
Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)

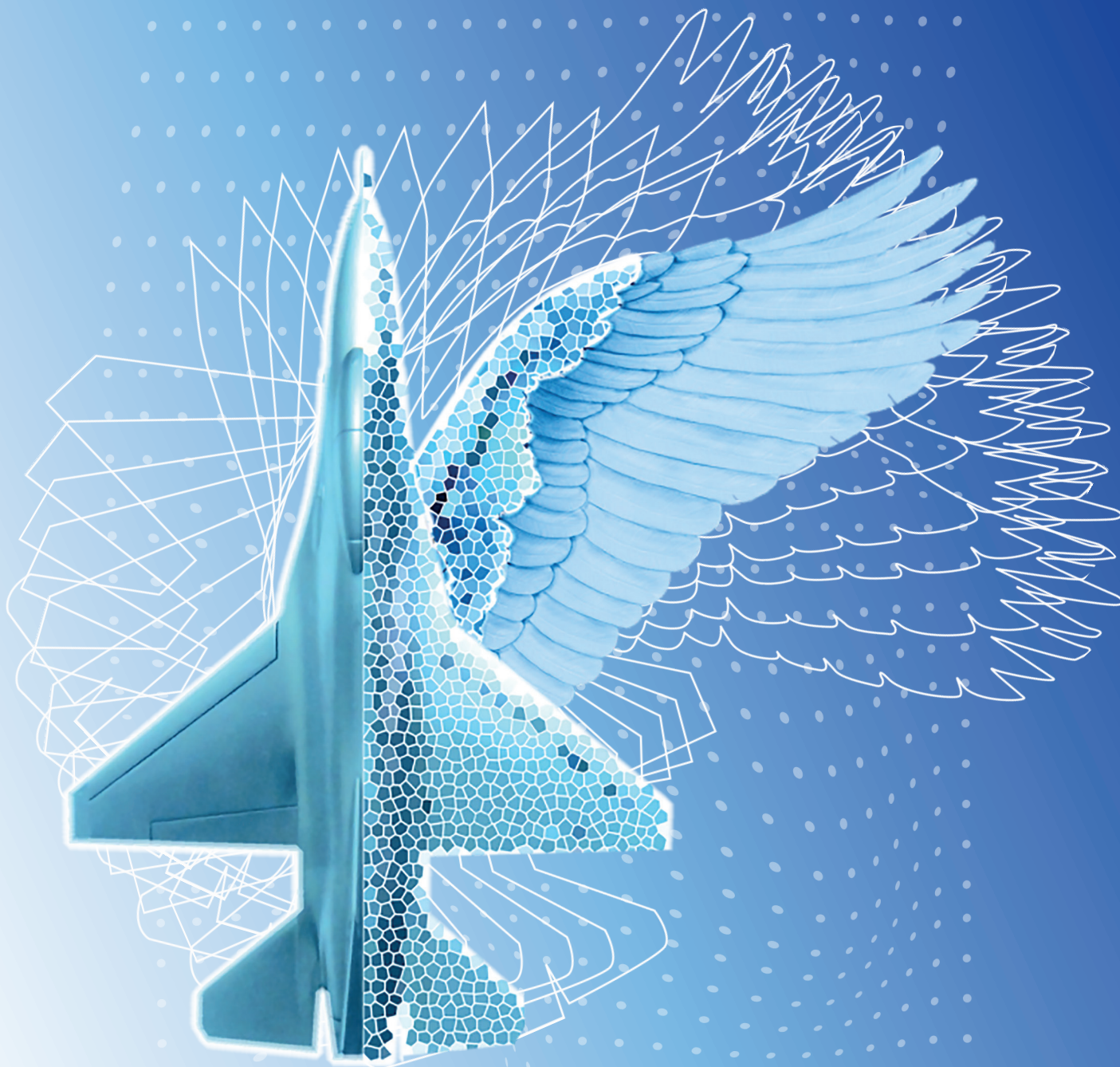
ISSN 2313-1039 (E)

ОНТОЛОГИЯ

Vol 13
2023
№2

Научный журнал - Scientific journal

ПРОЕКТИРОВАНИЯ



Передовые
инженерные
школы

Scientific journal

Volume 13

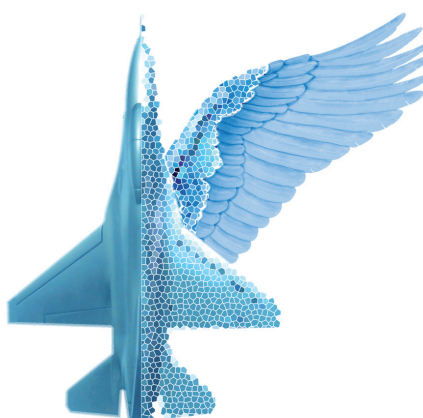
N 2

ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 13

№ 2



2023

Editorial Board - Редакционная коллегия

Nikolay M. **Borgest***, Ph.D., Associate Professor, Samara University, Member of IAOA, AAAI. Samara, Russia
Stanislav N. **Vasiliev***, Doctor of Phys. and Math. Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
Tatiana A. **Gavrilova***, Doctor of Technical Sciences, Professor, GSOM SPbU, St.-Petersburg, Russia
Vladimir G. **Gainutdinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, KNITU-KAI, Kazan, Russia
Vladimir V. **Golenkov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, BSUIR, Minsk, Belarus
Vladimir I. **Gorodetsky***, Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC «EVRIKA», St. Petersburg, Russia
Valeriya V. **Gribova***, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAS, Senior Researcher, IAPU of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia
Yury A. **Zagorulko***, Ph.D., Senior Researcher, ISI of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia
Valery A. **Komarov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
Vladik **Kreinovich**, Ph.D., Professor, University of Texas at El Paso, El Paso, USA
Venedikt S. **Kuzmichev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara University, Samara, Russia
Victor M. **Kureichik***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Taganrog, 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, Praha, 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
Semyon A. **Piyavsky**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow City Pedagogical University, Samara, Russia
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, «Smart solutions» Scientific Production C., Samara, Russia
Sergey V. **Smirnov***, Doctor of Technical Sciences, ICCS RAS, member of IAOA, Samara, Russia
Dzhavdet S. **Suleymanov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the AS of the RT, Kazan, Russia
Boris E. **Fedunov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia
Altynbek **Sharipbay***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Artificial Intelligence, Astana, Kazakhstan

Боргест Николай Михайлович*, к.т.н., доцент, Самарский университет, член IAOA, AAAI. 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
Загорулко Юрий Алексеевич*, к.т.н., с.н.с., ИСИ СО РАН, Новосибирск, Россия
Комаров Валерий Андреевич, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Крейнвич Владик, профессор, Техасский университет Эль Пасо, Эль Пасо, США
Кузьмичев Венедикт Степанович, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Курейчик Виктор Михайлович*, д.т.н., профессор, Южный федеральный университет, Таганрог, 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
Массель 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
Пиявский Семён Авраамович, д.т.н., профессор, Московский город.педагог.университет, Самара, Россия
Резник Юрий Михайлович, д.филос.н., профессор, Институт философии РАН, Москва, Россия
Ржевский Георгий, профессор, Открытый университет, Лондон, Великобритания
Скобелев Петр Олегович*, д.т.н., ФИЦ СамНЦ РАН, Самара, Россия
Смирнов Сергей Викторович*, д.т.н., ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, член IAOA, Самара, Россия
Сүлейманов Джавдет Шевкетович*, д.т.н., профессор, академик АН РТ, Казань, Россия
Федунов Борис Евгеньевич*, д.т.н., профессор, ГосНИИ авиационных систем, Москва, Россия
Шарипбай Алтынбек*, д.т.н., профессор, Ин-т искусственного интеллекта, Астана, Казахстан

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

Executive Editorial Board - Исполнительная редакция

Chief Editor	P.O. Skobelev	Samara, Russia	Главный редактор	Скобелев П.О. ФИЦ СамНЦ РАН, Самара, Россия
Deputy Chief Editor	S.V. Smirnov	Samara, Russia	Зам. главного редактора	Смирнов С.В. ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, Самара, Россия
Executive Editor	N.M. Borgest	Samara, Russia	Выпускающий редактор	Боргест Н.М. Самарский университет, Самара, Россия
Editor	D.M. Kozlov	Samara, Russia	Редактор	Козлов Д.М. Самарский университет, Самара, Россия
Technical Editor	D.N. Borgest	Samara, Russia	Технический редактор	Боргест Д.Н. Самарский университет, Самара, Россия
Executive Secretary	S.A. Vlasov	Samara, Russia	Ответственный секретарь	Власов С.А. Самарский университет, Самара, Россия

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

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

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

Журнал включен в список журналов, входящих в базу данных **Russian Science Citation Index (RSCI)** на платформе **Web of Science**. Пятилетний импакт-фактор РИНЦ **1.265** (2015), **1.073** (2016), **0.986** (2017), **1.205** (2018), **0.829** (2019), **1.071** (2020), **0.977** (2021).

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ

Что день грядущий нам готовит 157-159

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Б.А. Кулик 160-174

Как вычислять интересные следствия

В.А. Комаров 175-191

Конструкция и материал

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Р.И. Ковалев, В.В. Грибова, Д.Б. Окунь 192-203

Онтология представления знаний о назначении персонифицированного лечения

Е.В. Денисова, Ю.А. Гурьева 204-216

Аналитическое и компьютерное моделирование поверхностей систем
криволинейного проецирования

Э.С. Монтейру, Р. да Роса Риги, С. Риго, Х.Л.В. Барбоза, Л.М. да Силва, А.В. Ларентис 217-231

Онтология всеобъемлющей прослеживаемости агрохимикатов

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина, Л.Ю. Грудцына 232-242

Применение графовых моделей в проектном управлении

А.М. Наместников 243-253

Применение онтологического подхода в задаче генерации событийных данных
с помощью имитационных моделей

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В.Б. Ларюхин 254-273

Методы и средства сопряжённого взаимодействия автономных интеллектуальных систем
распределённого управления ресурсами предприятия

Л.Р. Черняховская, Р.И. Мухаметьянова, А.А. Сиротина 274-281

Улучшение системы менеджмента качества промышленных предприятий
на основе использования корпоративных знаний

И.Е. Николаев 282-293

Метод извлечения знаний и навыков/компетенций из текстов требований вакансий

Рекомендуемые издания 294

Научные конференции 295-296

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

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

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

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



Контакты издателей

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

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

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

CONTENTS

EDITORIAL

What the coming day has in store for us 157-159

GENERAL ISSUES OF FORMALIZATION IN THE DESIGNING: ONTOLOGICAL ASPECTS

B.A. Kulik 160-174
Methods to compute interesting consequences

V.A. Komarov 175-191
Design and material

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

R.I. Kovalev, V.V. Gribova, D.B. Okun 192-203
Ontology of knowledge representation about the prescribed personalized treatment

E.V. Denisova, Yu.A. Guryeva 204-216
Analytical and computer modeling of surfaces with the curvilinear projection method

E.S. Monteiro, R.R. Righi, S. Rigo, J.L.V. Barbosa, L.M. da Silva, A.V. Larentis 217-231
Ontology for pervasive traceability of agrochemicals

ONTOLOGY ENGINEERING

A.Z. Asanov, I.Yu. Myshkina, L.Yu. Grudtsyna 232-242
Application of graph models in project management

A.M. Namestnikov 243-253
Application of the ontological approach in the problem of event data generation using simulation models

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

V.B. Larukhin 254-273
Methods and tools of co-interaction of autonomous intelligent systems
for distributed management of enterprise resources

L.R. Chernyakhovskaya, R.I. Mukhametyanova, A.A. Sirotina 274-281
Improvement of the quality management system of industrial enterprises
based on the use of corporate knowledge

I.E. Nikolaev 282-293
Knowledge and skills extraction from the job requirements texts

Recommended Books 294

Scientific conferences 295-296

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

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

http://agora.guru.ru/scientific_journal/

The content of the scientific journal is distributed under a license **CC-BY 4.0**
(Creative Commons Attribution 4.0 International License)



Contacts of the Founders

Samara Scientific Center of the RAS: 61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russia. Tel.: +7 (846) 333 27 70, S.V. Smirnov, smirnov@iccs.ru
Samara University: 34, Moskovskoye shosse, bldg. 10, Samara, 443086, Russia. Tel.: +7 (846) 267 46 47, N.M. Borgest, borgest@yandex.ru
New Engineering LLC (publishing house): 145, Frunze st., Samara, 443010, Russia. Tel.: +7 (846) 332 67 84, fax: +7 (846) 332 67 81



ОТ РЕДАКЦИИ

Великое разделение продолжается The Great Unbundling Continues¹

«Что день грядущий мне готовит?
Его мой взор напрасно ловит,
В глубокой мгле таится он.
Нет нужды; прав судьбы закон.
Паду ли я, стрелой пронзённый,

Иль мимо пролетит она,
Всё благо: бдения и сна
Приходит час определённый;
Благословен и день забот,
Благословен и **тьмы приход!**»

А.С. Пушкин,
«Евгений Онегин»

Дорогой наш читатель, уважаемые авторы и члены редакционной коллегии!

Что день грядущий **нам** готовит? Именно так, обобщая слова великого поэта, задаёт себе вопрос каждый думающий, ещё до конца не атомизированный гражданин и тем более учёный, пытаюсь разобраться в происходящем и стремясь при этом хоть как-то заглянуть в завтрашний день, найти фрагменты будущей картины жизни, которые были бы для него, выражаясь языком поэта, «благословенны».

...

Это обращение к читателю во многом связано с теми сложными процессами, которые протекают в обществе, науке и развиваемых технологиях, с их переплетением, проникновением, интеграцией и дифференциацией в различных предметных областях (ПрО). Эти разные по природе процессы в ПрО множат и делят сущности, изменяют наборы их атрибутов и значений, формируют новые критерии, меняя на ходу приоритеты, включая потребности и возможности акторов. Единый по определению мир для многих всё больше становится двуделимым: реальным, в узком материальном кругу которого живёт каждый; и виртуальным, широким и информационно безбрежным, но «тщательно» формируемым средствами массовой информации, руководимыми специалистами по настройке умов. Это разделение целого на разные по природе части всегда использовали создатели судеб, те, для кого возможность обладать и управлять есть смысл их бытия. В онтологии, как модели бытия, это разделение на реальное и виртуальное можно представить практически, т.к. они различимы по своей природе и живут своей жизнью. Но в сознании атомизированного индивида смешение этих видов реальностей, приправленное потоком неадекватной и ложной информации, порой трудноразличимо.

Авторство выражения «разделяй и властвуй»² за древностью лет остаётся под вопросом. Некоторые историки эту мысль считают максимой римского сената, кто-то приписывает её Филиппу II Македонскому; как моральное правило или принцип поведения её использовали римский правитель Юлий Цезарь и французский император Наполеон³. В современном мире этот принцип тоже успешно работает, т.к. позволяет власть предержащим упростить процедуру освоения и удержания власти, а также помогает в решении сложных проблем, разделяя и решая их по частям. Отсюда хорошо известный приём в науке и проектировании – *деком-*

¹ Название редакционной статьи соответствует первой части названия статьи *Chris Saad*: «The Great Unbundling Continues: How LLMs like ChatGPT are Further Ripping Apart Our World». Mar 29, 2023. <https://chrissaad.medium.com/the-great-unbundling-continues-how-llms-like-chatgpt-are-further-ripping-apart-our-world-a265f10f0de>.

² https://ru.wikipedia.org/wiki/Разделяй_и_властвуй.

³ https://en.wikipedia.org/wiki/Divide_and_rule.

позиция, представляющая собой операцию, состоящую в разделении целого на части. В явной форме декомпозиция была рассмотрена Р. Декартом в его перечне из четырёх базовых правил решения проблем в работе «Рассуждение о методе»⁴. Во второй части этой работы «Основные правила метода» Декарт писал: «...делить каждую из рассматриваемых трудностей на столько частей, сколько потребуется, чтобы лучше их разрешить».

Усложнение мира, накопление знаний о нём, вал генерируемой информации и нескончаемое производство артефактов, рост числа сущностей и отношений – всё это приводит к потребности разделения возникающих трудностей.

Крис Саад⁵, стратегический советник, в прошлом руководитель отдела разработки платформы *Uber* в статье «Великое разделение продолжается: как большие языковые модели, подобные *ChatGPT*, ещё больше разрывают наш мир на части»¹ развивает идеи своей предыдущей статьи «Разделение»⁶. В Силиконовой долине, где несколько лет работал Крис Саад, термин «разделение» использовали для описания феномена разделения мобильных приложений на множество отдельных, каждое из которых, по сути, предоставляет функцию лишь одного назначения.

Явление разделения происходит почти повсеместно во всех аспектах жизни и вызывает широкий спектр личных, политических и профессиональных изменений. Эта метатенденция, как процесс разделения жёстких, созданных человеком структур на отдельные, атомарные части, приводит к более глубокой персонализации и индивидуальной свободе.

- «Делиться» ощущением присутствия где бы то ни было, не будучи там на самом деле, есть своего рода путешествие во времени. Кино и телевидение вывели эту возможность на новый уровень. Стала доступна трансляция видео в реальном времени, начинает распространяться виртуальная, дополненная и смешанная реальности⁷, стирая грани реального и воображаемого миров.
- Работа «отделяется» от предприятий. Гибкие работники, свободные агенты, фрилансеры и т.п. имеют возможность и право работать когда хотят, как и где хотят. Весьма вероятно, что традиционные предприятия начнут рассеиваться по мере того, как отдельные люди (работники) будут лучше налаживать связи и сотрудничать друг с другом «на лету», проливая золотой дождь на мультиагентные технологии.
- «Разделение» доступа к материальным и виртуальным благам (в качестве пользователя) или к их владению (в качестве собственника) становится значительной тенденцией. Получить доступ ко многим вещам (например, автомобиль, жильё, инструменты) становится так же просто, как владеть ими.
- Деньги могут быть «отделены» и уже «отделяются» от контроля и управления правительства (биткойн и другие альтернативные криптовалюты).

Последствия разделения могут быть положительными и отрицательными для отдельных людей, социальных групп и общества в целом. Хотя возможны сбой и разочарование, в итоге это разделение приводит к большему ощущению личных возможностей и выбора, люди приобретают повышенную гибкость, позволяющую им иметь более персонализированный опыт.

Информационные технологии (ИТ) вносят основной вклад в эту тенденцию, оказывая воздействие на людей и процессы. ИТ дают возможность решать эти сложности самостоятельно и более эффективно. В результате человек, имея всего лишь мобильный телефон, может участвовать в процессах или даже разрабатывать свои собственные для решения личных или коллективных проблем.

Искусственный интеллект (ИИ) ускоряет персонализацию будущего, взаимодействие людей. Наблюдается дальнейшее отделение интеллекта от его биологических возможностей и ограничений. Это приводит к новым формам сотрудничества между людьми и ИИ, в которых сильные стороны каждого из них объединяются для преодоления индивидуальных ограничений, дальнейшего расширения возможностей людей и персонализации их опыта.

