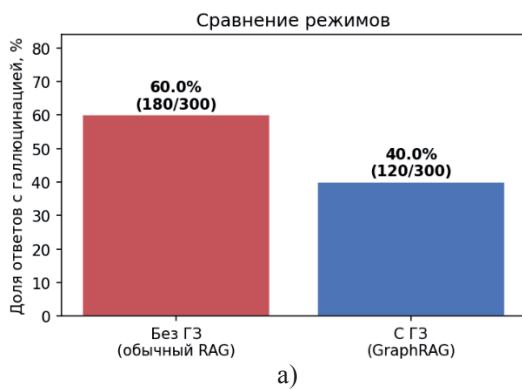


Рисунок 6 – Сравнение доли (а) и тяжести галлюцинаций (б) большой языковой модели при использовании графа знаний

Полученные результаты подтверждают, что структурированный ГЗ может использоваться как внешний источник достоверного контекста для уменьшения генерации недостоверной информации БЯМ.

Трудности возникли при агрегировании данных ЭлС как между собой, так и с ГЗ, построенным по корпусу текстов. Это связано со сложностью обобщения вершин итогового ГЗ с формализацией нескольких типов связей для любой вершины, а также фактическим участием вершин в семантически разнотипных предикатах. Такая многозначность необходима для получения полного описания возможных сценариев технологических процессов в ПрО и требует подбора алгоритмов разрешения неоднозначностей при структуризации данных для максимальной сохранности представленных знаний [17, 18].

## 5 Расширение разработанного графа знаний

ГЗ является ориентированным, взвешенным и непланарным мультиграфом. Рёбрами ГЗ являются предикаты из триплетного представления знаний. В качестве предикатов для сохранения подробных семантических связей определяются глагольные грамматические конструкции, выражающие функциональные связи в ГЗ. Такая структура является базовым ГЗ

(БГЗ), на основе которого с применением алгоритма интеллектуальной обработки строятся иерархические связи между вершинами – экземплярами классов, формализованными в итоговом ГЗ. Вершины БГЗ классифицируются на два типа фреймов: объекты и субъекты. Каждый фрейм вершины разработанного ГЗ сформирован из слотов со специальной информацией и двух типов семантически значимых слотов: свойства и метод. Свойства – сущности, которые не отнесены в анализируемом предложении к субъекту/объекту, но характеризуют субъект либо объект, например, прилагательными или числовыми значениями. К методам относятся функциональные связи второго уровня, которые лингвистически представляют собой причастный или деепричастный обороты. При этом в итоговом БГЗ в слотах типа методы присутствуют только сами причастия или деепричастия, а все другие составные члены причастного или деепричастного оборота трансформируются в слоты с типом свойство.

Так как выделение триплетов из корпуса текстовой информации выполняется автоматически и сопровождается пополнением уже реализованного ГЗ, на этапе извлечения могут формироваться неуникальные триплеты. Поэтому первоначальный набор триплетов рассматривается как мультимножество, в котором один и тот же триплет может иметь несколько вхождений. При построении БГЗ выполняется переход к множеству уникальных триплетов с сохранением информации о частоте их появления:  $Tr_{unique} = \{tr_i \mid freq(tr_i) \geq 1\}$ , где  $tr_i = (s_i, p_i, o_i)$  – триплет, включающий субъект, предикат и объект, а  $freq(tr_i)$  – число его вхождений в исходное мультимножество. Совокупность субъектов образует множество  $S$ , совокупность предикатов – множество  $P$ , а совокупность объектов – множество  $O$ . Множество вершин БГЗ формируется как объединение субъектов и объектов:  $V = S \cup O$ , предикаты задают рёбра между ними. Такое представление позволяет одновременно устранить дублирующиеся триплеты при построении структуры графа и сохранить частотные характеристики их появления в модели данных.

Формализация мультимножества, состоящего из триплетов, сохраняется в реляционной модели данных как трёхмерная матрица из отношений частоты встречаемости сочетаний субъекта, предиката и объекта в моделируемой ПрО. Данная матрица используется при анализе с целью выделения иерархических связей и пересчитывается в относительную частоту по типу векторной модели *TF-IDF* [19].