⁴ Рене Декарт. Рассуждение о методе, чтобы верно направлять свой разум и отыскивать истину в науках. <http://psylib.org.ua/books/dekar01/>.

⁵ <https://www.chrissaad.com/>.

⁶ Chris Saad. Unbundled. May 1, 2016. <https://chrissaad.medium.com/unbundled-7ac9f593ebce>.

⁷ <https://www.apple.com/apple-vision-pro/>

Разделение касается и тех, кто стремится дать толкование формирующимся понятиям. Например, понятие ИИ не одно десятилетие обсуждается в кругу специалистов⁸ и не только. Многие понятия в разном контексте могут именоваться термином ИИ, обозначая разные содержания. Например, ИИ может быть как: научное направление, совокупность технологий, сумма доступных ИИ-продуктов на данный момент времени, способности конкретной интеллектуальной машины, совокупность способностей ИИ будущего, когда он сравнивается или превзойдет по интеллектуальным способностям человека. ИИ – это термин, описывающий совокупность разного рода решений, существенно различающихся по технологиям, уровню сложности, стадии реализации, назначению и т.п. Различные определения ИИ опираются на одну из способностей: действовать, как человек; думать, как человек; думать рационально и действовать рационально. В разделении зон участия человека и машин можно предположить, что зона, где «человек дополняет машину», продолжит расти, а зона, где «машина дополняет человека», продолжит сокращаться, что можно назвать процессом постепенного вытеснения человека из области решения интеллектуальных задач и принятия решений. Участие человека переносится на задачи, не освоенные средствами ИИ⁸.

В номере

В разделе «Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты» статья проф. Б.А. Кулика (*Санкт-Петербург*), в которой автор предлагает воспользоваться методами алгебры кортежей для решения задачи вычисления интересных следствий, и статья проф. В.А. Комарова (*Самара*) о конструкции и материале, где рассматриваются некоторые аспекты взаимосвязей двух инженерных дисциплин – материаловедения и строительной механики, когда модели конструкции исследуются в моделях проектирования материала.

В разделе «Прикладные онтологии проектирования» традиционно предлагаются решения для различных ПроО. Это: онтология представления знаний о назначении персонифицированного лечения (н.с. Р.И. Ковалев, д.т.н., чл.-корр. РАН В.В. Грибова, н.с. Д.Б. Окунь; *Владивосток*); моделирование поверхностей методом криволинейного проецирования (доц. Е.В. Денисова, доц. Ю.А. Гурьева; *Санкт-Петербург*); онтология агрохимикатов для администраторов ферм и разработчиков программного обеспечения в агробизнесе (коллектив авторов под руководством проф. Э.С. Монтейро, *Синоп* и *Сан-Леопольдо, Бразилия*).

В разделе «Инжиниринг онтологий» - статья о применении графовых моделей в проектном управлении (проф. А.З. Асанов, доц. И.Ю. Мышкина, ст.пр. Л.Ю. Грудцына; *Москва* и *Набережные Челны*) и статья о применении онтологического подхода в задаче генерации событийных данных с помощью имитационных моделей (проф. А.М. Наместников; *Ульяновск*).

В разделе «Методы и технологии принятия решений» - финальные работы будущих кандидатов наук: о методах взаимодействия автономных интеллектуальных систем распределённого управления ресурсами предприятия (В.Б. Ларюхин, *Самара*) и о методе извлечения знаний и навыков/компетенций из текстов требований вакансий (И.Е. Николаев, *Челябинск*), а также статья о совершенствовании системы управления качеством на промышленных предприятиях на основе использования корпоративных знаний (проф. Л.Р. Черняховская, Р.И. Мухаметьянова; *Уфа*; А.А. Сиротина; *Усть-Кут*).

Несмотря на продолжающееся усложнение и разделение, наш журнал стремится объединить онтологов и проектантов в научном поиске истины. Поэтому наш девиз:

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

⁸ См. например: Искусственный интеллект. Анализ, тренды, мировой опыт / М.Н. Лысачев, А.Н. Прохоров; научный редактор Д.А. Ларионов. – Корпоративное издание. – М.; Белгород: КОНСТАНТА-принт, 2023. – 460 с. Электронное издание.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 510.662

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-160-174



Как вычислять интересные следствия

© 2023, Б.А. Кулик

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В современном дедуктивном анализе к основным задачам относятся следующие: поиск доказательства заданного утверждения с помощью аксиом и правил вывода; проверка корректности заданного следствия из определённых посылок. О задачах вывода следствий с заранее заданными свойствам (задачи с интересными следствиями) в настоящее время известно немного, и нет чётких ответов на вопросы: какие свойства присущи интересному следствию и как вычислить интересное следствие? Ответы можно получить, если для моделирования рассуждений воспользоваться математическим аппаратом алгебры кортежей на основе свойств декартова произведения множеств. Объектами алгебры кортежей являются произвольные многоместные отношения. Эти отношения можно рассматривать как интерпретации формул математической логики. Они представляют собой матрицеподобные структуры, у которых ячейки содержат не элементы, а подмножества соответствующих атрибутов. Операции (дополнение, обобщённое пересечение и обобщённое объединение) в алгебре кортежей соответствуют логическим связкам математической логики (отрицание, конъюнкция, дизъюнкция), а отношение обобщённое включение – отношению выводимости. Вычисление кванторных операций выполняется с помощью операций с атрибутами (добавление фиктивного атрибута, что соответствует правилу обобщения в исчислении предикатов, и элиминация атрибута). Для двух из четырёх типов структур алгебры кортежей элиминация атрибутов соответствует вычислению проекции отношения. Для вывода интересных следствий в алгебре кортежей используется структура, названная минимальным следствием, которая равна обобщённому пересечению посылок, выраженных структурами алгебры кортежей. Интересные следствия вычисляются как проекции минимального следствия. В результате вычислений и проверок получаются следствия с сокращённым или заданным составом переменных, а также с сокращённым объёмом записи.

Ключевые слова: интерпретация, алгебра кортежей, декартово произведение множеств, кванторные операции, правило обобщения, минимальное следствие, проекция, элиминация атрибутов.

Цитирование: Кулик Б.А. Как вычислять интересные следствия // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №2(48). С.160-174. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-160-174.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121112500304-4).

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Постановка задачи поиска интересных следствий предложена в статье [1]. В современных публикациях, например в [2, 3], при решении подавляющего большинства задач логического вывода предполагается, что посылки и предполагаемое следствие заданы, требуется лишь подтвердить корректность этого следствия. Задача поиска следствий, не представленных в условии задачи, решается лишь для определённого класса баз знаний [4, 5]. В работе

[6] показаны возможности автоматизации порождения содержательных утверждений (гипотез, абдуктивных заключений и т.д.) из знаний, выраженных с помощью позитивно-образованных стандартизованных формул (пос-формул). Однако в работе [6] рассматривается порождение утверждений, которые не являются логическими следствиями.

Близкой к задаче вычисления интересных следствий является задача минимизации булевых функций [7, 8]. Но в ней рассматриваются эквивалентные преобразования логических формул определённого типа, а не вывод следствий.

Чтобы найти подходы к решению задачи вычисления интересных следствий, предлагается воспользоваться методами алгебры кортежей [9].

1 Краткие сведения об алгебре кортежей

1.1 Основные термины и структуры алгебры кортежей

Алгебра кортежей (АК) – математическая система, предназначенная для моделирования и анализа многоместных отношений, в которой используются свойства декартовых произведений (ДП) множеств. Эти свойства позволяют представить отношения в сжатом виде и унифицировать многие методы и модели дискретной математики. Структуры алгебры кортежей могут быть преобразованы в обычные отношения с помощью определённых алгоритмов.

Применительно к логике с помощью алгебры кортежей исследуется один из вариантов [10] *интерпретации* языка первого порядка. В качестве области интерпретации всех переменных используется множество D , а для n -местных предикатов и формул со свободными переменными областью интерпретации является n -местное отношение, т.е. подмножество n -местных кортежей элементов из D^n . Эта модель интерпретации принята за основу в АК, но с учётом прикладной направленности АК в данную модель интерпретации внесены следующие изменения.

Изменение 1. Для разных переменных модели разрешено использовать разные области интерпретации. Поэтому, во избежание возможных несогласованностей, предложено по аналогии с базами данных [11] приписывать к именам отношений *схему отношения*, т.е. последовательность имён областей интерпретации переменных. С учётом этого, имена областей интерпретации переменных названы *атрибутами*, а области интерпретации атрибутов – *доменами*.

Изменение 2. Для многих задач логического анализа удобно рассматривать n -местное отношение не как множество n -местных кортежей элементов, а как объединение ДП. В этом случае в качестве значений атрибута используются не элементы его домена, а имена или обозначения (например, A_2 или $\{b, c\}$) всех подмножеств домена. Множества с этими именами или обозначениями названы *компонентами* атрибута.

Объединение ДП, рассматриваемое как отдельная структура, ранее не исследовалось. Для этой структуры не были известны алгоритмы операций (дополнение, пересечение, объединение), алгоритмы проверок включения одной структуры в другую и т.д. Были определены только отдельные операции для одиночных ДП (пересечение и разность), а также алгоритм проверки включения одного ДП в другое [12, 13]. Оказалось, что ранее известные и новые алгоритмы и их обоснования можно существенно упростить, если отказаться от общепринятых обозначений ДП (D^n ; $A \times B \times C$; $\prod_{i=1}^n S_i$ и т.д.). Вместо этого предложено представлять ДП как кортежи компонент, при этом каждая компонента с помощью схемы отношения привязывается к определённому атрибуту.

Законы АК соответствует законам *алгебры множеств* [14]. Многоместные отношения в АК можно представить с помощью четырёх типов структур (*АК-объектов*). Вместо логических связок $\neg$, $\wedge$ и $\vee$ в АК используются соответствующие операции (по сути это модифицированные операции алгебры множеств) с многоместными отношениями, а вместо кванторов – *операции с атрибутами*. Алгоритмы выполнения операций с АК-объектами, проверок включения, преобразований в другие типы и т.д. сформулированы и доказаны в АК в виде теорем¹.

Информация о схеме отношения АК-объектов содержится в их именах: к идентификатору отношения приписывается заключённая в квадратные скобки схема этого отношения. Например, имя $R[XYZ]$ означает, что АК-объект R содержится в пространстве $X \times Y \times Z$. АК-объекты, заданные в одном и том же пространстве атрибутов, называются *однотипными*.

Выделяются два типа компонент, названных *фиктивными компонентами*.

Полная компонента (обозначается $*$) равна домену соответствующего атрибута.

Пустая компонента (обозначается $\emptyset$) равна пустому множеству.

Обозначения структур АК: C -кортежи соответствуют конъюнкции (*conjunction*), D -кортежи – дизъюнкции (*disjunction*) логических формул. Структуры АК матричные, причём в ячейках матриц записываются не элементы, а компоненты. При преобразовании АК-объектов в формулы математической логики предполагается, что компоненты АК-объектов – это интерпретации одноместных предикатов, а АК-объекты – интерпретации формул или многоместных предикатов.

C -кортеж – это n -местное отношение, равное ДП содержащихся в нём компонент, записанных в виде кортежа, ограниченного квадратными скобками.

Например, АК-объект $T[XYZ] = [A * B]$ – это C -кортеж, при этом $A \subseteq X$, $B \subseteq Z$, а компонента « $*$ » равна домену соответствующего атрибута (в данном случае, поскольку она находится на второй позиции, то $*$ = Y). Этот C -кортеж можно преобразовать в обычное отношение с помощью ДП следующим образом: $T[XYZ] = A \times Y \times B$. Он соответствует конъюнкту

$$T(x, z) = A(x) \wedge \text{True} \wedge B(z) = A(x) \wedge B(z),$$

в котором интерпретации одноместных предикатов $A(x)$ и $B(z)$ – это компоненты A и B .

Доказано, что пересечение C -кортежей, если оно не равно пустому множеству, равно C -кортежу (теоремы 2 и 3 в [9]). Однако объединение C -кортежей может быть представлено единственным C -кортежем лишь в исключительных случаях [9]. Поэтому возникает необходимость в определении структуры нового типа.

C -система – это отношение, равное объединению однотипных C -кортежей, которые записываются в виде строк матрицы, ограниченной квадратными скобками.

Например, $R[XYZ] = \begin{bmatrix} A_1 & * & A_3 \\ B_1 & B_2 & * \end{bmatrix}$ есть C -система, при этом $A_1 \subseteq X$, $A_3 \subseteq Z$ и т.д. Данная

C -система преобразуется в обычное отношение с помощью ДП следующим образом:

$$R[XYZ] = (A_1 \times Y \times A_3) \cup (B_1 \times B_2 \times Z).$$

C -системе с n атрибутами в математической логике соответствует дизъюнктивная нормальная форма (ДНФ) или n -местный предикат.

Если АК-объект преобразуется в обычное отношение, то элементы этого отношения называются *элементарными кортежами*. Они представляют выполняющие подстановки соответствующей логической формулы. С помощью C -кортежей и C -систем можно выразить любое многоместное отношение, но для вычисления их дополнений требуются новые струк-

¹ Формулировки теорем из [9], номера которых упоминаются в тексте данной статьи, приведены в разделе 1.2.

туры – D -кортежи и D -системы. Для определения этих АК-объектов используется промежуточная структура – диагональная C -система.

Диагональная C -система – это C -система размерности $n \times n$, у которой все недиагональные компоненты – полные (*).

$$\text{Например, } Q[XYZ] = \begin{bmatrix} A & * & * \\ * & B & * \\ * & * & C \end{bmatrix} \text{ – диагональная } C\text{-система.}$$

Доказано (теорема 9 в [9]), что диагональная C -система есть результат вычисления дополнения некоторого C -кортежа.

D -кортеж – это отношение, равное диагональной C -системе, записанное как ограниченный перевёрнутыми квадратными скобками кортеж её диагональных компонент.

Например, изображённую выше диагональную C -систему можно записать как D -кортеж: $Q[XYZ] =]A \ B \ C[$.

Ясно (теорема 9), что дополнение $Q[XYZ]$ равно C -кортежу $[\bar{A} \ \bar{B} \ \bar{C}]$. Здесь $\bar{A} = X\bar{A}$, $\bar{B} = Y\bar{B}$ и $\bar{C} = Z\bar{C}$.

D -система – это отношение, равное пересечению однотипных D -кортежей, записанное как ограниченная перевёрнутыми квадратными скобками матрица компонент, в которой строками являются участвующие в операции D -кортежи.

С помощью D -систем можно вычислять дополнение C -систем. Поскольку C -система есть объединение C -кортежей, то по закону де Моргана² её дополнение равно пересечению дополнений этих C -кортежей. Поскольку дополнения C -кортежей равны соответствующим D -кортежам, то для вычисления дополнения C -системы достаточно заменить в ней все компоненты их дополнениями, а вместо обычных квадратных скобок записать перевёрнутые.

Например, дополнение C -системы $P[XYZ] = \begin{bmatrix} A & * & C \\ D & E & * \end{bmatrix}$ вычисляется как D -система

$$\bar{P}[XYZ] = \begin{bmatrix} \bar{A} & \emptyset & \bar{C} \\ \bar{D} & \bar{E} & \emptyset \end{bmatrix}. \text{ В математической логике } D\text{-системе соответствует конъюнктивная}$$

нормальная форма (КНФ).

Универсум АК-объекта (U) определяется как ДП доменов атрибутов, заданных в его схеме отношения. Например, для АК-объекта $R[XYZ]$ универсум есть $U = X \times Y \times Z$.

Если при вычислении установлено, что некоторая C -система равна универсуму, то она соответствует *общезначимой формуле*, если же некоторая D -система окажется равной пустому множеству, то она соответствует *тождественно ложной формуле* или *противоречию*.

Кванторные операции в АК выполняются с помощью простых операций с атрибутами. К ним, в частности, относятся операции $+Atr$ и $-Atr$. Операция *добавление фиктивного атрибута* ($+Atr$) выполняется как добавление имени нового атрибута в схему отношения АК-объекта и соответствующего нового столбца с фиктивными компонентами в матричное представление. Например, пусть задана C -система $R_k[XZ] = \begin{bmatrix} A_1 & A_3 \\ B_1 & B_3 \end{bmatrix}$. При добавлении фик-

тивного атрибута Y в $R_k[XZ]$ получается C -система $+Y(R_k[XZ]) = R_m[XYZ] = \begin{bmatrix} A_1 & * & A_3 \\ B_1 & * & B_3 \end{bmatrix}$. При

выполнении операции $+Atr$ в C -структуры добавляются фиктивные компоненты «*», а в D -структуры – фиктивные компоненты « $\emptyset$ ».

² Законы де Моргана — логические правила, связывающие пары логических операций при помощи логического отрицания.

Операция $+Atr$ соответствует *правилу обобщения* (*Gen*) в исчислении предикатов, которое в [10, p.67] формулируется так: « $(\forall x_i)B$ следует из B ». Операция $+Atr$ используется также для преобразования АК-объектов с разными схемами отношений к однотипным АК-объектам за счёт добавления недостающих фиктивных атрибутов.

Обобщённые операции пересечения ($\cap_G$) и объединения ($\cup_G$) – это операции АК, отличающиеся от обычных одноимённых операций алгебры множеств тем, что перед их выполнением АК-объекты приводятся к одной схеме отношения с помощью операции $+Atr$. Обобщённые операции $\cap_G$ и $\cup_G$ семантически равносильны логическим связкам конъюнкции и дизъюнкции. Аналогично вводятся *обобщённые отношения* ($\subseteq_G$ и $=_G$). Доказано, что АК с обобщёнными операциями и отношениями изоморфна алгебре множеств.

Операция *элиминации атрибута* ($-Atr$) выполняется как удаление из схемы отношения имени этого атрибута, а из матричного представления – столбца его значений. Логический смысл этой операции, в отличие от $+Atr$, зависит от типа АК-объекта (теоремы 31 и 32 в [9]).

Например, пусть задана D -система $P[XYZ] = \begin{bmatrix} \{c\} & \{g\} & \{a, c\} \\ \{a, d\} & \emptyset & \{b\} \end{bmatrix}$. Вычисляя $-X(P[XYZ]) = Q[YZ] = \begin{bmatrix} \{g\} & \{a, c\} \\ \emptyset & \{b\} \end{bmatrix}$, можно преобразовать полученный результат в C -систему (теоремы 25 и 8 в [9]): $Q[YZ] = \begin{bmatrix} \{g\} & * \\ * & \{a, c\} \end{bmatrix} \cap [* \ \{b\}] = [\{g\} \ \{b\}]$.

В D -системах в соответствии с семантикой операции $-Atr$, которая в данном случае соответствует навешиванию квантора $\forall$, должно выполняться $[\{g\} \ \{b\}] \subseteq P[XYZ]$. Проверка (с помощью теорем 20 и 21 в [9]) показывает, что данное соотношение выполняется.

Проекцией АК-объекта называется результат однократного или многократного применения операции $-Atr$ к АК-объекту, выраженному как C -кортеж или C -система, при условии, что атрибут Atr содержится в его схеме отношения. Например, если задана C -система $R[XYZ]$, то её проекции обозначаются $Pr_{XY}(R)$, $Pr_Y(R)$, $Pr_{XZ}(R)$ и т.д., а проекция $Pr_{XZ}(R)$ вычисляется с помощью элиминации атрибута Y : $Pr_{XZ}(R) = -Y(R[XYZ])$.

С проекциями АК-объектов связано понятие фиктивного атрибута, содержащегося в отношении. Пусть задан АК-объект $R[W]$, где W – множество атрибутов, в состав которых входит атрибут X , и $Pr_{WX}(R)$ – проекция АК объекта $R[W]$, в которой присутствуют все атрибуты, кроме X . Тогда X есть фиктивный атрибут в $R[W]$, если соблюдается равенство

$$R[W] = +X(Pr_{WX}(R)). \quad (1)$$

Равенство (1) означает, что в АК-объекте $R[W]$ каждому элементарному кортежу из проекции $Pr_{WX}(R)$ соответствует множество всех значений атрибута X .

Пусть посылки рассуждения записаны в виде АК-объектов $A_1, A_2, \dots, A_n$. Тогда логическая формула, представленная АК-объектом B , будет следствием этих посылок, если соблюдается соотношение:

$$(A_1 \cap_G A_2 \cap_G \dots \cap_G A_n) \subseteq_G B. \quad (2)$$

АК-объект, полученный в результате вычисления выражения в левой части (2), называется *минимальным следствием*. Минимальное потому, что любое его строгое подмножество не является следствием.

Следует заметить, что в АК фиктивный атрибут X_i добавляется в АК-объект при условии, что X_i отсутствует в его схеме отношения. Это означает, что правило *Gen* « $(\forall x_i)B$ следует из B » надо дополнить словами «при условии, что переменная x_i не входит свободно в B ». В книге [10] для правила *Gen* это условие отсутствует.

Источником ошибок в логическом анализе на основе исчисления предикатов может быть отсутствие понятия, аналогичного термину «схема отношения». В частности, в алгоритме унификации допускается замена переменных в подстановках [15, р.80]. Для отношений и АК-объектов, которые являются интерпретациями предикатов и формул, это означает замену атрибута в схеме отношения и, соответственно, переход в другое пространство даже в том случае, если домены этих атрибутов одинаковы. Например, АК-объект $P[XY]$ при пересечении с самим собой не изменяется, но если в нём заменить имена атрибутов, например, $P[YZ]$, то обобщённое пересечение $P[XY] \cap_G P[YZ]$ означает *операцию соединения* отношений. Другой пример: интерпретацией формулы $A(x) \wedge B(x)$ является пересечение интерпретаций одноместных предикатов $A(x)$ и $B(x)$, в то время как интерпретацией формулы $A(x) \wedge B(y)$ оказывается ДП интерпретаций предикатов $A(x)$ и $B(y)$. Таким образом, интерпретации формул при переименовании переменных существенно изменяются.

При решении логических задач, в т.ч. для задачи вычисления интересных следствий, применяется метод ортогонализации [16, 17].

С помощью ортогонализации вычисляются C -системы с попарно непересекающимися C -кортежами, которые используются при расчёте вероятностей событий, выраженных логическими формулами [18, 19] или АК-объектами [20]. Установлено, что ортогонализация позволяет значительно уменьшить трудоёмкость некоторых алгоритмов экспоненциальной вычислительной сложности за счёт того, что при выполнении операций получается намного больше пустых C -кортежей, которые не участвуют в последующих вычислениях [21].

Алгоритм преобразования D -системы в C -систему формулируется просто (теорема 25). Однако его реализация требует в общем случае экспоненциального числа операций. Например, если D -система задана в пространстве из N атрибутов и число D -кортежей в ней равно M , то для выполнения этой операции потребуется N^M операций пересечения C -кортежей. На самом деле этих операций намного меньше, т.к., во-первых, многие D -кортежи содержат меньше, чем N , число непустых компонент и преобразуются в C -систему меньшей размерности, и, во-вторых, при пересечениях C -кортежей нередко получаются пустые кортежи, которые не участвуют в дальнейших операциях.

Если в алгоритме преобразования D -системы в C -систему использовать теорему 27, то число операций этого алгоритма может значительно сократиться и в некоторых случаях достичь до полиномиальной оценки вычислительной сложности [21]. Для того, чтобы выполнить ортогонализацию в этом алгоритме, достаточно каждый D -кортеж исходной D -системы преобразовать в ортогональную C -систему, после чего вычислить пересечение преобразованных C -систем.

Помимо этого сокращение трудоёмкости алгоритма преобразования D -системы в C -систему достигается за счёт использования специальных правил упорядочивания D -кортежей, а также различных вариантов преобразования D -кортежей в ортогональные C -системы [21].

1.2 Используемые теоремы АК

В формулировках теорем рассматриваются однотипные АК-объекты, поэтому их схемы отношений в именах не указываются.

Теорема 1 (проверка включения C -кортежей). Пусть даны два однотипных C -кортежа $P = [P_1 P_2 \dots P_N]$ и $Q = [Q_1 Q_2 \dots Q_N]$. Тогда $P \subseteq Q$, если и только если $P_i \subseteq Q_i$ верно для всех соответствующих пар компонент сравниваемых C -кортежей.

Теорема 2 (пересечение C -кортежей). Пусть даны два однотипных C -кортежа $P = [P_1 P_2 \dots P_N]$ и $Q = [Q_1 Q_2 \dots Q_N]$. Тогда $P \cap Q = [P_1 \cap Q_1 P_2 \cap Q_2 \dots P_N \cap Q_N]$.

Теорема 3 (пустое пересечение C -кортежей). Пусть даны два однотипных C -кортежа $P = [P_1 P_2 \dots P_N]$ и $Q = [Q_1 Q_2 \dots Q_N]$, и в них имеется, по крайней мере, одна пара P_i и Q_i компонент, для которых $P_i \cap Q_i = \emptyset$. Тогда $P \cap Q = \emptyset$.

Теорема 8 (пересечение C -систем). Пусть даны однотипные C -системы P и Q . Результатом их пересечения будет C -система, содержащая все непустые пересечения каждого C -кортежа из P с каждым C -кортежем из Q .

Теорема 9 Дополнение C -кортежа $P = [P_1 P_2 \dots P_N]$ есть диагональная C -система $R = \begin{bmatrix} \overline{P_1} & * & \dots & * \\ * & \overline{P_2} & \dots & * \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ * & * & \dots & \overline{P_n} \end{bmatrix}$ раз-

мерности $n \times n$, где каждая диагональная компонента – дополнение соответствующей компоненты C -кортежа P .

Теорема 20 (проверка включения C -кортежа в D -кортеж). Для C -кортежа $P = [P_1 P_2 \dots P_N]$ и D -кортежа и $Q =]Q_1 Q_2 \dots Q_n[$ справедливо $P \subseteq Q$, если и только если по крайней мере для одного i соблюдается $P_i \subseteq Q_i$.

Теорема 21 (проверка включения C -кортежа в D -систему). Для C -кортежа P и D -системы Q справедливо $P \subseteq Q$, если и только если для каждого D -кортежа Q_i из Q выполняется $P \subseteq Q_i$.

Теорема 25 (преобразование D -системы в C -систему). D -система P , содержащая m D -кортежей, эквивалентна C -системе, которая является пересечением m C -систем, полученных с помощью преобразования каждого D -кортежа из P в диагональную C -систему.

Теорема 27 (ортогонализация D -кортежа). D -кортеж вида $]Q_1 Q_2 \dots Q_{m-1} Q_m[$ преобразуется в эквивалент-

ную ему ортогональную C -систему:

$$\begin{bmatrix} \overline{Q_1} & * & \dots & * & * \\ \overline{Q_1} & \overline{Q_2} & \dots & * & * \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{Q_1} & \overline{Q_2} & \dots & \overline{Q_{m-1}} & * \\ \overline{Q_1} & \overline{Q_2} & \dots & \overline{Q_{m-1}} & \overline{Q_m} \end{bmatrix}.$$

Теорема 31 (навешивание квантора $\exists$). Если C -кортеж или C -система $R[...X...]$ без пустых C -кортежей – интерпретация логической формулы $A(..., x, ...)$ со свободной переменной x , то АК-объект $\neg X(R[...X...])$ – интерпретация логической формулы $\exists x(A(..., x, ...))$.

Теорема 32 (навешивание квантора $\forall$). Если D -кортеж или D -система $R[...X...]$, не содержащие D -кортежей с компонентой «*», – интерпретация логической формулы $A(..., x, ...)$ со свободной переменной x , то АК-объект $\neg X(R[...X...])$ – интерпретация логической формулы $\forall x(A(..., x, ...))$.

2 Примеры решения логических задач методами АК

Задача 1. Четыре подруги (Анна, Белла, Светлана и Дина) имеют следующие особенности: Анна и Белла – блондинки, Светлана предпочитает короткую стрижку, Анна и Дина носят туфли на высоких каблуках, Анна, Белла и Светлана работают в фирме D . В зависимости от внешности и статуса, подруги предпочитают покупать одежду в разных торговых фирмах (K , L и M). Эти зависимости выражаются следующими условиями:

1) если не блондинки отдают предпочтение фирме K , то девушка с короткой стрижкой предпочитает фирму M ;

2) если девушки с длинными волосами предпочитают фирму K , то девушка, не работающая в фирме D , покупает одежду в фирме L , а блондинки – в фирме M ;

3) если девушки, носящие туфли на высоких каблуках, отдают предпочтение фирме L , то не блондинки покупают одежду в фирме K ;

4) если девушки, не носящие туфель на высоких каблуках, покупают одежду в фирме K , то, девушки на туфлях с высокими каблуками предпочитают магазины фирмы M .

Необходимо проверить выполнимость этих условий.

Для формализации условий задачи имена девушек можно записать в виде множества $\{a, b, c, d\}$. Тогда множество блондинок будет $A = \{a, b\}$, множество девушек с короткой стрижкой $B = \{c\}$, множество девушек, носящих высокие каблуки, $C = \{a, d\}$, и множество девушек, работающих в фирме D , $D = \{a, b, c\}$.

Пусть предикат $Y(z)$ обозначает девушек с признаком Y , отдающих предпочтение фирме Z . Тогда условия задачи можно записать в виде следующей логической формулы:

$$P(k, l, m) = (\neg A(k) \supset B(m)) \wedge (\neg B(k) \supset \neg D(l)) \wedge (\neg B(k) \supset A(m)) \wedge \\ \wedge (C(l) \supset \neg A(k)) \wedge (\neg C(k) \supset C(m)).$$

Следует отметить одну особенность этой задачи. При распознавании выполнимости в формулах исчисления предикатов обязательным завершающим этапом их решения является алгоритм унификации, в результате которого исходная задача преобразуется в задачу исчисления высказываний, которая решается различными методами, в частности, методом резолюций [15]. Предложенная задача выходит за рамки задач исчисления высказываний, тем не менее, её можно решить без преобразования в формулу исчисления высказываний. Для этого можно воспользоваться алгоритмом преобразования D -системы в C -систему (теорема 25), а для уменьшения трудоёмкости алгоритма – методом ортогонализации.

Сначала преобразуется исходная формула в КНФ:

$$P(k, l, m) = (A(k) \vee B(m)) \wedge (B(k) \vee \neg D(l)) \wedge (B(k) \vee A(m)) \wedge \\ \wedge (\neg A(k) \vee \neg C(l)) \wedge (C(k) \vee C(m)).$$

Для преобразования формулы $P(k, l, m)$ в D -систему выбирается универсум $K \times L \times M = \{a, b, c, d\}^3$, а интерпретации предикатов $A(x)$, $B(x)$, $C(x)$, $D(x)$ используются в качестве компонент A , B , C , D в соответствующих атрибутах. Например, второй дизъюнкт $(B(k) \vee \neg D(l))$ записывается как D -кортеж $P_2[KL] =]B \quad \overline{D}[$. Если применить операцию $+Atr$, то в схеме отношения $[KLM]$ он выражается как $P_2[KL] =]B \quad \overline{D} \quad \emptyset[$.

После преобразования всех дизъюнктов в однотипные D -кортежи получается:

$$P[KLM] = \begin{bmatrix} A & \emptyset & B \\ B & \overline{D} & \emptyset \\ B & \emptyset & A \\ \overline{A} & \overline{C} & \emptyset \\ C & \emptyset & C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \emptyset & \{c\} \\ \{c\} & \{d\} & \emptyset \\ \{c\} & \emptyset & \{a, b\} \\ \{c, d\} & \{b, c\} & \emptyset \\ \{a, d\} & \emptyset & \{a, d\} \end{bmatrix}.$$

Обозначив D -кортежи с номером i в D -системе $P[KLM]$ как P_i , можно приступить к вычислениям, используя теоремы 2, 3, 8, 25 и 27.

$$P_1 \cap P_2 = \begin{bmatrix} \{a, b\} & * & * \\ \{c, d\} & * & \{c\} \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} \{c\} & * & * \\ \{a, b, d\} & \{d\} & * \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{d\} & * \\ \{c\} & * & \{c\} \\ \{d\} & \{d\} & \{c\} \end{bmatrix}.$$

$$P_1 \cap P_2 \cap P_3 = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{d\} & * \\ \{c\} & * & \{c\} \\ \{d\} & \{d\} & \{c\} \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} \{c\} & * & * \\ \{a, b, d\} & * & \{a, b\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{d\} & \{a, b\} \\ \{c\} & * & \{c\} \end{bmatrix}.$$

$$P_1 \cap P_2 \cap P_3 \cap P_4 = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{d\} & \{a, b\} \\ \{c\} & * & \{c\} \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} \{c, d\} & * & * \\ \{a, b\} & \{b, c\} & * \end{bmatrix} = [\{c\} * \{c\}].$$

$$P_1 \cap P_2 \cap P_3 \cap P_4 \cap P_5 = [\{c\} * \{c\}] \cap \begin{bmatrix} \{a, d\} & * & * \\ \{b, c\} & * & \{a, d\} \end{bmatrix} = \emptyset.$$

Отсюда следует, что условия задачи невыполнимы.

Задача 2. Некоторые пациенты любят всех докторов. Ни один пациент не любит знахарей. Следовательно, никакой доктор не является знахарем. Проверить корректность этого рассуждения. В [15] эта задача решается двумя способами: сначала с помощью интерпрета-

ции (пример 3.15), затем методом резолюций с использованием алгоритма унификации (пример 5.21). Эту задачу можно решить с помощью АК.

Пусть заданы множества P – пациенты, D – доктора, Q – знахари, $P_1 \subseteq P$ – некоторые пациенты, $L[XY]$ – отношение « x любит y », заданное как C -система.

Тогда первая посылка: $A_1[XY] = [P_1 D]$.

Вторая посылка: $A_2[XY] = L[XY] \cap [P \bar{Q}]$ (при пересечении образуется C -система, в которой из атрибута X исключены все не пациенты, а из атрибута Y – все знахари).

Вычисляется минимальное следствие:

$$A[XY] = L[XY] \cap [P_1 D] \cap [P \bar{Q}] = L[XY] \cap [P_1 D \cap \bar{Q}].$$

Анализ заключения. Можно предположить противное, т.е. что некоторые доктора – знахари. Это означает, что $D \cap Q = Q_1 \neq \emptyset$. Множество Q_1 может присутствовать в атрибуте Y отношения $L[XY]$, поэтому в качестве отрицания заключения выбирается C -кортеж $[* Q_1]$ и вычисляется его пересечение с минимальным следствием:

$A[XY] \cap [* Q_1] = L[XY] \cap [P_1 D \cap Q_1 \cap \bar{Q}] = \emptyset$, т.к. $Q_1 \cap \bar{Q} = \emptyset$ и, следовательно, $[P_1 D \cap Q_1 \cap \bar{Q}] = \emptyset$ (теорема 3) и $L[XY] \cap \emptyset = \emptyset$. Отсюда ясно, что заключение корректно.

3 Свойства интересных следствий

Многочисленные примеры задач логического вывода [10, 15, 22] характеризуются тем, что часто проверяемые следствия содержат небольшой, по сравнению с исходными данными, состав переменных.

В задаче *Steamroller* (№ 47 в [22]) при формализации получается три логических переменных, но в ней сокращение осуществляется для предикатов, используемых в этой задаче. К этим предикатам относятся «волки», «лисы», «растения», «меньше» и т.д. Следствие этой задачи содержит три предиката, в то время как в посылках приведено 10 разных предикатов. Таким образом, одно из свойств интересных следствий – *сокращённый по сравнению с исходными данными состав переменных или предикатов*.

Второе свойство интересных следствий тесно связано с первым: в некоторых случаях интерес представляют не только следствия с сокращённым составом переменных, но и следствия, в которых предусматривается использование заранее заданных переменных. Отсюда ясно, что вторым свойством интересных следствий является *определённый состав переменных или предикатов в сокращённом следствии*.

Ещё одно свойство интересных следствий было установлено при исследовании задач с сокращённым составом переменных в следствии. Нередко результатом вычислений становится формула с большим объёмом записей (например, C -система с большим числом C -кортежей). Можно сократить объём записи следствия, в частности, представить его в виде одного или двух дизъюнктов. Таким образом, третье свойство интересных следствий – *сокращённый объём записи*.

Теорема о проекциях. Пусть задана C -система $R[W]$, где W – множество атрибутов из схемы отношения R , и $V \subset W$. Тогда

$$R[W] \subseteq_G Pr_V(R). \quad (3)$$

Доказательство. Пусть в множестве W содержится n атрибутов, а в множестве V – k атрибутов. Не нарушая общности, можно считать, что все атрибуты из V содержатся в левой части C -системы $R[W]$ (перестановка столбцов в матричном представлении АК-объектов вместе с соответствующими перестановками имён атрибутов в схеме отношения является эквивалентным преобразованием). Пусть

$$R[W] = \begin{bmatrix} C_1^1 & \dots & C_1^k & C_1^{k+1} & \dots & C_1^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_m^1 & \dots & C_m^k & C_m^{k+1} & \dots & C_m^n \end{bmatrix}. \text{ Тогда } Pr_V(R) = \begin{bmatrix} C_1^1 & \dots & C_1^k \\ \dots & \dots & \dots \\ C_m^1 & \dots & C_m^k \end{bmatrix}. \text{ Для проверки обоб-}$$

щённого включения (3) необходимо добавить в $Pr_V(R)$ недостающие фиктивные атрибуты. Результатом является C -система

$$Q[W] = \begin{bmatrix} C_1^1 & \dots & C_1^k & * & \dots & * \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_m^1 & \dots & C_m^k & * & \dots & * \end{bmatrix}, \text{ у которой правые } n-k \text{ столбцов содержат только полные}$$

компоненты. Если сравнивать C -кортежи C_i из $R[W]$ и $Q[W]$, то, используя теорему 1, можно убедиться, что каждый C -кортеж из R включён в соответствующий C -кортеж из Q , что доказывает теорему.