Для полноты и однозначности представления сущностей в БГЗ необходимо провести оценку с установлением матрицы соответствия между вершинами БГЗ и слотами фреймов, типизированными как свойства. В результате работы алгоритма данные остаются во множественном представлении, что увеличивает эффективность анализа для выявления признакового пространства вершин графа [20, 21].

Слоты, типизированные как свойства и методы, объединяются в рамках одного уровня иерархии, вошедших в выделенный класс, и автоматически проверяются на синонимичность и близость по метрике косинусного сходства в рамках векторной модели. Значения слотов атрибутов, признанные синонимичными, формализуются как одно значение и позиционируются как атрибут реляционного отношения. Так как реляционное отношение не может иметь повторяющихся атрибутов, класс получает свойства и методы без повторений [22, 23].

Наследование от нижнего уровня иерархии к верхнему обеспечивается расширением реляционного отношения на каждом уровне с сохранением всех атрибутов предыдущих уровней, определённых как свойства и методы классов-наследников. Процесс обновления структуры классов в части свойств и методов включает анализ выявления свойств и методов, уже имеющихся в классе, и добавляемых: однотипных, идентичных, синонимов и антонимов.

Основным источником химических терминов, использованных при расширении ГЗ, является пятая редакция *IUPAC Gold Book*, опубликованная Международным союзом чистой и

прикладной химии и содержащая 12380 терминов на английском языке. Пример добавленного в ГЗ термина показан на рисунке 7.

```
[
  {
    "id": "f7afaeb1d0574d2ae2eaac8ec14af3ccea18cb2e3d481935383efaa081d7cb33",
    "topic_id": "a5b231852fa5e23b140828f83253901ce3f4a4915a118c3e3a0c430b6e544c06",
    "raw_text": "AM 0 солнечный свет",
    "cleaned_text": null,
    "lemmatized_text": "am 0 солнечно свет",
    "first_letter": "a",
    "language": "ru",
    "info": "Auto-generated from dataset",
    "created_at": "2025-07-16T17:10:20.052454",
    "descriptions": [
      {
        "id": "fc6e0068cc9833f7c3e065713b2db8287de308a87950f03e6d4e459b3e1ac910",
        "word_id": "f7afaeb1d0574d2ae2eaac8ec14af3ccea18cb2e3d481935383efaa081d7cb33",
        "raw_text": "Солнечное излучение в космосе непосредственно над атмосферой Земли",
        "cleaned_text": null,
        "lemmatized_text": "солнечн излучен космос непосредствен атмосфер земл плоскост",
        "language": "ru",
        "info": null,
        "created_at": "2025-07-16T17:10:20.091815",
        "embeddings": []
      }
    ]
  },
  "triplets": []
]
```

Рисунок 7 – Пример добавленного в граф знаний термина из *IUPAC Gold Book*

Каждая запись вершины ГЗ представлена в виде структурированного объекта со следующими атрибутами:

- id – уникальный идентификатор сущности (вершины) в ГЗ;
- topic\_id – идентификатор тематического кластера (класса), к которому отнесена данная сущность в иерархии ГЗ;
- raw\_text – текстовое представление термина, извлечённое из источника;
- cleaned\_text – очищенное текстовое представление;
- lemmatized\_text – лемматизированное представление термина, используемое для унификации и сопоставления сущностей;
- first\_letter – первая буква термина, используемая для индексирования и оптимизации поиска;
- language – язык термина;
- info – служебная информация о происхождении записи (например, источник);
- created\_at – временная метка создания записи;
- descriptions – список описаний сущности, представленных в виде вложенных объектов.

Каждый элемент списка *descriptions* включает:

- id – уникальный идентификатор описания;
- word\_id – ссылка на идентификатор сущности, к которой относится описание;
- raw\_text – исходный текст описания;
- cleaned\_text – очищенное представление текста описания;
- lemmatized\_text – лемматизированное описание;
- language – язык описания;
- info – дополнительная служебная информация;
- created\_at – временная метка создания описания;
- embeddings – векторное представление описания, используемое для задач семантического анализа.