4 Методы вычисления интересных следствий

Если использовать традиционный способ дедуктивного анализа с помощью правил вывода, то для получения следствий с определёнными свойствами трудно спланировать последовательность действий, т.к. заранее невозможно предсказать результат применения правил. Поэтому возникает необходимость разработки эффективных методов вычисления следствий с заранее заданными свойствами.

Когда задано множество АК-объектов $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, представляющих аксиомы (или посылки), то нужно вычислить минимальное следствие $A = A_1 \cap_G A_2 \cap_G \dots \cap_G A_n$. Тогда для вычисления любого следствия достаточно построить АК-объект B такой, чтобы выполнялось соотношение $A \subseteq_G B$. Из (3) следует, что любая проекция A является его следствием. Одним из методов вывода следствий с сокращённым составом атрибутов может быть вычисление проекций минимального следствия A .

4.1 Вычисление следствий с сокращённой схемой отношения

Если A – C -система, то любую её проекцию легко вычислить с помощью элиминации атрибутов. При этом не всякая проекция представляет интересное следствие, т.к. могут быть проекции, равные универсуму – в этом случае они не содержат полезной информации.

В качестве примера можно рассмотреть задачу 1 из раздела 2. Пусть в задаче используются только первые два условия (т.е. первые три D -кортежа из D -системы $P[KLM]$). Соответствующий промежуточный результат решения задачи 1 имеет вид:

$$A[KLM] = P_1 \cap P_2 \cap P_3 = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{d\} & \{a, b\} \\ \{c\} & * & \{c\} \end{bmatrix}.$$

Любая проекция $A[KLM]$ является следствием. Проекция $Pr_K(A) = \{a, b, c\}$ и $Pr_L(A) = *$ являются формальными следствиями, в которых содержатся сведения о подругах, предпочитающих магазины определённой фирмы. Из содержания проекций ясно, что в фирме K совершают покупки только девушки, работающие в фирме D , в то время как товары фирмы L желательны для всех подруг.

4.2 Вычисление следствий с заданным составом атрибутов

Задача поиска следствий с заданным составом атрибутов решается также с помощью вычисления и анализа соответствующих проекций минимального следствия. В качестве приме-

ра можно рассмотреть следующую задачу исчисления высказываний. Пусть посылки заданы дизъюнктами: $\neg P \vee Q \vee R$; $\neg P \vee \neg Q \vee \neg S$; $\neg P \vee Q \vee \neg R \vee S$; $P \vee \neg R$; $P \vee R \vee S$.

Требуется выяснить, может ли следствием данной задачи быть формула, содержащая только пропозициональные переменные P и Q (другой вариант: Q и S)?

В АК все задачи и формулы исчисления высказываний можно выразить АК-объектами, у которых атрибутами являются имена пропозициональных переменных, а в качестве их доменов используется множество $\{0, 1\}$. При этом литералу X соответствует компонента $\{1\}$, а литералу $\neg X$ – компонента $\{0\}$. Тогда конъюнкт, например, $P \wedge \neg R \wedge S$ можно выразить как C -кортеж $A_1[PRS] = [\{1\} \{0\} \{1\}]$, а дизъюнкт $P \vee \neg R$ – как D -кортеж $A_2[PR] =]\{1\} \{0\}[$.

Выразив посылки задачи в виде D -кортежей и применив операцию $+Attr$, можно построить D систему: $A[PQRS] =$

$$A[PQRS] = \begin{bmatrix} \{0\} & \{1\} & \{1\} & \emptyset \\ \{0\} & \{0\} & \emptyset & \{0\} \\ \{0\} & \{1\} & \{0\} & \{1\} \\ \{1\} & \emptyset & \{0\} & \emptyset \\ \{1\} & \emptyset & \{1\} & \{1\} \end{bmatrix}.$$

С помощью методов, изложенных в разделе 1.1, можно преобразовать D -систему $A[PQRS]$ в C -систему. Тогда получается минимальное следствие:

$$A[PQRS] = \begin{bmatrix} \{0\} & * & \{0\} & \{1\} \\ \{1\} & \{1\} & * & \{0\} \\ \{1\} & \{0\} & \{1\} & \{1\} \end{bmatrix}.$$

Для решения задачи рассматривается сначала проекция $Pr_{PQ}(A)$, которая содержит четыре разных элементарных кортежа, что говорит о том, что она равна универсуму и не годится для следствия (универсум является следствием для любых посылок). Проекция $Pr_{QS}(A)$ содержит три элементарных кортежа: $[\{0\} \{1\}]$, $[\{1\} \{0\}]$ и $[\{1\} \{1\}]$. По таблице истинности им соответствует формула $Q \vee S$. Следовательно, эта формула есть решение задачи.

Используя теорему 20, можно проверить то, что полученный результат действительно является следствием. Для этого можно выразить формулу $Q \vee S$ как D -кортеж $B[PQRS] =]\emptyset \{1\} \emptyset \{1\}[$ и проверить включение каждого C -кортежа из C -системы $A[PQRS]$ в D -кортеж $B[PQRS]$.

4.3 Сокращение объёмов записи в следствиях

При вычислении следствий могут получаться C -системы, содержащие значительное число C -кортежей. Во многих случаях C -системы трудно преобразовать так, чтобы в них содержалось меньшее число C -кортежей, однако объём записи минимального следствия или его неполных проекций можно существенно уменьшить с помощью других методов АК.

Пусть известно следствие A с большим объёмом записи. Тогда можно вычислить $\bar{A}$ и каким-то образом выделить его часть $A_j \subset \bar{A}$ с малым объёмом записи. При вычислении его дополнения методами АК также получится АК-объект $\bar{A}_j$ с малым объёмом записи, и при этом в силу закона контрапозиции будет соблюдаться соотношение $A \subset \bar{A}_j$, что позволяет выбрать $\bar{A}_j$ в качестве искомого следствия.

Пусть в задаче 1 из раздела 2 в качестве посылок используются первые два D -кортежа D -системы $P[KLM]$.

Промежуточный результат имеет вид:

$$A[KLM] = P_1 \cap P_2 = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{d\} & * \\ \{c\} & * & \{c\} \\ \{d\} & \{d\} & \{c\} \end{bmatrix}, \quad \bar{A}[KLM] = \begin{bmatrix} \{c, d\} & (a, b, c) & \emptyset \\ \{a, b, d\} & \emptyset & \{a, b, d\} \\ \{a, b, c\} & \{a, b, c\} & \{a, b, d\} \end{bmatrix}.$$

Чтобы выделить часть полученной D -системы, необходимо преобразовать её в C -систему с помощью известного алгоритма.

$$\text{Тогда получается: } \bar{A}[KLM] = \begin{bmatrix} \{d\} & \{a, b, c\} & * \\ \{d\} & \{d\} & \{a, b, d\} \\ \{c\} & * & \{a, b, d\} \\ \{a, b\} & \{a, b, c\} & * \end{bmatrix}.$$

Из этой C -системы выбирается какой-либо C -кортеж, например, $A_j[KLM] = [\{d\} \{a, b, c\} *]$ и вычисляется его дополнение $\bar{A}_j[KLM] =]\{a, b, c\} \{d\} \emptyset [$.

В $\bar{A}_j[KLM]$ можно удалить фиктивный атрибут. Тогда получается следующий результат: D -кортеж $\bar{A}_j[KL] =]\{a, b, c\} \{d\}[$ является следствием задачи. Его можно выразить как дизъюнкт с соответствующими предикатами, определёнными в задаче 1.

Полученный результат легко проверяется. Для этого, используя теорему 20, достаточно проверить включение каждого C -кортежа из C -системы $A[KLM]$ в D -кортеж $\bar{A}_j[KLM]$.

Таким образом, одним из методов сокращения объёма записи следствия A является следующий порядок действий:

- 1) вычислить дополнение A и преобразовать его в C -систему;
- 2) если в полученной C -системе много C -кортежей, то удалить некоторые из них;
- 3) вычислить дополнение структуры, полученной на предыдущем шаге.

Заключение

Для заданной системы посылок предложены алгоритмы вычисления следствий со следующими свойствами:

- с сокращённым составом переменных;
- с заданным составом переменных;
- с сокращённым объёмом записи.

Во всех случаях используется понятие минимального следствия, представляющего собой обобщённое пересечение АК-объектов, которые моделируют посылки. Интересные следствия в ряде случаев являются неполными проекциями минимального следствия.

Значительная часть современных классических и неклассических логических систем предусматривает для вывода новых следствий механизм исчислений, т.е. получение результатов на основе правил вывода. В АК наряду с этим механизмом предлагается получение новых следствий с помощью вычислений, т.е. на основе алгоритмов, позволяющих получить требуемый результат с помощью определённых операций над заданными в условии задачи структурами. В некоторых случаях, в частности, в задаче вычисления следствий с заранее заданными свойствами, этот метод имеет определённые преимущества.

Список источников

- [1] Шалак В.И. Анализ vs дедукция // Логические исследования. 2018. Т. 24, № 1. С.26-45.
- [2] Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. М.: ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература". 2008. 712 с.

- [3] **Охотников О.А.** О поиске натурального классического логического вывода с использованием частичной скулемизации // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2019. Т. 23. Вып. 4. С.39-90.
- [4] **Симонов А.И., Страбыкин Д.А.** Вывод следствий с построением схемы вывода из новых фактов при не полностью определённой базе знаний // Современные наукоёмкие технологии. 2018. № 10. С.120-125.
- [5] **Bardovskaya A., Chistyakov G., Dolzhenkova M., Strabykin D.** The method of deductive inference of consequences with the scheme construction // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 985. P.1-10.
- [6] **Васильев С.Н.** Интерактивное порождение новых знаний на основе автоматических средств логического вывода // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №1(47). С.10-28. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-10-28.
- [7] **Quine W.V.** The problem of simplifying of truth functions // Amer. Math. Monthly. 1952, Vol. 59. P.521-531.
- [8] **Мухеева Е.А., Еникеева А.Ф.** Минимизация булевых функций геометрическим методом // Учёные записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. Электрон. журн. 2018. № 1, С.72-82. <https://www.mathnet.ru/rus/ulsu/y2018/i1/p72>.
- [9] **Кулик Б.А.** Логика и математика: просто о сложных методах логического анализа (под общ. ред. А.Я. Фридмана). СПб.: Политехника. 2020. 144 с.
- [10] **Mendelson E.** Introduction to Mathematical Logic (6th ed.). Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2015. 499 p.
- [11] **Плоткин Б.И.** Универсальная алгебра, алгебраическая логика и базы данных. М.: Наука. 1991. 448 с.
- [12] **Бурбаки Н.** Теория множеств. М.: Мир. 1965. 455 с.
- [13] **Мелихов А.Н.** Ориентированные графы и конечные автоматы. М.: Наука. 1971. 416 с.
- [14] **Курант Р., Роббинс Г.** Что такое математика? 3-е изд., испр. и доп. М.: МЦНМО. 2001. 568 с.
- [15] **Chang C.-L., Lee R.C.-T.** Symbolic Logic and Mechanical Theorem Proving. New York: Academic Press. 1973. 331 p.
- [16] **Порецкий П.С.** Решение общей задачи теории вероятностей при помощи математической логики // Собрание протоколов заседаний секции физико-математических наук общества естествоиспытателей при Казанском университете. Казань: 1887. Т.5. С.83-116.
- [17] **Мерекин Ю.В.** Решение задач вероятностного расчёта однотактных схем методом ортогонализации // Вычислительные системы. Сборник трудов Института математики СО АН СССР. 1963. Вып.4. С.10-21.
- [18] **Рябинин И.А.** Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника. 2000. 248 с.
- [19] **Цициашвили Г.Ш.** Логико-вероятностное моделирование по модульному принципу // Дальневосточный математический журнал. 2019. Т. 19. № 1. С.114-118.
- [20] **Кулик Б.А., Зуенко А.А., Фридман А.Я.** Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. 235 с.
- [21] **Кулик Б.А.** Новые классы КНФ с полиномиально распознаваемым свойством выполнимости // Автоматика и телемеханика. 1995. № 2. С.111-124.
- [22] **Pelletier F.J.** Seventy-Five Problems for Testing Automatic Theorem Provers // Journal of Automated Reasoning. 1986. Vol. 2. P.191-216.

Сведения об авторе

Кулик Борис Александрович, 1941 г. рождения. Окончил Ленинградский горный институт в 1963 г., д.ф.-м.н. (2008). Ведущий научный сотрудник лаборатории Интеллектуальных электромеханических систем Института проблем машиноведения РАН (Санкт-Петербург). Член Российской ассоциации искусственного интеллекта (РАИИ). В списке научных трудов более 150 работ в области логики, ИИ, системного анализа, надёжности и безопасности систем. Author ID (РИНЦ): 11676; Author ID (Scopus): 6603756784; Researcher ID (WoS): F-1539-2014. ba-kulik@yandex.ru.



Поступила в редакцию 26.03.2023. после рецензирования 19.06.2023. Принята к публикации 22.06.2023.



Methods to compute interesting consequences

© 2023, B.A. Kulik

Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

In modern deductive analysis, the main tasks include the following: finding proof of a given statement using axioms and rules of inference and checking the correctness of a given consequence from certain premises. Little is currently known about inference problems with predetermined properties (problems with interesting consequences). There are no clear answers to the following questions: what properties are inherent in an interesting consequence and how to calculate an interesting consequence? To solve these problems, it is proposed to use the methods of n -tuple algebra (NTA) based on properties of the Cartesian product of sets. The objects of NTA are arbitrary n -ary relations, which can be interpreted as the formulas of mathematical logic. They are matrix-like structures which cells do not contain elements, but subsets of the corresponding attributes. In NTA, operations (addition, generalized intersection and generalized union) in the tuple algebra correspond to logical connectives of mathematical logic (negation, conjunction, disjunction), and the generalized inclusion relation corresponds to the derivability relation. The calculation of quantifier operations is performed using operations on attributes (adding a dummy attribute, which corresponds to the generalization rule in predicate calculus, and eliminating an attribute). For two of the four types of NTA structures, the elimination of attributes corresponds to computing the projection of a relation. To derive interesting consequences in NTA, a structure called the minimal consequence is proposed, which is equal to the generalized intersection of premises. Interesting consequences are calculated as projections of the minimal consequence. As a result of calculations and checks, consequences are obtained with a reduced or a given composition of variables, as well as with a reduced amount of notation.

Keywords: *interpretation, n -tuple algebra, Cartesian product of sets, quantifier operations, generalization rule, minimal consequence, projection, attribute elimination.*

For citation: Kulik BA. Methods to compute interesting consequences [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 160-174. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-160-174.

Financial Support: This work was carried out in accordance with the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 121112500304-4).

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

References

- [1] Shalak VI. Analysis vs deduction [In Russian]. *Logical investigations*. 2018; 24(1): 26-45.
- [2] Vagin VN, Golovina EJu, Zagorjanskaja AA, Fomina MV. Exact and Plausible Reasoning in Intelligent Systems [In Russian]. M.: Fiziko-matematicheskaja literatura, 2008. 712 p.
- [3] Ohotnikov OA. About proof-search in classical natural deduction calculus using partial skolemization [In Russian]. *Intelligent Systems. Theory and Applications*. 2019; 23(4): 39-90.
- [4] Simonov AI, Strabykin DA. Consequences inference method with construction the scheme from new facts in case of an incomplete knowledge base [In Russian]. *Modern high technologies*. 2018; 10: 120-125.
- [5] Bardovskaya A, Chistyakov G, Dolzhenkova M, Strabykin D. The method of deductive inference of consequences with the scheme construction. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019; 985: 1-10.
- [6] Vassilyev SN. Interactive generation of new knowledge based on automatic means of logical inference [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(1): 10-28. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-1-10-28.
- [7] Quine WV. The problem of simplifying of truth functions. *Amer. Math. Monthly*. 1952; 59: 521-531.
- [8] Miheeva EA, Enikeeva AF. Minimization of Boolean functions by a geometric method [In Russian]. *Scientific notes of the Ulyanovsk State University. Ser. Mathematics and information technology*. 2018; 1: 72-82. <https://www.mathnet.ru/rus/ulsu/y2018/i1/p72>.
- [9] Kulik BA. Logic and Mathematics: Complex Methods of Logical Analysis in Plain Words [In Russian]. SPb.: Politehnika. 2020. 144 p.

- [10] **Mendelson E.** Introduction to Mathematical Logic (6th ed.). Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2015. 499 p.
 - [11] **Plotkin B.I.** Universal algebra, algebraic logic, and databases [In Russian]. M.: Nauka. 1991. 448 p.
 - [12] **Bourbaki N.** Theory of Sets. Paris: Hermann; 1968. 424 p.
 - [13] **Melihov A.N.** Oriented graphs and finite automata [In Russian]. M.: Nauka. 1971. 416 p.
 - [14] **Courant R, Robbins H.** What is mathematics? An elementary approach to ideas and methods (2nd ed.). New York: Oxford University Press. 1996. 566 p.
 - [15] **Chang C-L, Lee RC-T.** Symbolic Logic and Mechanical Theorem Proving. N.-Y., San Francisco, London: Academic Press Inc., 1973. 358 p.
 - [16] **Poretskij P.S.** Solving the general problem of probability theory using mathematical logic [In Russian]. *Collection of minutes of meetings of the Section of Physical and Mathematical Sciences of the Society of Natural Scientists at Kazan University*. Kazan: 1887. v. 5. pp.83-116.
 - [17] **Merekin JuV.** Solving problems of probabilistic calculation of single-stroke schemes by orthogonalization method [In Russian]. *Computing systems*. 1963; 4: 10-21.
 - [18] **Rjabinin I.A.** Reliability and safety of structural-complex systems [In Russian]. SPb.: Politehnika. 2000. 248 p.
 - [19] **Tsitsiashvili GSh.** Logical and probabilistic on the modular principle [In Russian]. *Far Eastern Mathematical Journal*. 2019; 19(1): 114–118.
 - [20] **Kulik BA, Zuenko AA, Fridman AJa.** An algebraic approach to intelligent data and knowledge processing [In Russian]. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta. 2010. 235 p.
 - [21] **Kulik BA.** New classes of conjunctive normal forms with a polynomially recognizable property of satisfiability [In Russian]. *Automation and remote control*. 1995 2: 111-124.
 - [22] **Pelletier FJ.** Seventy-Five Problems for Testing Automatic Theorem Provers. *Journal of Automated Reasoning*. 1986; 2: 191-216.
-

About the author

Boris Alexandrovich Kulik (b. 1941) graduated from the Leningrad Mining Institute (USSR) in 1963, Dr. Sc. in Physics and Mathematics (2008). He is a leading researcher of Laboratory of Smart Electromechanical Systems (Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences). He is a member of Russian Association of Artificial Intelligence. He is a co-author of more than 150 publications in the field of logic, artificial intelligence, systems analysis and reliability and safety of systems. . Author ID (RSCI): 11676; Author ID (Scopus): 6603756784; Researcher ID (WoS): F-1539-2014. ba-kulik@yandex.ru.

Received March 26, 2023. Revised June 19, 2023. Accepted June 22, 2023.



Конструкция и материал

© 2023, В.А. Комаров

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

Аннотация

Рассматриваются некоторые аспекты взаимосвязей двух инженерных дисциплин – материаловедения и строительной механики. Обсуждаются стержневые структуры от представительных ячеек и объемов композитов, армированных длинными и короткими волокнами, до пространственных конструкций с регулярной структурой. Рассматриваются различные подходы к прогнозированию и оценкам минимальной массы стержневых систем на начальных стадиях проектирования конструкций. Основное внимание уделено исследованию возможности применения безразмерного критерия силового совершенства конструкции к оценке эффективности материалов с гетерогенной структурой. С этой целью поставлен и подробно описывается вычислительный эксперимент, в ходе которого на базе простейшей кубической решетки Браве генерируются последовательно ферменные структуры возрастающей сложности и методами строительной механики анализируются их свойства. Показано, что ферменное моделирование обладает определённым потенциалом для прогнозирования ряда механических характеристик гетерогенных материалов.

Ключевые слова: структура, материал, конструкция, нагрузки, напряжения, критерии, прочность, квазиизотропность.

Цитирование: Комаров В.А. Конструкция и материал // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №2(48). С.175-191. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-175-191.

Благодарности: автор благодарит профессора Милейко С.Т. за существенное влияние на появление данной работы, академика Сойфера В.А. за совет обратить внимание на решётки Браве; аспирантов Спирина М.О. и Абдуллаева Р.Ф. за помощь в подготовке цифрового материала.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Предисловие

«При изучении наук примеры полезнее правил»

Исаак Ньютон

В 1933 году издана актуальная для своего времени книга с претенциозным названием «Материал и конструкция» [1]. Книга появилась в начале периода индустриализации страны и внесла весомый вклад в подготовку инженерных кадров. Её автор начинает повествование с описания шалаша первобытного человека из подручного материала – стволов небольших деревьев и веток. Минувя тысячелетия, переходит к обсуждению современной искусственной окружающей среды: мебели, объектов металлургии, высотных домов из стали и бетона, инструментов и др., подчёркивая при этом, что «выполнение вещами своего назначения сводится к способности материала выдерживать внешние воздействия», и рассматривает как важнейшее свойство материала – *прочность*. Далее с помощью примеров и иллюстраций подводит читателя к необходимости науки о механических свойствах материалов и рассматривает основные виды деформации конструкций под нагрузкой – растяжение, изгиб и кручение, – и проводит мысль *о первичности материала по отношению к конструкциям*.

Интересные факты и мысли по истории строительной механики в связи с появлением новых материалов и технологий можно найти в книгах С.П. Тимошенко [2] и С.А. Бернштейна

[3]. Особое место среди работ, в которых затрагиваются связи между материалом и конструкцией, занимает книга Дж. Гордона «Почему мы не проваливаемся сквозь пол» [4]. Поучительно в ней откровенное признание крупным учёным того обстоятельства, что касательные напряжения трудны для понимания и учёта в практической деятельности как в исторические времена, так и по сей день.

В этой связи интересно рассказать об одной задаче, связанной с выяснением причины течи топливных баков в крыле одного самолёта по линии стыка обшивки с лонжероном. Автор этих строк в 70-е годы занимался разработкой уточнённого метода расчёта касательных напряжений и был приглашён к анализу причин течей. Совпадение картины мест течей с линиями максимумов напряжений, полученными по уточнённому методу, оказалось практически полным. Но ни прочнисты, ни конструкторы долго не могли согласиться с тем, что причина именно в касательных напряжениях, так как крыло имело достаточную изгибную прочность в этом месте. В книге Гордона обсуждается подобная проблема с течью воды через продольные швы в старинных деревянных судах!

Во второй половине прошлого века произошло открытие феноменальной прочности некоторых волокон и нитевидных кристаллов, и вскоре началась эра композиционных материалов (КМ) и конструкций. Сейчас достигнуты определённые успехи по повышению весовой эффективности¹ конструкций в авиастроении и во многих отраслях строительства и машиностроения. Однако ожидаемый эффект получен в большинстве случаев не в полной мере. Идут поиски новых, более эффективных материалов и конструкций. Определённые надежды в этом направлении возлагаются на теоретическое материаловедение.

В заключительной главе книги [4] «Материалы будущего» Гордон обсуждает широкий спектр направлений развития материаловедения, в том числе взаимоотношения конструкторов и материаловедов. В начале главы говорится об отсутствии влияния конструктора на материаловеда: «Вопреки обычным представлениям не материал выбирается для изделия, а скорее наоборот – изделие проектируется в расчёте на материал... Так или иначе, но конструктор почти не направляет материаловеда в его работе. Больше того, даже подсказки конструктора материаловед обычно игнорирует». Гордон объясняет такое положение дел разной скоростью разработки материалов и конструкций. Завершаются глава и книга оптимистически: «Вплоть до настоящего времени технические идеи основывались (сознательно и подсознательно) на характеристиках и недостатках небольшого списка веществ; но стоит воображению инженеров проститься с мыслью о том, что все эти ограничения обязательны, а взамен этого понять, сколь созидующим может быть союз конструктора и материаловеда, – границы техники необычайно раздвинутся».

В наше время с приходом композитов появилась широкая номенклатура компонентов материалов, а число комбинаций из них – бесконечно. Условия для союза конструктора и материаловеда созданы.

Оптимизация силовых конструкций имеет большую историю и определённые достижения. Представляется естественным попытаться применить методы строительной механики к поиску рациональных структур, начиная с простейших – стержневых (ферменных), в надежде получить результаты, которые могут оказаться интересными для материаловедов и полезными для объединения таких важнейших направлений науки и техники, как конструкции и материалы.

Введение

Стержневые системы находят самое широкое применение в современном строительстве и технике. От крупноразмерных сооружений аэропортов и мостов до анизогридных (сетча-

¹ В авиастроении исторически принято использовать термин вес (весовая эффективность) конструкции, понимая под этим оценку массы конструкции. *Прим. ред.*

тых) конструкций летательных аппаратов [5-7] и микроструктур композитов, армированных непрерывными и короткими волокнами. Методы расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС) этих объектов представляются в настоящее время достаточно проработанными благодаря успешным реализациям метода конечных элементов (МКЭ): РИПАК, *NASTRAN*, *ANSYS*, ЛОГОС и др.

Разнообразие используемых структур стержневых конструкций говорит скорее об их изобретательском происхождении, чем об использовании методов структурной оптимизации, разработке которых посвящена обширная литература [8]. Уместно отметить, что в отступлении от рациональных форм в некоторых проектах можно усмотреть достижение определённых эстетических и технологических целей. В большинстве случаев рациональные силовые конструкции обладают и несомненной (по мнению автора) красотой, если она умело показана и не затеняется архитектурным декором. В качестве примеров можно назвать башни Эйфеля и Шухова, здание театра оперы в Пекине и множество других исторических и современных сооружений.

Интересные по внешнему виду и эффективные по минимуму массы силовые конструкции различных размеров и назначения получаются методами топологической оптимизации. Существенное развитие и применение к настоящему времени в этой области получили два направления: использование модели тела переменной плотности (ТПП) [9, 10] и *SIMP*-метод [11, 12]. Стоит отметить, что *SIMP*-метод порождает, как правило, стержневые конструкции с определённым огрублением результатов оптимизации за счёт отбрасывания элементов с малой плотностью. В отличие от него, метод ТПП позволяет находить при одном случае нагружения математически доказуемое оптимальное решение. В [13] представлены результаты решения ряда задач с использованием метода ТПП, в которых оптимальные конструкции требуют заполнения внутренних объёмов материалом переменной плотности. Как один из путей создания такого материала видится проектирование и исследование стержневых микроструктур с ориентацией на известные аддитивные технологии, методы формования композитов, включая использование коротких волокон [14], и, возможно, другие методы формирования материалов с желаемой структурой.

В названных методах топологической оптимизации отсутствуют математически обоснованные подходы к оптимизации конструкций при многих случаях нагружения. Делаются попытки построения эвристических алгоритмов с использованием идеи достижения полнонапряжённости. Однако известен контрпример оптимизации статически неопределимой фермы, работающей на два случая нагружения, который показывает, что именно неполнонапряжённая конструкция может иметь минимальную массу [15]. Задача структурной оптимизации стержневых конструкций при нескольких случаях нагружения остаётся открытой. В этом плане представляется актуальным анализ свойств кристаллических структур [16] с позиций строительной механики и теории упругости.

Термин «*структура*» далее применяется к объектам, которые определяются количеством составляющих однородных элементов, способом соединения и расположением в пространстве. В инженерном деле, в частности в авиастроении, как синоним используется термин «*силовая схема*». При рассмотрении структур с материальным описанием элементов далее используется определение «*конструкция с определённой структурой*» или коротко «*конструкция*» в зависимости от контекста.

В данной работе рассматриваются прочностные характеристики гипотетического материала с регулярными стержневыми (ферменными) структурами с различной степенью внутренней статической неопределимости представительного объёма [17, 18] при различных внешних силовых воздействиях на материал конструкции.

Цель работы – поиск путей создания новых эффективных конструкций и материалов с использованием методов строительной механики. Соответствующая методологическая оптимизационная задача на вербальном уровне формулируется следующим образом. Найти квазиизотропную стержневую (ферменную) структуру минимального объёма (массы), удовлетворяющую ограничениям по прочности.

1 Методика исследований

Рассматривается квадратная плоская структура из некоторого материала, показанная на рисунке 1 и нагруженная внешними силами $P_1 = P_3 = 1,0$.

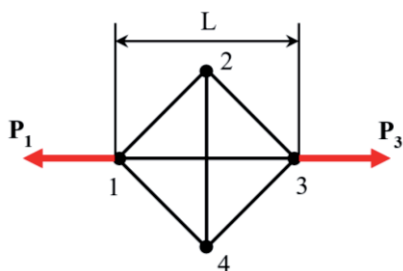


Рисунок 1 – Плоская структура из шести стержней

Стержни обозначены по номерам узлов. Приняты длины стержней $l_{13} = l_{24} = 1,0$ и площади поперечных сечений $F_{13} = F_{24} = 1,0$. В данном примере стержни 13 и 24 называются прямыми в отличие от косых – 12, 23, 34, 41.

В качестве основного варианта конструкции приняты площади поперечных сечений $F_{12} = F_{23} = F_{34} = F_{41} = 0,707$ из условия равенства объёмов прямых и косых стержней.

Для оценки эффективности силовых конструкций разработаны различные критерии [19-22], связанные в основном с соотношением таких противоречивых и конкурирующих характеристик, как прочность и вес.

1.1 Силовой фактор G

Силовой фактор G определяет одновременно величину и протяжённость действия внутренних усилий в конструкции. Для ферм – это сумма произведений модулей внутренних усилий в стержнях на длины стержней

$$G = \sum_{i=1}^n |N_i| l_i, \quad (1)$$

где i и n – номер и число элементов.

Рассматриваемая конструкция является статически неопределимой. Для оценки значимости этого фактора образованы дополнительные варианты конструкции. На рисунке 2 обозначение б) соответствует основному варианту, варианты а) и в) – с площадями поперечных сечений косых стержней $F_{косых} = 1,0$ и $0,5$ соответственно. В предположении работы стержней только на растяжение-сжатие расчёты дают распределение усилий в конструкции, показанное на рисунке 2.

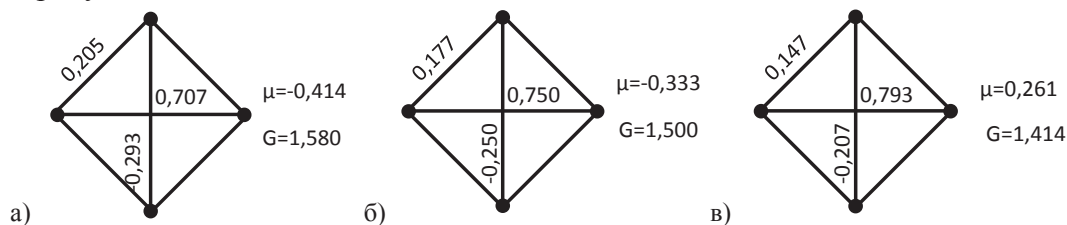


Рисунок 2 – Величины усилий в стержнях и значения силового фактора в вариантах конструкции с различными объёмами косых стержней. Здесь $\mu = \varepsilon_{24} / \varepsilon_{13}$ – коэффициент Пуассона, ε – относительное удлинение

Силовые факторы рассмотренных структур при различных соотношениях объёмов прямых и косых стержней приведены на рисунке 2 и сведены в таблицу 1.

Понятие силового фактора и обозначение через G впервые было предложено А.А. Комаровым в 1965 году в [22] под названием «силовой вес». В монографии [23, с.107-156] в связи с особенностями перевода этого термина на английский язык В.В. Васильевым предложено использовать термин *силовой фактор* (*Load-carrying Factor*). Это предложение представляется удачным, так как обобщение этого понятия на объёмные конструкции со сложным напряжённым состоянием приводят к следующему выражению для вычисления силового фактора

$$G = \int \sigma^{\text{экв}} dV \quad (2)$$

или приближенно

$$G = \sum_i^n \sigma_i^{\text{экв}} V_i, \quad (3)$$

где $\sigma_i^{\text{экв}}$ – среднее эквивалентное напряжение в i -том элементе, V_i – объём элемента.

Силовой фактор – величина размерная (Н · м). Вычисление G по (3) удобно, когда расчёт НДС конструкции ведётся по МКЭ. Многочисленными вычислительными экспериментами установлено, что величина G определяется, в основном, структурой, её геометрическими размерами и нагрузкой. На этом основании построены простые «весовые формулы», которые позволяют вычислять теоретические и практические объёмы материала конструкций различных структур на ранних стадиях проектирования

$$V_{\text{теор}} = \frac{G}{[\sigma]}, \quad (4)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

Однако размерность критерия G не позволяет ранжировать различные структуры и конструкции по весовой эффективности.

1.2 Безразмерный критерий силового совершенства структуры C_k

Безразмерный критерий силового совершенства структуры C_k определяется как отношение силового фактора G к характерной нагрузке P и характерному размеру L [24]

$$C_k = \frac{G}{LP}. \quad (5)$$

В рассматриваемом примере (рисунок 1) целесообразно выбрать $P = P_3$ и $L = l_{13}$. Так как приведённые на рисунке 2 результаты силового расчёта и вычисления G сделаны для $L = 1$ м и $P = 1$ Н, то значения соответствующих величин C_k и G совпадают. В предельном случае, когда площади поперечных сечений косых стержней равны нулю, внешние силы передаются по кратчайшему пути l_{13} между узлами 1 и 3 с усилием в стержне $N_{13} = P$ и $C_k = 1.0$. В [13, 25] можно найти примеры вычисления C_k для разнообразных конструкций. На рисунке 3 приводятся простейшие конструкции с соответствующими величинами C_k .

Через C_k можно оценить минимальный объём материала геометрически подобной конструкции, задавая её габариты – величину характерного размера L и величину характерной нагрузки P

$$V_{\text{теор}} = \frac{C_k LP}{[\sigma]}. \quad (6)$$

Безразмерный коэффициент C_K связывает величину и протяжённость действия внутренних усилий в конструкции. Чем он меньше, тем совершеннее силовая конструкция.

Замечания.

1. В статически определимых конструкциях C_K не зависит от распределения материала по элементам конструкции и определяется только её структурой (силовой схемой) и способом приложения внешних сил.

2. Вводимое здесь расширение понятия C_K на материалы предполагает возможность учёта неоднородности структуры материала и, в перспективе, управление её параметрами. Например, в случае слоистого КМ силовой фактор G_{KM} некоторого объёма V_0 и коэффициент $C_{K\ KM}$ могут быть определены следующим образом

$$G_{KM} = \sum_{i=1}^n \left| \sigma_i \right|_{арм} f_i V_0 + \sigma_{матр}^{экв} \left(1 - \sum_{i=1}^n f_i \right) V_0,$$

$$C_{K\ KM} = \frac{G_{KM}}{V_0 \sigma_0^{экв}},$$

где $\left| \sigma_i \right|_{арм}$ – модуль напряжения в однонаправленном слое с номером i армирующих волокон, f_i – объёмная доля волокон с i -той ориентацией в пакете, $\sigma_{матр}^{экв}$ – эквивалентное напряжение в матрице, V_0 – характерный объём, $\sigma_0^{экв}$ – среднее эквивалентное напряжение в объёме V_0 .

В [25] приводится значение $C_{K\ KM} = 3$ для равнонапряжённых композитных баллонов давления, совпадающее с результатами, полученными ранее Васильевым В.В. [26].

Упрощённая оценка массы конструкций из КМ через эквивалентные напряжения оболочки [27, 28] без учёта одноосной работы волокон может быть недостаточно адекватной.

1.3 Учёт неравнопрочности

На рисунке 4 показаны напряжения в трёх вариантах конструкции в соответствии с обозначениями на рисунке 2.

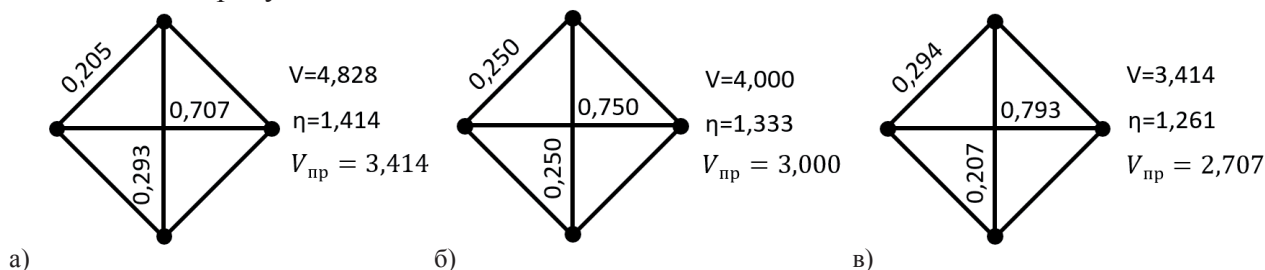


Рисунок 4 – Величины напряжений, коэффициентов избытка прочности η и значения потребных объёмов $V_{пр}$ вариантов конструкций

Рассмотренные шестистержневые конструкции по своим механическим свойствам близки к хорошо изученным слоистым структурам КМ, образованного из однонаправленных слоёв с высоко модульным армированием. Можно видеть, что структура б) с равными объёмами прямых и косых стержней соответствует квазиизотропной структуре КМ со схемой укладки $[0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ]$. Полученные деформационные, силовые и прочностные характеристики практически совпадают. Поэтому данная стержневая структура (рисунок 1) может рассматриваться как представительная ячейка [29] плоского мембранного слоистого композита.

Эти конструкции с одинаковыми структурами имеют различные суммарные объёмы материала стержней $V_{a,b,c}$ и большой разброс напряжений.

Удобно принять $[\sigma] = 1,0$ и оценивать влияние неравнопрочности конструкции с использованием понятия «избыток прочности» и безразмерного коэффициента избытка прочности η , определяя его как отношение допускаемого напряжения к максимальному, действующему в конструкции

$$\eta = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}}. \quad (7)$$

В рассматриваемом примере на рисунке 4а максимальное напряжение имеет стержень 13. Его величина $\sigma_{13} = 0,707$.