Поскольку *JSON*-структура содержит не только содержательные элементы сущности, но и служебные поля, то элементы сопоставляются как с классами разработанного ГЗ, так и с атрибутами и свойствами *RDF/OWL*.

Для расширения терминологической базы выбраны пять валидированных источника, относящихся к трём областям знаний:

- для химической области: 5-ая редакция *IUPAC Gold Book*, опубликованная Международным союзом чистой и прикладной химии и содержащая 12380 терминов на английском языке;
- для физической области: физико-математический словарь-справочник (содержит 4500 статей на русском языке и переводом на английский и немецкий языки) [24]; англо-русский словарь по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (содержит около 3 тыс. англоязычных терминов с русским толкованием) [25];
- для физико-химической области: *Physical Chemistry* (содержит около 650 англоязычных терминов по термодинамике, химическому равновесию, кинетике, квантовой химии и т.д.); *Atkins' Physical Chemistry* (включает около 1000 терминов по термодинамике, химической кинетике, молекулярной структуре, спектроскопии и статистической термодинамике).

Формализация специальных данных системного характера, позволяет обеспечить связанность структур ГЗ с источниками текстовой информации, которые хранятся как физические объекты и в виде ссылок. В связи с большой размерностью, хранилище подвергается дополнительному архивированию и структуризации с предварительной обработкой для сокращённого представления текстовых фрагментов или структур данных в быстром доступе и ссылками на полное представление объектов в архиве.

Оценка расширения ГЗ внешними источниками приведена в таблице 1. Из таблицы видно значительное увеличение числа вершин и рёбер.

Таблица 1 – Количественная оценка графа знаний до и после расширения

| Показатель      | До расширения | После расширения | Прирост |
|-----------------|---------------|------------------|---------|
| Число вершин    | 2 327         | 23 532           | +21 205 |
| Число рёбер     | 6 814         | 68 120           | +61 306 |
| Плотность графа | 0.0025        | 0.012            | +0.0095 |

В таблице 2 указано число сущностей для каждого источника, использованного при расширении ГЗ. Наибольший вклад в расширение ГЗ обеспечил ресурс *IUPAC Gold Book*. Такое распределение подтверждает, что химический компонент остаётся ядром данной ПрО, а физика и физическая химия обеспечивают уточнение междисциплинарных связей.

Таблица 2 – Показатели расширения графа знаний по различным источникам для трёх предметных областей

| Источник  | Область          | Добавлено сущностей |
|---|------------------|---------------------|
| <i>IUPAC Gold Book</i>  | химия            | 12380               |
| Физико-математический словарь + словарь по физике плазмы        | физика           | 5792                |
| <i>Physical Chemistry Glossary + Atkins' Physical Chemistry</i> | физическая химия | 3001                |

## Выводы

Модель информационной системы разработана на основе модульной архитектуры и представляет собой масштабируемую платформу для подключения в качестве компонента *RAG*-архитектурного решения выравнивания БЯМ без дообучения в границах ПрО. Одним из основных модулей является комплекс ПР, который обеспечивает возможность многоуровневого оценивания внешних электронных ресурсов как Ом ПрО по признакам применимости для автоматического расширения ГЗ ПрО водородных технологий. Расширение ГЗ внешними ЭлС повысило качество ответов БЯМ за счёт структурирования характеристик и параметров, выделения синонимических групп и иерархических связей Ом ПрО.