Коэффициент избытка прочности этой конструкции $\eta_a = \frac{1,0}{0,707} = 1,414$.

Для того, чтобы повысить напряжение в стержне 13 до допускаемого, необходимо уменьшить его площадь поперечного сечения путём деления на коэффициент избытка прочности

$$F_{13}^{\Pi} = \frac{F_{13}}{\eta_a} = \frac{1,0}{1,414} = 0,707.$$

Чтобы распределение усилий в конструкции (рисунок 2а) не изменилось, необходимо в такой же пропорции изменить и сечения остальных стержней. Тогда суммарный объём материала всех стержней также изменится. Он назван потребным по прочности и обозначен V_{np}

$$V_{a\ np} = \frac{V_a}{\eta} = \frac{4,828}{1,414} = 3,414.$$

Для удобства сравнительного анализа весовых и прочностных характеристик рассмотренных вариантов конструкции с одинаковой структурой результаты выполненных расчётов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчётов трёх вариантов конструкции

Вариант	$F_{\text{кос}}$	V	N_{13}	N_{24}	$N_{\text{кос}}$	μ	G	C_{κ}	$\sigma_{\max}$	$\eta_{\min}$	V_{np}
<i>a</i>	1,000	4,828	0,707	-0,293	0,205	-0,414	1,580	1,580	0,707	1,414	3,414
<i>б</i>	0,707	4,000	0,750	-0,250	0,177	-0,333	1,500	1,500	0,750	1,333	3,000
<i>в</i>	0,500	3,414	0,793	-0,207	0,147	-0,261	1,414	1,414	0,793	1,261	2,707
$\Delta\%$	50	29	11	29	29	37	11	11	11	11	21

Здесь $\Delta\%$ – отношение разности максимальной и минимальной величины в соответствующем столбце к максимальной.

Из данных таблицы 1 можно сделать следующие выводы.

- В простейшей статически неопределимой конструкции при изменении жёсткостей косых стержней вдвое усилия в них также существенно изменяются (до 29%).
- Характеристики G и C_κ также изменяются, но значительно меньше.
- Использование безразмерного коэффициента C_κ по (6) даёт прогноз минимального объёма конструкции значительно более точный, чем прогноз через коэффициент избытка прочности. Например, для базовой конструкции б) $V_{\sigma \min} = 1,5$ вдвое меньше, чем $V_{\sigma \text{пр}} = 3,0$.

Это обстоятельство позволяет использовать *безразмерный критерий силового совершенства конструкций для сравнения различных структур* [20].

2 Исследование пространственных стержневых конструкций с регулярными структурами

2.1 Выбор структур и конструкций

Рассматривается представительный объём со структурой в виде кубической решётки Браве [16] (см. рисунок 5) с рёбрами единичной длины в координатах x, y, z . В качестве базовой конструкции принята структура из двенадцати ортогональных стержней, расположенных по рёбрам, с единичной площадью их поперечных сечений $F_{opt} = 1,0$. Объём материала этой конструкции $V_{opt} = 12$.

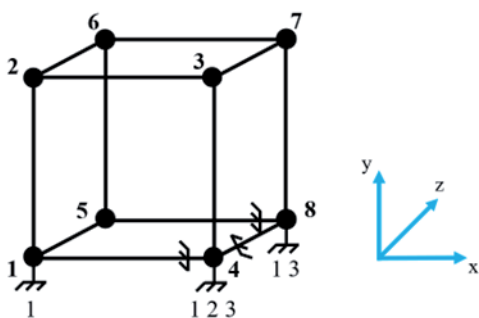


Рисунок 5 – Базовая кубическая структура

Можно предположить, что стержни линейно-упругие, соединены в узлах шарнирно и одинаково работают на растяжение – сжатие. Данная конструкция представляет собой механизм. Геометрически неизменяемые конструкции далее образуются добавлением стержней в плоскостях граней и внутри решётки. Для нумерации структур и соответствующих конструкций используется общее количество стержней. Рассматриваются следующие структуры возрастающей сложности.

Структура «16» образована добавлением четырёх стержней 1-7, 2-8, 3-5 и 4-6, которые называются диагональными (дг) длиной 1,732 с площадью поперечного сечения $F_{\text{дг}} = 1,732$. Объём этих стержней определён из условия равенства объёму стержней базовой конструкции.

Структура «18» образована добавлением к базовой шести косых стержней 1-3, 3-8, 8-6, 6-1, 1-8, 3-6 длиной 1,414 с $F_{\text{кос}} = 1,414$ из условия равенства объёму ортогональных стержней $V_{\text{орт}}$.

Структура «22» образована добавлением к структуре «18» четырёх диагональных стержней с $F_{\partial 2} = 1,732$.

Структура «24». Двенадцать косых стержней длиной 1,414 и $F_{\text{кос } 12} = 0,707$ расположены по два в каждой грани.

Структура «28» образована добавлением к структуре «24» четырёх диагональных стержней длиной 1,732 с площадью поперечного сечения 1,732.

На рисунке 6 показаны структуры «16», «18» и «24».

В сформированных структурах используется 13 возможных направлений ориентации стержней, считая базовые, с объёмом материала отдельно взятых стержней от 1 до 3. Этот набор конструкций – *вариант 1*. В качестве второго варианта набора конструкций рассмат-

риваются те же структуры «16 – 28» с одинаковыми площадями поперечных сечений всех стержней $F_i = 1,0$.

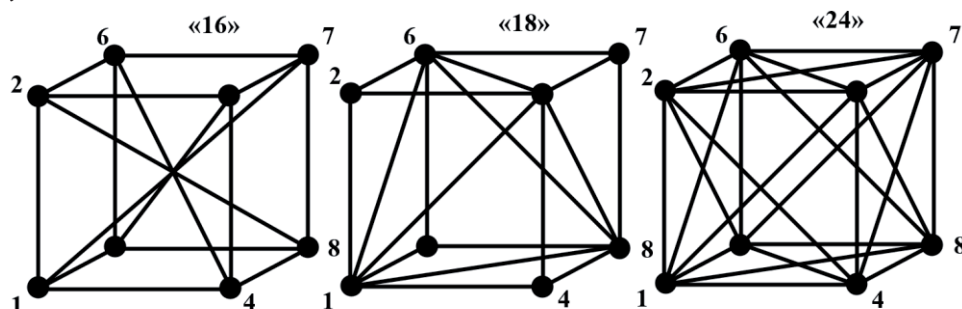


Рисунок 6 – Примеры кубических структур с возрастающей сложностью

При разработке *варианта 3* конструкций со структурами «16 – 28» в качестве референтного объёма стержней базовой конструкции использовался только объём стержней, имеющих одинаковое направление, например по оси $x - V_{x\text{ орт}} = 4$. Соответственно по *каждому* из четырёх диагональных направлений площадь поперечного сечения стержня назначалась $F_{\text{ос } 4} = 2,309$. Площади сечений шести косых стержней с оригинальной ориентацией каждого для структуры «18» назначались $F_{\text{кос } 6} = 2,828$. Площади сечений двенадцати косых стержней для структур «24» и «28» назначались $F_{\text{кос } 12} = 1,414$ и располагались по два в каждой грани, из которых только один имеет оригинальную ориентацию, как в структуре «18». При таком подходе к распределению материала по стержням реализуется принцип равного обеспечения каждого оригинального направления в представительном объёме материала.

2.2 Выбор нагрузок и вычислительные эксперименты

Нагрузки на представительный объём, заполненный стержневыми конструкциями, могут быть приложены в узлах в виде сосредоточенных сил. При назначении нагрузок использовались следующие соображения. Предполагалось, что представительный объём находится внутри *некоторой гипотетической упругой изотропной среды*, в которой могут действовать однородные нормальные и касательные напряжения различной величины и ориентации. Узловые силы назначались из условия статической эквивалентности напряжениям, действующим на грани представительного объёма, и считались для стержневых конструкций внешними.

Для исследования прочностных характеристик сформированных структур и конструкций рассматривались четыре случая нагружения внешними силами в узлах представительного объёма, показанные на рисунке 7 и обозначенные римскими цифрами.

I случай нагружения четырьмя узловыми силами $P_i = 1,0$ соответствует растяжению сплошного тела 1-8 в направлении оси z (рисунок 7а) с напряжением $\sigma = 4 \text{ Н/м}^2$ и равнодействующей характерной нагрузкой $P_I = 4 \text{ Н}$, приложенной к грани 1234.

Три следующих случая нагружения соответствуют сдвигу представительного объёма с касательным напряжением $\tau = 2,308 \text{ Н/м}^2$ и характерной касательной нагрузкой $P_{II} = P_{III} = P_{IV} = 2,308 \text{ Н}$ в различных направлениях (рисунки 7б, 7в, и 7г соответственно):

II случай P_{II} – равнодействующая касательных сил, действующих на грани 1234 в направлении оси x ;

III случай P_{III} – равнодействующая касательных сил, действующих на грани 1234 под углом 45° к оси x ;

IV случай P_{IV} – одновременное действие сил растяжения в направлении оси z и сжатия в направлении оси x , приложенных к граням 1234 и 4378 соответственно.

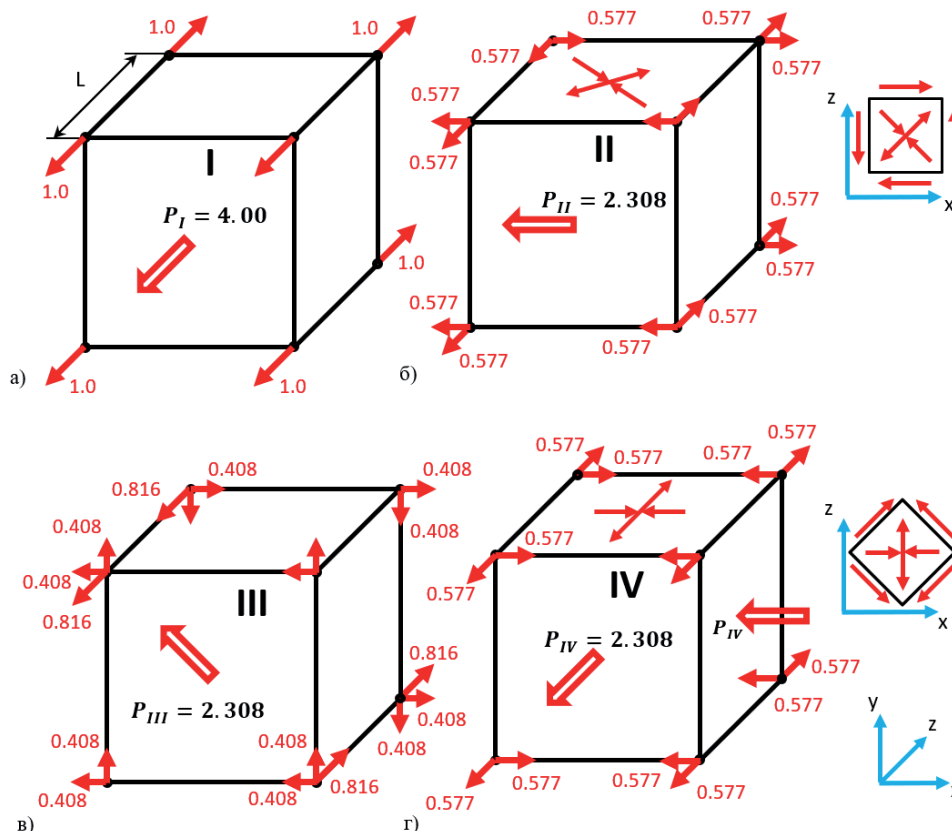


Рисунок 7 – Узловые нагрузки, действующие на рассматриваемые конструкции, и соответствующие характерные нагрузки (двойные стрелки)

Выбор случаев нагружения обусловлен тем, что данные виды напряжённого состояния часто оказываются определяющими прочность конструкций из традиционных материалов. Величина характерного касательного напряжения задана из условия равенства эквивалентного напряжения, вычисленного по четвёртой теории прочности (Губера-Мизеса), соответствующему одноосному напряжению в первом случае. Расчёты описанных конструкций выполнялись по МКЭ с закреплениями, показанными на рисунке 5.

Примечания.

1. Конструкция «16» способна воспринять самоуравновешенные нагрузки, показанные на рисунке 7а. Однако она геометрически изменяема. Поэтому в расчётах НДС конструкции с этой структурой добавлялись косые стержни, как в структуре «18», с площадью поперечного сечения на три порядка меньшей, чем в базовой конструкции F_{opt} .

2. При вычислении C_K в качестве характерной нагрузки P использовалась равнодействующая сил, приложенных в узлах одной грани с уравниванием в узлах противоположной грани. При таком подходе в рассматриваемых задачах в качестве характерной одноосной нагрузки принималась $P_I = 4$ Н и характерные касательные $P_{II} = P_{III} = P_{IV} = 2,308$ Н. В каче-

стве характерного размера L конструкции выбиралось расстояние от плоскости приложения характерной нагрузки до противоположной – уравнивающей. В данном случае – длина ребра $L = l_{15} = 1,0$ м. Таким образом конструкция рассматривается как устройство для передачи нагрузок P на расстояние L .

3. Допускаемое напряжение $[\sigma] = 1,0$ во всех случаях нагружения.

Результаты расчётов НДС конструкций обрабатывались по методике раздела 1 и представлены на рисунке 8 и в таблицах 2 – 5.

На рисунке 8 представлены максимальные напряжения для каждой структуры, выбранные из рассматриваемых случаев нагружения для каждого из трёх вариантов распределения материала в конструкциях.

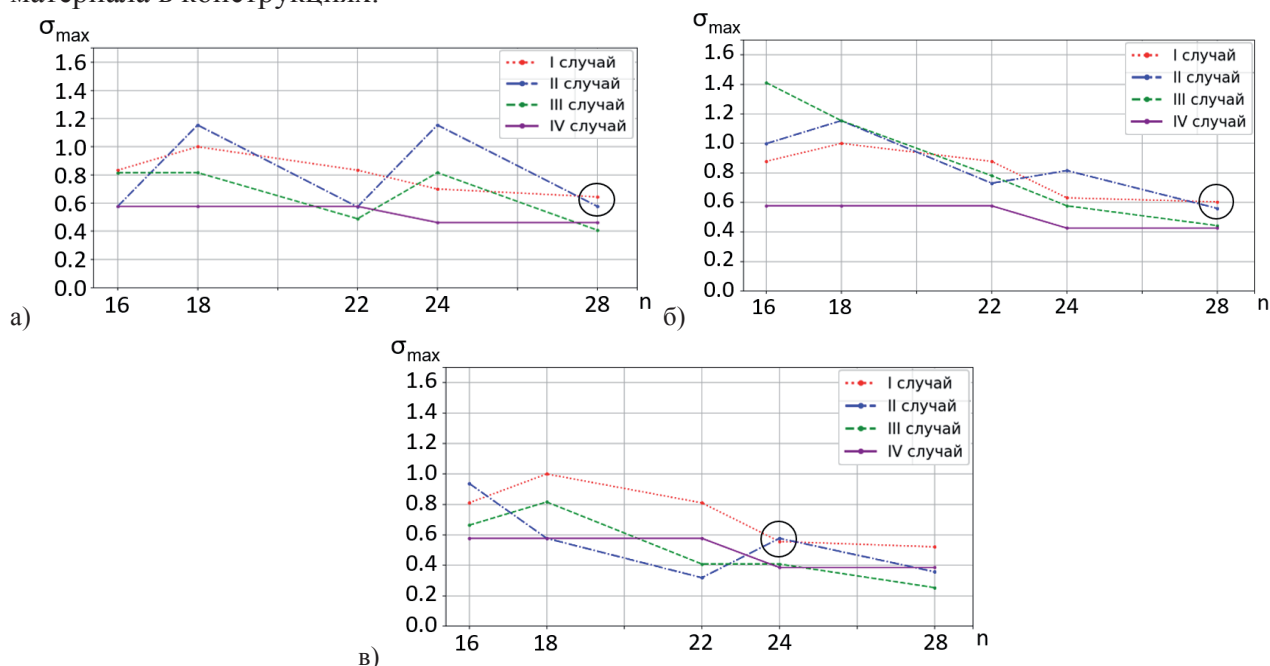


Рисунок 8 – Максимальные напряжения в стержнях: а) вариант 1, б) вариант 2, в) вариант 3

В таблицах 2 – 4 для трёх вариантов распределения материала приводится информация, полезная для оценки весовой эффективности рассматриваемых конструкций. Как аналог массы используется объём стержней V . Символом d обозначено количество оригинальных направлений стержней в соответствующих структурах. Римские цифры указывают на принадлежность соответствующих максимальных величин случаям нагружения. В качестве безразмерной величины весовой эффективности рассматриваемых вариантов распределения материала в конструкциях используются отношения V_{np} / V_4 , где $V_4 = 4,0$ – объём конструкции из четырёх стержней, нагруженных только растяжением, как показано на рисунке 7а, и отношения V_{min} / V_4 , где V_{min} – прогнозно-минимальные объёмы конструкции, вычисляемые по (6).

Таблица 2 – Первый вариант распределения материала

n	V	d	$\sigma_{\max}$	$G_{\max}$	$C_{\kappa \max}$	$\eta_{\min}$	V_{np}	V_{np} / V_4	$V_{\min}$	$V_{\min} / V_4$
16	24,00	7	0,833 (I)	9,23 (II)	4,00 (II)	1,20	19,99	5,00	9,23	2,31
18	24,00	9	1,154 (II)	11,42 (III)	4,95 (III)	0,87	27,70	6,92	11,42	2,86
22	36,00	13	0,833 (I)	9,23 (II)	4,00 (II)	1,20	29,99	7,50	9,23	2,31
24	24,00	9	1,154 (II)	6,53 (III)	2,83 (III)	0,87	27,70	6,92	6,53	1,63
28	36,00	13	0,644 (I)	7,73 (I)	3,18 (III)	1,55	23,18	5,80	7,73	1,93

Таблица 3 – Второй вариант распределения материала

n	V	d	$\sigma_{\max}$	$G_{\max}$	$C_{\kappa \max}$	$\eta_{\min}$	V_{np}	V_{np} / V_4	$V_{\min}$	$V_{\min} / V_4$
16	18,92	7	1,412 (III)	9,22 (II)	3,99 (II)	0,71	26,72	6,68	9,22	2,30
18	20,48	9	1,154 (II)	11,42 (III)	4,95 (III)	0,87	23,64	5,91	11,42	2,86
22	27,40	13	0,878 (I)	9,23 (II)	4,00 (II)	1,14	24,06	6,02	9,23	2,31
24	28,97	9	0,816 (II)	6,95 (I)	2,83 (III)	1,23	23,64	5,91	6,95	1,74
28	35,89	13	0,604 (I)	10,63 (III)	4,61 (III)	1,66	21,68	5,42	10,63	2,66

Таблица 4 – Третий вариант распределения материала

n	V	d	$\sigma_{\max}$	$G_{\max}$	$C_{\kappa \max}$	$\eta_{\min}$	V_{np}	V_{np} / V_4	$V_{\min}$	$V_{\min} / V_4$
16	28,00	7	0,938 (II)	9,23 (II)	4,00 (II)	1,07	26,25	6,56	9,23	2,31
18	36,00	9	1,000 (I)	11,42 (III)	4,95 (III)	1,00	36,00	9,00	11,42	2,86
22	52,00	13	0,810 (I)	9,23 (II)	4,00 (II)	1,24	42,10	10,52	9,23	2,31
24	36,00	9	0,577 (II)	7,55 (I)	2,83 (III)	1,73	20,78	5,19	7,55	1,89
28	52,00	13	0,521 (I)	8,65 (I)	3,10 (III)	1,92	27,11	6,78	8,65	2,16

В таблице 5 даны вычисленные значения C_{κ} для всех рассмотренных вариантов конструкций и всех случаев нагружения.