- Разработанная модель данных предусматривает логико-семантические взаимосвязи между понятиями химии, физики, физической химии, инженерных технологий и обеспечивает совместимость по *RDF/OWL* с существующими онтологиями и открытыми словарями, автоматизируя категоризацию сущностей. ГЗ ориентирован на междисциплинарную интеграцию и включает связи между различными типами сущностей (например: «вещество участвует в процессе», «процесс характеризуется физической величиной», «метод использует устройство»).
- Система ПР обеспечивает автоматизацию сбора данных с последующим обучением НСМ по выбору наиболее валидного внешнего источника текстовой информации. Оценка качества НСМ составила значение 0,89.
- Из автоматически проанализированных предобученной НСМ 12 внешних источников терминологических данных пять были признаны валидными для интеграции в ГЗ. По экспертной оценке правильности отклонения семи источников были выявлены их несоответствия по критериям структурированности, полноты или совместимости с разработанной моделью ГЗ.
- Качество машинного перевода зависит от объёма переводимых токенов для каждого элемента ГЗ и составило 84–95%. Созданный ГЗ имеет более чем 23,5 тыс. сущностей на английском и русском языках в ПрО.
- В ходе экспериментальной оценки выявлен ряд ограничений связанных с качеством расширения ГЗ, которое зависит от полноты, непротиворечивости, однозначности и структуры внешних источников данных, а также от качества машинного перевода. Дополнительную сложность представляют омонимия терминов и различия терминологических традиций при интеграции междисциплинарных источников. При объединении большого количества ЭлС возрастает риск накопления ошибок сопоставления, дублирования сущностей и появления противоречивых определений. Требуется дополнительная адаптации используемой НСМ при переходе к другим ПрО.

### Список источников

- [1] *Jones C.R., Bergen B.K.* Large language models pass the Turing test [Электронный ресурс]. — arXiv:2503.23674. DOI: 10.48550/arXiv.2503.23674.
- [2] *Сидорова Е.А., Иванов А.И., Овчинникова К.А.* Извлечение информации из текстов на основе онтологии и больших языковых моделей. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.114–129. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-114-129.
- [3] *Darwish A.M., Rashed E.A., Khoriba G.* Mitigating LLM hallucinations using a multi-agent framework. *Information*. 2025. Vol.16, No.7. Art.517. DOI: 10.3390/info16070517.
- [4] *Beatty A.S., Kaplan R.M. (eds.)*. Ontologies in the behavioral sciences: Accelerating research and the spread of knowledge. Washington, DC: National Academies Press, 2022. 164 p. DOI: 10.17226/26464.
- [5] *Booshehri M. et al.* Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis. *Energy and AI*. 2021. Vol.5. Art.100074. DOI: 10.1016/j.egyai.2021.100074.
- [6] *Antonioni G., van Harmelen F.* The Semantic Web Primer. Cambridge: MIT Press, 2005. 238 p.
- [7] *Smith A.* Simple Knowledge Organization System (SKOS). *Knowledge Organization*. 2022. Vol.49, No.5. P.371–384. DOI: 10.5771/0943-7444-2022-5-371.
- [8] *An B. et al.* Accurate text-enhanced knowledge graph representation learning. *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL-HLT 2018)*. New Orleans, 2018. P.745–755. DOI: 10.18653/v1/N18-1068.
- [9] *Добров Б.В., Иванов В.В., Лукашевич Н.В., Соловьёв В.Д.* Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 176 с.
- [10] *Головин А.А., Жукова Н.А.* Построение графа знаний по телекоммуникационным данным. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №1(55). С.45–54. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-45-54.
- [11] *Küçük D.* OntoWind: An improved and extended wind energy ontology [Электронный ресурс]. arXiv:1803.02808. DOI: 10.48550/arXiv.1803.02808.

- [12] **Degtyarenko K. et al.** ChEBI: An Open Bioinformatics and Cheminformatics Resource. *Current Protocols in Bioinformatics*. 2009. Vol.14. P.14.9.1–14.9.20. DOI: 10.1002/0471250953.bi1409s26.
- [13] **Wishart D.S. et al.** ChemFOnT: The chemical functional ontology resource. *Nucleic Acids Research*. 2023. Vol.51, No.D1. P.D1220–D1229. DOI: 10.1093/nar/gkac919.
- [14] **Strömert P. et al.** Ontologies4Chem: The landscape of ontologies in chemistry // *Pure and Applied Chemistry*. — 2022. Vol.94, No.6. P.605–622. DOI: 10.1515/pac-2021-2007.
- [15] **ISO 25964-2:2013.** Information and documentation – Thesauri and interoperability with other vocabularies – Part 2: Interoperability with other vocabularies. <https://www.iso.org/standard/53658.html>.
- [16] **Alexiev V., Isaac A., Lindenthal J.** On the composition of ISO 25964 hierarchical relations (BTG, BTP, BTI). *International Journal on Digital Libraries*. 2016. Vol.17. P.39–48.
- [17] **FOOPS!** FAIR ontology testing. <https://w3id.org/foops/>. Ontology Pitfall Scanner for FAIR (Beta) [https://foops.linkeddata.es/FAIR\\_validator.html](https://foops.linkeddata.es/FAIR_validator.html).
- [18] **Paulheim H.** Knowledge graph refinement: A survey of approaches and evaluation methods. *Semantic Web*. 2017. Vol.8, No.3. P.489–508. DOI: 10.3233/SW-160218.
- [19] **Nickel M. et al.** A review of relational machine learning for knowledge graphs [Электронный ресурс]. arXiv:1503.00759. DOI: 10.48550/arXiv.1503.00759.
- [20] **Parhomenko P.A., Grigorev A.A., Astrakhantsev N.A.** A survey and an experimental comparison of methods for text clustering: Application to scientific articles. *Proceedings of the Institute for System Programming of RAS*. 2017. Vol.29, No.2. P.161–200. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(2)-6.
- [21] **Dorodnykh N., Yurin A.** Knowledge graph engineering based on semantic annotation of tables. *Computation*. 2023. Vol.11, No.9. Art.175. DOI: 10.3390/computation11090175.
- [22] **Tiddi I., Schlobach S.** Knowledge graphs as tools for explainable machine learning: A survey. *Artificial Intelligence*. 2022. Vol.302. Art.103627. DOI: 10.1016/j.artint.2021.103627.
- [23] **Gao T., Yao X., Chen D.** SimCSE: Simple contrastive learning of sentence embeddings. *Proceedings of EMNLP* 2021. P.6894–6910. DOI: 10.18653/v1/2021.emnlp-main.552.
- [24] **Алленицын А.Г., Бутиков Е.И.** Физико-математический словарь-справочник. Том 2: Англо-русский словарь. СПб.: Политехника, 2011. 437 с.
- [25] **Курнаев В.А., Курнаев А.А.** Англо – русский толковый словарь по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. М.: НИЯУ «МИФИ». 2014. 101 с.
- 

## Сведения об авторах



**Евстифеева Наталья Александровна**, 1977 г. рождения. Окончила Московский институт Стали и сплавов (2001), к.т.н. (2005). Доцент кафедры инженерной кибернетики НИТУ МИСиС. В списке научных трудов работы в области САПР и ИИ. Author ID (SPIN-код): 2305-5942; Author ID (Scopus): 59014004200; ORCID: 0009-0001-9079-366X. [evstifeeva@mail.ru](mailto:evstifeeva@mail.ru). ✉.

**Ширеторова Ирина Артуровна**, 2003 г. рождения. Окончила бакалавриат НИТУ МИСиС (2024). Магистрант кафедры инженерной кибернетики МИСиС.

ORCID: 0009-0001-2161-4496. [irinashir902@gmail.com](mailto:irinashir902@gmail.com).



---

Поступила в редакцию 15.01.2026, после рецензирования 29.05.2026. Принята к публикации 2.06.2026.

---



## Construction of a domain knowledge graph based on open electronic dictionaries

© 2026, N.A. Evstifeeva ✉, I.A. Shiretorova

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

### Abstract

This paper addresses the construction of a knowledge graph aimed at integrating knowledge from chemistry, physics, and physical chemistry in the field of hydrogen energy and hydrogen production processes. The developed knowledge graph incorporates formalized semantic relationships and an abstract class organization comparable to domain ontologies. A decision support system for knowledge graph expansion is described. The system is based on a multicriteria evaluation algorithm for validating external data sources represented by open electronic dictionaries. During the validation of a domain-specific terminological data source, the decision support system employs a standardized online assessment service. The evaluation tools integrated into the interface automatically provide data for expert review and decision-making, while simultaneously collecting additional data for a neural network trained to verify external sources using cases with expert-approved decisions. The resulting knowledge graph contains 23,500 unique entities represented in Russian and supplemented with corresponding English-language entries.