Таблица 5 – Значения коэффициента C_{κ}

C_{κ}	I вариант F_i				II вариант F_i				III вариант F_i			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
16	1,67	4,00	3,53	2,00	1,49	3,99	3,53	2,00	1,76	4,00	3,54	2,00
18	1,00	4,00	4,95	2,00	1,00	4,00	4,95	2,00	1,00	4,00	4,95	2,00
22	1,67	4,00	3,54	2,00	1,49	4,00	3,53	2,00	1,76	4,00	3,54	2,00
24	1,60	2,00	2,83	2,40	1,74	2,00	2,83	2,52	1,89	2,00	2,83	2,67
28	1,93	3,00	3,18	2,40	1,92	2,63	4,61	2,52	2,16	2,76	3,10	2,67

3 Анализ результатов расчётов

Вычислительные эксперименты позволяют сформулировать следующие соображения.

1. Относительная близость значений максимальных напряжений в конструкциях со структурами «24» и «28» в существенно различных случаях нагружения (рисунок 8) свидетельствует о том, что поставленная в работе задача найти квазиизотропную пространственную упругую систему из стержней имеет решение (с определённой точностью).

2. Можно видеть (рисунок 8) практически полное совпадение максимальных напряжений (отмеченное кружками) в конструкциях «24» и «28» в случаях нагружения I и II. С точки зрения прочности сформированные стержневые конструкции ведут себя как изотропный материал, соответствующий критерию Губера-Мизеса.

3. Свойство квазиизотропности в рассмотренных примерах обеспечено использованием кубической решётки Браве в качестве базовой структуры, последовательным наращиванием количества направлений дополнительных связей в структуре с сохранением симметрии относительно центра тяжести представительного объёма, а также назначением одинакового количества материала стержней по каждому направлению (рисунок 8в).

4. Вычисление отношений потребных по прочности объёмов V_{np} каждой из рассмотренных к минимальному объёму $V_4 = 4,0$ конструкции из четырёх стержней, нагруженных только растяжением (рисунок 7а), даёт величины в среднем близкие к 6,0 (таблицы 2-4). Откуда следует, что хаотическое армирование в объёмных КМ позволяет реализовать не более 17%

прочности армирующего материала. В примере раздела 2 соответствующее соотношение составило 3,0, которое хорошо известно для слоистых мембранных композитов и доказывается теоретически. Полученное в данной работе соотношение 6,0, по-видимому, соответствует теоретическому.

5. Определённый интерес представляет анализ величин C_k . В таблицах 2 – 4 представлены результаты вычисления $C_{k \max}$ для конструкций в различных случаях нагружения. В эксперименте площади поперечных сечений стержней назначались от 0,707 до 2,828. Из полученных результатов следует, что величина $C_{k \max}$ определяется в основном *структурой и ориентацией характерной нагрузки*. Значительно меньше этот критерий зависит от распределения материала по элементам конструкции.

6. В рассмотренных задачах величина C_k примерно одинакова по соответствующим случаям нагружения (таблица 5). Причём во втором случае P_{II} эта величина, соответствующая сдвиговой нагрузке (рисунок 7б), примерно вдвое больше, чем при простом растяжении (рисунок 7а). Этот результат хорошо согласуется с примерами а) и в) на рисунке 3. Четвёртый вариант нагрузки P_{IV} (рисунок 7г, также сдвиговой), даёт вдвое меньшую величину C_k по отношению ко второму, что объясняется совпадением ориентации главных напряжений в этом случае нагружения с ориентацией стержней в базовой ортогональной конструкции (рисунок 5).

7. В таблицах 2 – 4 дана выборка $C_{k \max}$ для каждой структуры из всех случаев нагружения. Через эти величины по (6) определены прогнозно-минимальные объёмы конструкции V_{min} , которые могут быть получены в результате оптимизации поперечных сечений стержней по условию прочности. В этих результатах следует отметить существенное отличие V_{min} от $V_{пр}$ в меньшую сторону для всех структур в среднем в три раза.

8. В таблицах 2 – 4 приводится информация о случаях нагружения, которые определили соответствующие значения $\sigma_{\max}$ и $C_{k \max}$ рассмотренных конструкций. В подавляющем большинстве – это сдвиговые нагрузки. Данный вывод соответствует выводам Дж. Гордона о важности понимания и учёта касательных напряжений конструкторами и материалововедами.

Заключение

В выполненной работе представляется наиболее существенным способ установления соответствия между пространственной структурой конструкции и величиной её безразмерного критерия силового совершенства. Методика генерации рациональных стержневых структур на основе решёток Браве может использоваться в проектной деятельности, например, для разработки модулей крупноразмерных космических конструкций и проектирования КМ различной природы. Как развитие данной работы представляет интерес проведение совместно с материалововедами силового анализа известных и перспективных кристаллических структур, которые должны обладать некоторыми экстремальными свойствами.

Таким образом, стержневое моделирование обладает определённым потенциалом для прогнозирования ряда механических характеристик материалов и конструкций.

Список источников

- [1] *Архангельский В.А.* Материал и конструкция. М.-Л.: Госмашметиздат, 1933. 119 с.
- [2] *Тимошенко С.П.* История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. М.: Государственное издательство технико-технической литературы, 1957. 537 с.

- [3] **Бернштейн С.А.** Очерки по истории строительной механики. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1957. 236 с.
- [4] **Гордон Дж.** Почему мы не проваливаемся сквозь пол. / Пер. с англ. С.Т. Милейко; Предисл. акад. Ю.Н. Работнова. М.: Изд-во «Мир», 1971. 272 с.
- [5] **Шухов В.Г.** Искусство конструкции. М.: Мир, 1994. 192 с.
- [6] **Васильев В.В.** Идеи В.Г. Шухова в современной аэрокосмической технике / Сборник научных трудов: Актуальные проблемы механики: современная механика и развитие идей В.Г. Шухова. Отв. ред. Ф.Л. Черноусько. М.: Наука, 2011. 191 с. С.111-127.
- [7] **Васильев В.В.** Анизогридные композитные сетчатые конструкции – разработка и применение в космической технике // Композиты и наноструктуры. 2009. №3. С.38-50.
- [8] **Перельмутер А.В.** Задачи синтеза в теории сооружений (краткий исторический обзор) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. №2. С.70-106.
- [9] **Комаров В. А.** Проектирование силовых схем авиационных конструкций // Актуальные проблемы авиационной науки и техники. М.: Машиностроение, 1984. С. 114-129.
- [10] **Комаров В.А.** Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы // Онтология проектирования. 2017. Т.7 (№2). С. 191-206.
- [11] **Bendsoe M.P., Sigmund O.** Topology Optimization: Theory, Methods and Applications. New York: Springer, 2003. 271 p.
- [12] **Кишов Е.А., Комаров В.А.** Топологическая оптимизация силовых конструкций методом выпуклой линеаризации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 1. С. 137-149.
- [13] **Komarov V.A., Boldyrev A.V., Kuznetsov A.S., Lapteva M.Y.** Aircraft design using a variable density model // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2012. Vol. 84. Issue 3. P. 162-171.
- [14] **Kurkin E.I., Kishov E.A., Lukyanov O.E., Espinosa Barcenas O.U.** Technique of considering the material anisotropy in topology optimization of short fibers composite structures // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1925. Issue 1.
- [15] **Разани Р.** Поведение равнопрочной конструкции и её отношение к конструкции минимального веса // Ракетная техника и космонавтика. 1965. Том 3. №12. С.35-39.
- [16] **Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков А.Ю.** Рентгенографический и электроннооптический анализ. М.: Изд-во «Металлургия». 1970. 366 с.
- [17] **Lomov S.V., Huysmans G., Luo Y., Parnas R.S., Prodromou A., Verpoest I., Phelan F.R.** Textile composites: modelling strategies // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2001. V. 32, № 10. P. 1379-1394.
- [18] **Комаров В.А., Павлов А.А., Павлова С.А.** Экспериментально-аналитическое определение упругих характеристик слоистого тканевого композита // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т.21, № 2. С. 65-79.
- [19] **Шэнли Ф.Р.** Анализ веса и прочности самолетных конструкций. М.: Оборонгиз. 1957. 408 с.
- [20] **Комаров В.А.** Весовой анализ авиационных конструкций: теоретические основы // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2000. №1. С. 31-39.
- [21] **Малков В.П., Угодчиков А.Г.** Оптимизация упругих систем. М.: Наука, 1981. 288 с.
- [22] **Комаров А.А.** Основы проектирования силовых конструкций. Куйбышев: Кн. изд-во. 1965. 88 с.
- [23] **Vasiliev V.V., Gurdal Z.** Optimal Design: Theory and Applications to Materials and Structures. CRC Press, 1999. 320 p.
- [24] **Комаров В.А.** Безразмерный критерий силового совершенства конструкций // Механика твёрдого тела. 2018. №4. С. 34-37.
- [25] **Болдырев А.В.** Весовой анализ крыльев нетрадиционной конфигурации // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2009. № 10. С. 57-60.
- [26] **Vasiliev V.V., Morozov E.V.** Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements. Third Edition. Elsevier. 2013. 833p.
- [27] **Boldyrev A.V., Kozlov D.M., Pavelchuk M.V.** Evaluation of Anisogrid Composite Lattice Structures Weight Effectiveness using the Load-carrying Factor // Procedia Engineering. 2017. Vol. 185. P. 153-159.
- [28] **Кретов А.С., Шатаев П.А.** К оценке массы фюзеляжа самолета при переходе на композиционные материалы // Известия вузов. Авиационная техника. 2020. №3. С. 17-26.
- [29] **Щербакова А.О.** Тканевый композит. Оценка упругодиссипативных характеристик // Вестн. Южно-Ур. ун-та. Сер. Матем. Мех. Физ.. 2014. 6:2. С. 40–48.

Сведения об авторе

Комаров Валерий Андреевич, 1941 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт в 1964 году, доктор технических наук (1976), профессор (1978), профессор кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского университета, директор научно-образовательного центра авиационных конструкций, член Российской академии инженерных наук и постоянный участник Европейского семинара в области обучения проектированию авиационных конструкций (EWADE). Является автором более 250 научных работ, в том числе 5 книг. Область научных интересов - механика, теория и практика проектирования самолетов. Author ID (РИНЦ): 174589; Author ID (Scopus): 23766833500. vkomarov@ssau.ru.



Поступила в редакцию 26.04.2023, после рецензирования 9.06.2023. Принята к публикации 19.06.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-175-191

Design and material

© 2023, V.A. Komarov

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

Abstract

Some aspects of the relationship between two engineering disciplines, materials science and structural mechanics, are considered. Core structures are discussed from representative cells and volumes of composites reinforced with long and short fibers to spatial structures with a regular structure. This article considers various approaches to prediction and estimations of the minimum mass of core systems at the initial stages of design. The main attention is paid to the study of the possibility of applying the dimensionless criterion of force perfection of a structure to the evaluation of the efficiency of materials with a heterogeneous structure. For this purpose, a computational experiment is set and described in detail, during which, on the basis of the simplest cubic Bravais lattice, truss structures of increasing complexity are generated sequentially and their properties are analyzed using structural mechanics methods. It is shown that truss modeling has a certain potential for predicting a number of mechanical characteristics of heterogeneous materials.

Key words: structure, material, design, loads, stresses, criteria, strength, quasi-isotropy.

For citation: Komarov V.A. Design and material [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 175-191. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-175-191.

Acknowledgment: the author thanks Professor S.T. Mileiko for his significant influence on the appearance of this work, Academician V.A. Soyfer for his advice to pay attention to the Bravais lattice; postgraduate students M.O. Spirina and R.F. Abdullaev for their help in preparing the digital material.

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

List of figures and tables

Figure 1 - A flat structure of six rods

Figure 2 - Values of forces in the rods and values of the Load-carrying Factor in the design options with different volumes of oblique rods

Figure 3 - Examples of the simplest designs with corresponding values of the dimensionless coefficient of force perfection C_k

Figure 4 - Stress values, excess strength coefficients η and the values of required volumes V_{np} of design options

Figure 5 - A basic cubic structure

Figure 6 - Examples of cubic structures with increasing complexity

Figure 7 - Nodal loads acting on the considering designs, and the corresponding *characteristic loads*

Figure 8 - Maximum stresses in the rods: a) option 1, b) option 2, c) option 3

Table 1 - Calculation results of three design options

Table 2 - The first option of the material distribution

Table 3 - The second option of the material distribution

Table 4 - The third option of the material distribution

Table 5 - Coefficient values C_k

References

- [1] *Arkhangelskij VA*. Material and design [In Russian]. M: Gosmashmetizdat, 1933. 119 p.
- [2] *Timoshenko SP*. History of the science of resistance of materials with brief information from the history of the theory of elasticity and the theory of structures [In Russian]. Moscow: State Publishers of Technical and Technical Literature, 1957. 537 p.
- [3] *Bernstein SA*. Essays on the History of Structural Mechanics [In Russian]. Moscow: State Publishers of Literature on Construction and Architecture, 1957. 236 p.
- [4] *Gordon J*. The new science of strong materials or why you don't fall through the floor. Penguin Books Harmondsworth, 1968. 119 p.
- [5] *Shukhov VG*. The Art of Design [In Russian]. Moscow: Mir Publishers, 1994. 192 p.
- [6] *Vasiliev VV*. Ideas of V.G. Shukhov in modern aerospace engineering [In Russian]. Collection of scientific papers: Actual problems of mechanics: modern mechanics and the development of the ideas of V.G. Shukhov. Rep. ed. F.L. Chernousko. 191 p. Moscow: Nauka, 2011. P.111-127.
- [7] *Vasiliev VV*. Anisogrid composite mesh structures - development and application in space technology [In Russian]. Composites and Nanostructures. 2009. №3. P.38-50.
- [8] *Perelmutter AV*. Problems of synthesis in the theory of structures (a brief historical review) [In Russian]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2016; 2: 70-106.
- [9] *Komarov VA*. Design of aircraft load-bearing structures [In Russian]. Actual problems of aviation science and technology. M.: Mechanical Engineering, 1984. P.114-129.
- [10] *Komarov VA*. Theoretical basis for design of load-bearing structures produced using additive technologies [In Russian]. Ontology of designing. 2017; 7(2): 191-206.
- [11] *Bendsoe MP, Sigmund O*. Topology Optimization: Theory, Methods and Applications. New York: Springer, 2003. 271 p.
- [12] *Kishov EA, Komarov VA*. Topology optimization of a load-bearing structure via the method of convex linearization [In Russian]. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2018; 17(1): 137-149.
- [13] *Komarov VA, Boldyrev AV, Kuznetsov AS, Lapteva MY*. Aircraft design using a variable density model. Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2012; 84(3): 162-171.
- [14] *Kurkin EI, Kishov EA, Lukyanov OE, Espinosa Barcenás OU*. Technique of considering the material anisotropy in topology optimization of short fibers composite structures. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1925(1).
- [15] *Razani R*. Behavior of Fully-stressed Structures and Its Relation to the Design of Minimal Weight structure [In Russian]. Rocket Technology and Astronautics. 1965; 3(12): 35-39.
- [16] *Gorelik SS, Rastorguev LN, Skakov AY*. Radiographic and electron-optical analysis [In Russian]. Moscow: Metallurgy Publishing House. 1970. 366 p.
- [17] *Lomov SV, Huysmans G, Luo Y, Parnas RS, Prodromou A, Verpoest I, Phelan FR*. Textile composites: modelling strategies. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2001; 32(1): 1379-1394.
- [18] *Komarov VA, Pavlov AA, Pavlova SA*. Experimental and analytical determination of the elastic characteristics of layered woven composites [In Russian]. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2022; 21(2): 65-79.
- [19] *Shanley FR*. Weight and Strength Analysis of Aircraft Structures. Moscow: Oborongiz. 1957. 408 p.
- [20] *Komarov VA*. Weight Analysis of Aviation Structures: Theoretical Foundations [In Russian]. All-Russian Scientific and Technical Journal "Polet". 2000 (№1): 31-39.
- [21] *Malkov VP, Ugodchikov AG*. Optimization of elastic systems [In Russian]. Moscow: Nauka, 1981. 288 p.
- [22] *Komarov AA*. Fundamentals of load-bearing structures design [In Russian]. Kuibyshev book publishing house. 1965. 88 p.
- [23] *Vasiliev VV, Gurdal Z*. Optimal Design: Theory and Applications to Materials and Structures. CRC Press, 1999. 320 p.

-
- [24] **Komarov VA**. Dimensionless criterion of power perfection of a structure [In Russian]. *Mechanics of Solids*. 2018; 4: 34-37.
- [25] **Boldyrev AV**. Weight analysis of wings of unconventional configuration [In Russian]. *All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight")*. 2009; 10: 57-60.
- [26] **Vasiliev VV, Morozov EV**. Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements. Third Edition. Elsevier. 2013. 833 p.
- [27] **Boldyrev AV, Kozlov DM, Pavelchuk MV**. Evaluation of Anisogrid Composite Lattice Structures Weight Effectiveness using the Load-carrying Factor. *Procedia Engineering*. 2017; 185: 153-159.
- [28] **Kretov AS, Shataev PA**. Preliminary assessment of the weight of the aircraft fuselage as a result of the transition to composite materials [In Russian]. *Izv. VUZ. Aviatsionnaya Tekhnika*. 2020; 3: 17-26.
- [29] **Shcherbakova AO**. Fabric composite. Estimation of elastically dissipative characteristics [In Russian]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya "Matematika. Mekhanika. Fizika"*. 2014. 6(2): 40-48.
-

About the author

Valeriy A. Komarov (b. 1941) graduated from the Kuibyshev Aviation Institute in 1964, received his Doctor of Technical Sciences Degree in 1976, Full Professor Degree in 1978. He is a Professor at Samara University (Department of aircraft construction and design). He is the Chief of the Research and Educational Center for Aircraft Construction (AVICON). He is a member of Russian Academy of Engineering Sciences and regular participant of the European Workshop on Aircraft Design Education (EWADE). He is the author of over 250 scientific papers including 5 books. His research interest is mechanics, theory and practice of aircraft structural design. Author ID (RSCI): 174589; Author ID (Scopus): 23766833500. vkomarov@ssau.ru.