**Keywords:** knowledge graph, ontological model, domain, electronic dictionary, multicriteria evaluation, open services, ontology validation.

**For citation:** Evstifeeva N.A., Shiretorova I.A. Construction of a domain knowledge graph based on open electronic dictionaries [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 341-354. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-341-354.

**Authors' contributions:** Evstifeeva N.A. – knowledge graph development; formalization of feedback and situational management; Shiretorova I.A. – selection of external evaluation services; development of the software package.

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

### List of figures and tables

Figure 1 – Upper-level class diagram of the developed knowledge graph

Figure 2 – Architecture of the developed software system

Figure 3 – Workflow of the multicriteria evaluation algorithm for external sources

Figure 4 – Confusion matrix of the neural network model for source classification

Figure 5 – Loss function curve during neural network training

Figure 6 – Comparison of the proportion (a) and severity (b) of hallucinations generated by a large language model when using the knowledge graph

Figure 7 – Example of a term added to the knowledge graph from the IUPAC Gold Book

Table 1 – Quantitative evaluation of the knowledge graph before and after expansion

Table 2 – Knowledge graph expansion indicators for various sources across three subject domains

### References

- [1] Jones CR, Bergen BK. Large language models pass the Turing test. arXiv:2503.23674. DOI: 10.48550/arXiv.2503.23674.
- [2] Sidorova EA, Ivanov AI, Ovchinnikova KA. Information extraction from texts based on ontology and large language models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 114–129. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-114-129.
- [3] Darwish AM, Rashed EA, Khoriba G. Mitigating LLM hallucinations using a multi-agent framework. *Information*. 2025; 16(7): Art. 517. DOI: 10.3390/info16070517.
- [4] Beatty AS, Kaplan RM. (eds.). *Ontologies in the behavioral sciences: Accelerating research and the spread of knowledge*. Washington, DC: National Academies Press, 2022. 164 p. DOI: 10.17226/26464.

- [5] **Booshehri M. et al.** Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis. *Energy and AI*. 2021; 5: Art. 100074. DOI: 10.1016/j.egyai.2021.100074.
- [6] **Antonioni G, van Harmelen F.** The Semantic Web Primer. Cambridge: MIT Press, 2005. 238 p.
- [7] **Smith A.** Simple Knowledge Organization System (SKOS). *Knowledge Organization*. 2022; 49(5): 371–384. DOI: 10.5771/0943-7444-2022-5-371.
- [8] **An B. et al.** Accurate text-enhanced knowledge graph representation learning // *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL-HLT 2018)*. — New Orleans, 2018. P.745–755. DOI: 10.18653/v1/N18-1068.
- [9] **Dobrov BV, Ivanov VV, Lukashovich NV, Solovyov VD.** Ontologies and thesauri: models, tools, applications [In Russian]. Moscow: Binom, 2009. 176 p.
- [10] **Golovin AA, Zhukova NA.** Building a knowledge graph from telecommunication data [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(1): 45–54. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-45-54.
- [11] **Küçük D.** OntoWind: An improved and extended wind energy ontology. arXiv:1803.02808. DOI: 10.48550/arXiv.1803.02808.
- [12] **Degtyarenko K. et al.** ChEBI: An Open Bioinformatics and Cheminformatics Resource. *Current Protocols in Bioinformatics*. 2009; 14: 14.9.1–14.9.20. DOI: 10.1002/0471250953.bi1409s26.
- [13] **Wishart D.S. et al.** ChemFOnT: The chemical functional ontology resource. *Nucleic Acids Research*. 2023; 51(D1): D1220–D1229. DOI: 10.1093/nar/gkac919.
- [14] **Strömert P. et al.** Ontologies4Chem: The landscape of ontologies in chemistry // *Pure and Applied Chemistry*. — 2022. — Vol. 94, No. 6. — P. 605–622. — DOI: 10.1515/pac-2021-2007.
- [15] **ISO 25964-2:2013.** Information and documentation — Thesauri and interoperability with other vocabularies — Part 2: Interoperability with other vocabularies. <https://www.iso.org/standard/53658.html>.
- [16] **Alexiev V, Isaac A, Lindenthal J.** On the composition of ISO 25964 hierarchical relations (BTG, BTP, BTI). *International Journal on Digital Libraries*. 2016; 17: 39–48.
- [17] **FOOPS!** FAIR ontology testing. <https://w3id.org/foops/>. Ontology Pitfall Scanner for FAIR (Beta) [https://foops.linkeddata.es/FAIR\\_validator.html](https://foops.linkeddata.es/FAIR_validator.html).
- [18] **Paulheim H.** Knowledge graph refinement: A survey of approaches and evaluation methods. *Semantic Web*. 2017; 8(3): 489–508. DOI: 10.3233/SW-160218.
- [19] **Nickel M. et al.** A review of relational machine learning for knowledge graphs. arXiv:1503.00759. DOI: 10.48550/arXiv.1503.00759.
- [20] **Parhomenko PA, Grigorev AA, Astrakhantsev NA.** A survey and an experimental comparison of methods for text clustering: Application to scientific articles. *Proceedings of the Institute for System Programming of RAS*. 2017; 29(2): 161–200. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(2)-6.
- [21] **Dorodnykh N, Yurin A.** Knowledge graph engineering based on semantic annotation of tables. *Computation*. 2023; 11(9): Art. 175. DOI: 10.3390/computation11090175.
- [22] **Tiddi I, Schlobach S.** Knowledge graphs as tools for explainable machine learning: A survey. *Artificial Intelligence*. 2022; 302: Art. 103627. DOI: 10.1016/j.artint.2021.103627.
- [23] **Gao T, Yao X, Chen D.** SimCSE: Simple contrastive learning of sentence embeddings. *Proceedings of EMNLP*. 2021. P.6894–6910. DOI: 10.18653/v1/2021.emnlp-main.552.
- [24] **Alenitsyn AG, Butikov EI.** Physical and mathematical reference dictionary. Vol. 2: English–Russian dictionary. [In Russian]. Saint Petersburg: Polytechnic, 2011. 437 p.
- [25] **Kurnaev VA, Kurnaev AA.** English-Russian explanatory dictionary on plasma physics and controlled thermonuclear fusion [In Russian]. Moscow: NRNU MEPhI, 2014. 101 p.

---

## About the authors

**Natalia Aleksandrovna Evstifeeva** (b. 1977) graduated from the Moscow Institute of Steel and Alloys (MISIS) in 2001, Candidate of Technical Sciences (2005). Associate Professor at the Department of Engineering Cybernetics of the National University of Science and Technology MISIS. Author of scientific publications in the fields of CAD systems and AI. Author ID (RSCI): 2305-5942; Scopus Author ID: 59014004200; ORCID: 0009-0001-9079-366X. [evstifeeva@mail.ru](mailto:evstifeeva@mail.ru). ✉

**Irina Arturovna Shiretorova** (b. 2003) graduated from the National University of Science and Technology MISIS with a Bachelor's degree in 2024. Master's student at the Department of Engineering Cybernetics of MISIS. ORCID: 0009-0001-2161-4496. [irinashir902@gmail.com](mailto:irinashir902@gmail.com).

---

Received January 15, 2026. Revised May 29, 2026. Accepted June 2, 2026.

Индекс 29151

---

**LX** *exitus*  
*magazine*

**“ ONTOLOGISTS  
AND DESIGNERS  
OF ALL COUNTRIES  
AND SUBJECT AREAS,  
JOIN US! ”**



---

<https://www.ontology-of-designing.ru/>