Received April 26, 2023. Revised June 9, 2023. Accepted June 19, 2023.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.82

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-192-203



Онтология представления знаний о назначении персонифицированного лечения

© 2023, Р.И. Ковалев^{1,2}✉, В.В. Грибова^{1,2}, Д.Б. Окунь¹

¹ Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Аннотация

В работе описывается обобщённая онтология, позволяющая формировать знания о различных видах лечения (медикаментозном, восстановительном, хирургическом) вне зависимости от раздела медицины. Онтология – необходимый компонент создания информационной системы, ориентированной на решение класса задач планирования лечения. Планирование позволяет объединить виды лечения для различных заболеваний и разделов медицины. Описывается метод адаптации обобщённой онтологии к различным видам лечения и терминологии, привычной разработчику базы знаний – эксперту предметной области. Из обобщённой онтологии наследуются все специализированные онтологии по конкретным видам лечения, сохраняя её структуру и семантические зависимости. Такой подход обеспечивает создание баз знаний в системах поддержки принятия решений по комплексному назначению лечения пациента, открывая возможность создания единого решателя, обеспечивающего снижение затрат на разработку информационной системы. Обобщённая онтология разработана на облачной платформе *IACPaas* и в настоящее время используется для создания баз знаний в различных областях медицины.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, онтология, база знаний, заболевание, персонифицированное лечение.

Цитирование: Ковалев Р.И., Грибова В.В., Окунь Д.Б. Онтология представления знаний о назначении персонифицированного лечения // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №2(48). С.192-203. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-192-203.

Финансирование: работа выполнена в рамках госзаданий FZNS-2023-0010 (разработка обобщённой онтологии) и 0202-2021-0004 (разработка методов адаптации обобщённой онтологии).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В настоящее время актуальной задачей является создание систем поддержки принятия решений (СППР) в области медицины. Одним из важных классов задач в этой предметной области (ПрО) являются СППР по назначению лечения. На этом этапе совершается много ошибок, поскольку врачу необходимо учитывать большое количество различной информации (жалобы больного, результаты его лабораторного и инструментального исследований, сопутствующие заболевания, аллергии, совместимость лекарственных препаратов, противопоказания и др.) [1]. Также необходимо принимать во внимание специфику различных видов терапий, таких как медикаментозное, восстановительное лечение, или же хирургическое вмешательство. Принимать решения при таких условиях становится всё сложнее. Для уменьшения ошибок используют различные СППР, которые обеспечивают обработку значительного количества клинических признаков и предлагают свои рекомендации.

Разработано большое количество СППР, помогающих врачу назначить медикаментозное лечение, помочь спланировать тактику хирургической операции или план реабилитации (как правило, объединяющий медикаментозное и восстановительное лечение). Обзор, представленный в работах [2-5] показывает, что такие системы предназначены для лечения только одного заболевания или для их небольшой группы. При этом каждый вид лечения осуществляется отдельной системой, а структура знаний, лежащая в её основе, является существенно упрощённой по сравнению с имеющимися знаниями в этой области [6].

Использование врачом различных систем на практике не представляется возможным. Их создание и сопровождение для разработчиков - дорогой и трудоёмкий процесс. Решением является создание универсальной информационной системы [7], ориентированной на решение класса задач планирования лечения, которое объединяет его различные виды (медикаментозное, восстановительное и хирургическое) и не зависит от заболевания или раздела медицины в целом. Для применения на практике от СППР требуются понятность процесса рассуждения с объяснением полученных результатов, а также возможность своевременно модифицировать использующиеся в системе знания. Выполнение таких требований обеспечивает онтологический подход [8, 9], на основе которого могут быть созданы понятные специалистам базы знаний (БЗ) в привычных для них терминах и структуре ПрО.

Авторами создана онтологическая оболочка для СППР по назначению медикаментозного лечения [10]. Её использование различными исследовательскими группами показало удобство применения, простоту модификации БЗ экспертами без участия программистов. Существенным её недостатком является применимость только для медикаментозного лечения.

Целью работы является разработка обобщённой онтологии по комплексному назначению лечения пациента. Это позволит вне зависимости от заболевания и вида лечения формировать БЗ по назначению лечения, обеспечить быстрые (без перепрограммирования) их модификации и адаптацию к конкретным лечебным учреждениям.

1 Постановка задачи

Успешный опыт использования онтологий медикаментозного и восстановительного лечения [11] показал, что онтологические БЗ по соответствующим видам лечения могут формировать эксперты ПрО без посредников. Каждая такая онтология обеспечивает возможность формализации БЗ по соответствующему виду лечения в привычной, понятной экспертам-врачам терминологии и структуре, при этом соблюдаются правила порождения соответствующих элементов БЗ и онтологические ограничения.

Построение онтологий на основе двухуровневого подхода, поддерживаемого платформой *IACPaas* [12], в соответствии с которым онтология явно отделена от БЗ и представлена семантической (графовой) структурой, даёт дополнительные преимущества: возможность формирования множества БЗ на основе одной онтологии и унифицированного решателя, управляемого онтологией. Так обеспечивается переход к созданию программных оболочек, которые не зависят от заболевания или раздела медицины, а модификация БЗ не влечёт изменение решателя (программного кода). Создание новой системы сводится к формированию её БЗ. Недостатком созданных систем является разобщённость разных видов лечения, поскольку они имеют разные онтологии и решатели с пользовательскими интерфейсами. Полученный опыт использования онтологий показал, что для всех возможных видов лечения можно выделить общие понятия и структуру, а врачебные манипуляции имеют сходный алгоритм применения.

В обобщённой онтологии по комплексному воздействию на пациента должны наследоваться все специализированные онтологии по конкретным видам лечения, должна быть воз-

возможность задания характеристик объекта или процесса, их свойств и ограничений (периодичность, дозировка, способ применения, длительность, условия применения и др.). Отдельной задачей является разработка метода адаптации обобщённой онтологии к специализированным онтологиям с привычной для данного вида лечения структурой и терминологией.

2 Обобщённая онтология

Обобщённая онтология включает описание различных видов лечения в рамках конкретной патологии с учётом персональных данных пациента. Структурное представление онтологии лечения показано на рисунке 1¹.

Для каждого заболевания формируется модель лечения (или несколько моделей), которая может включать либо восстановительное, либо медикаментозное, либо хирургическое лечение, а также их комбинацию.

Модель лечения – совокупность медицинских мероприятий с доказанным клиническим эффектом по отношению к определённому патологическому процессу. Модель содержит описание состава, последовательности и объёма терапевтической практики, направленное на восстановление здоровья. Для каждого заболевания возможно текстовое описание *рекомендаций* – перечня мер или действий для врача или пациента для достижения наилучших результатов лечения и/или профилактики заболевания.

Основным структурным элементом онтологии является *схема лечения*, которая объединяет программы оказания врачебной помощи с множеством целей лечения, сгруппированных согласно варианту протекания заболевания. Каждая *цель лечения* содержит комплекс клинических мероприятий, направленный на конкретный аспект проводимого лечения (см. рисунок 2).

Лечение может быть разделено на этапы, каждый *этап лечения* представляет собой набор клинических мероприятий, организованный либо по временным отрезкам, либо по достижению показателей, соответствующих цели лечения. Каждый этап лечения содержит *комплекс воздействий* и *продолжительность этапа воздействия*. Структура раздела *Комплекс воздействий* позволяет формировать знания о любых манипуляциях с пациентом по различным видам лечения (см. рисунок 3).

Для персонафикации лечения предусмотрен многоуровневый комплекс *условий*, контролирующих возможность проведения медицинских мероприятий (см. рисунок 4). Каждое условие формально представлено клиническим комплексом критериев с чётко определёнными

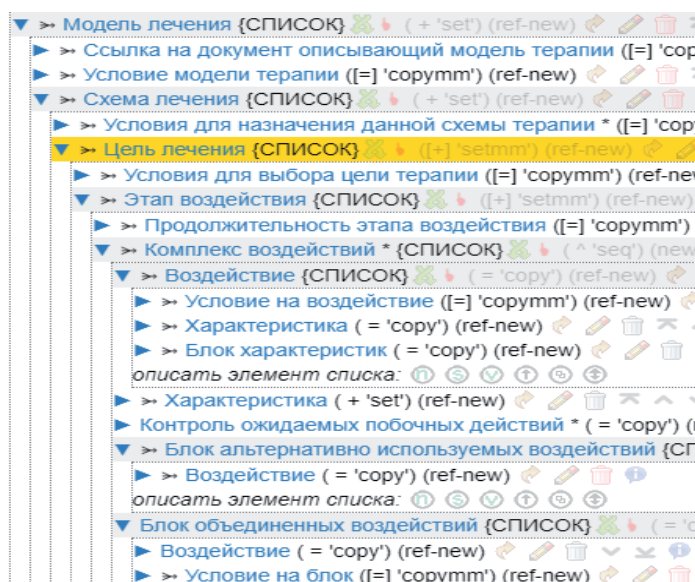


Рисунок 1 - Модель общей онтологии лечения

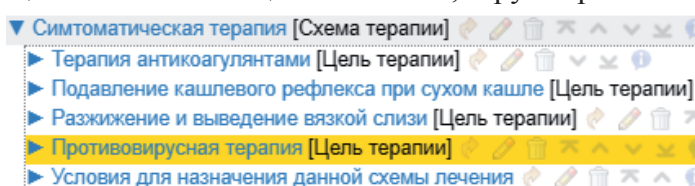


Рисунок 2 – Пример описания в БЗ раздела *Схема терапии*

¹ Все представленные на рисунках в статье скриншоты - это фрагменты онтологий или БЗ на платформе IACPaaS, <https://iacpaas.dvo.ru/>.

значениями. Под критерием понимается любой элемент записи в истории болезни, например: признак, параметр, наблюдение, заболевание, результат исследования, относящийся к персональным данным пациента или отражающий особенность клинической картины заболевания.

Воздействие - основной раздел онтологии, характеризующий тип манипуляций с пациентом (см. рисунок 5) и позволяющий описать любой фактор, имеющий доказанное лечебное действие, например, действующее вещество, физиопроцедура, массаж, хирургические манипуляции (перевязка, наложение шва, обработка ран и др.). Для этого в онтологии имеется блок **Условие на воздействие**, описывающий перечень клинических показателей, при которых данное воздействие может быть рекомендовано к использованию, а также разделы, описывающие свойства, параметры и ограничения воздействия: «**Характеристика**» и «**Блок характеристик**».

Характеристика – универсальный элемент онтологии, предназначенный для описания параметров, свойств и ограничений какого-либо объекта или процесса (см. рисунок 6). Он также содержит собственный блок условий, необходимый для выбора конкретной характеристики, соответствующей картине заболевания. Данный раздел имеет универсальную структуру и позволяет задавать любые типы значений и параметров воздействия, такие как периодичность, дозировка, сила тока, длительность воздействия, мазок на флору и др. Характеристики могут объединяться в **Блок характеристик**, например, блок **Правило приёма** включает **Форма выпуска**, **Способ применения** и др.

Блок **Характеристика** также содержится и в разделе **Комплекс воздействий**. На данном уровне онтология используется для формализации второстепенных элементов процесса терапии, например противопоказания, рекомендации и т.д.

Для возможности гибко и точно применять воздействия к пациенту присутствуют **Блок альтернативно используемых воздействий**, позволяющий описать некоторое множество альтернативных воздействий, когда необходимо выбрать одно из них, а также **Блок объединённых воздействий**, предназначенный для описания некоторого множества воздействий, использующихся совместно.

Для контроля проводимого лечения онтология имеет вершину (раздел) **Контрольные точки оценки эффективности лечения**. Она позволяет задавать временные отрезки контроля,

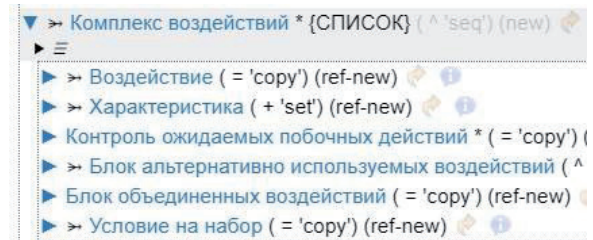
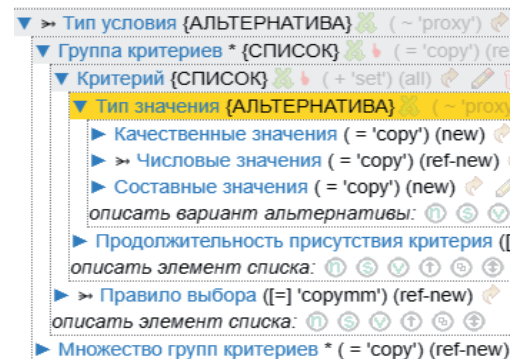
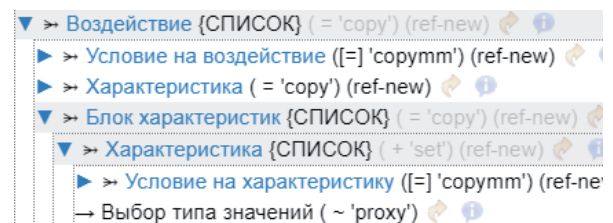
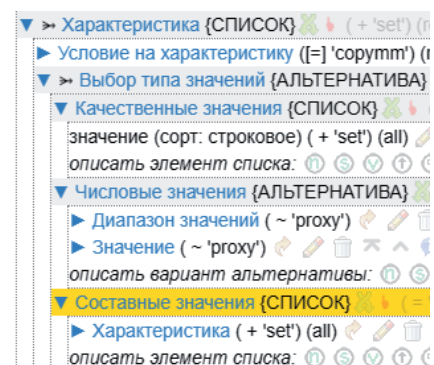
Рисунок 3 – Раздел *Комплекс воздействий*

Рисунок 4 – Структура условия

Рисунок 5 – Структура раздела *Воздействие*Рисунок 6 – Структура раздела *Характеристика*

целевые показатели, которые требуется достичь, а также необходимые воздействия в случае расхождения с ними (см. рисунок 7).

3 Адаптация обобщённой онтологии к специализированным онтологиям

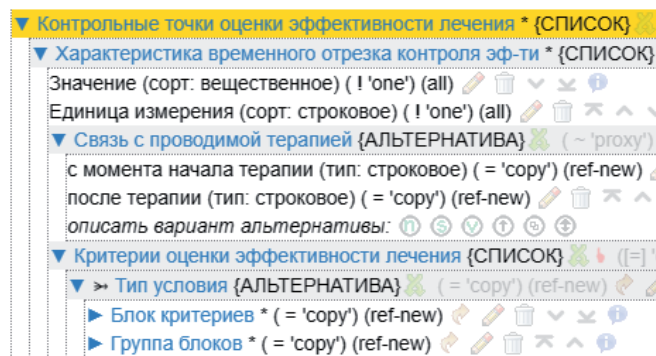


Рисунок 7 – Структура раздела *Контрольные точки оценки эффективности лечения*

ориентированной на тип лечения терминологии, в целевых онтологиях возможно различное количество вершин на одном структурном уровне, т.е. одному абстрактному понятию могут соответствовать несколько конкретных. Так формируются специализированные онтологии, адаптированные к конкретным видам лечения и требованиям пользователей. На основе данных онтологий формируются соответствующие БЗ по лечению заболеваний из различных разделов медицины.

В таблице соответствий для медикаментозной терапии (рисунок 8) основная спецификация начинается с уровня *Комплекс воздействий*, где термин *Воздействие* заменён на *Действующее вещество*. Уточнение разделов, формирующих различные параметры, свойства и ограничения происходит следующим образом. Вершина *Блок характеристик* заменяется на *Вариант назначения*, а термину *Характеристика* сопоставляется сразу несколько разделов: *Разовая дозировка*, *Суточная дозировка*, *Вариант применения*, *Кратность приёма*, *Продолжительность приёма*.

Таким образом, изменяя количество вершин и терминологию, обобщённая онтология адаптируется к конкретной онтологии, формируя специализированную онтологию по назначению медикаментозного лечения (см. рисунок 9А). Используя специализированную онтологию, создаётся соответствующая ей БЗ по медикаментозному лечению (см. рисунок 9Б).

Для адаптации к онтологии по восстановительной терапии используется другая таблица соответствий (см. рисунок 10).

Онтологическая модель имеет универсальную структуру представления знаний по назначению персонифицированного лечения. Чтобы её адаптировать на конкретный вид лечения, предложена таблица соответствий (см. рисунок 8). Она позволяет гибко настроить как структуру, так и терминологию обобщённой онтологии под специфику конкретной специализированной онтологии. Таблица соответствий содержит абстрактные понятия обобщённой онтологии и конкретные понятия в целевой онтологии. Помимо задания узкой,

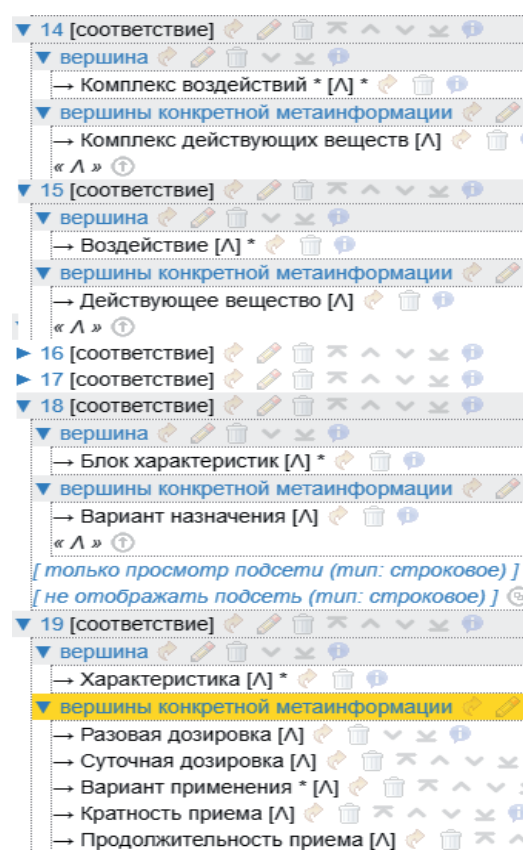


Рисунок 8 – Таблица соответствий для медикаментозной терапии



Рисунок 9 – Пример адаптации обобщённой онтологии к специализированной онтологии по назначению медикаментозного лечения и создания на её основе соответствующей БЗ:

А – фрагмент онтологии назначения медикаментозного лечения,

Б - БЗ о лечении туберкулеза

Здесь термин *Воздействие* заменён на *Методика ВЛ (восстановительного лечения)*, а *Блок характеристик* сопоставляется с *Режим проведения* и *Описание возможной / ожидаемой реакции при проведении процедуры*. Термин *Характеристика* заменяется на *Характеристика методики*, *Область / локализация применения реабилитационного фактора*, *Количество процедур*, *Продолжительность сеанса*, *Дни проведения*.

В результате формируется специализированная онтология, соответствующая восстановительному лечению (см. рисунок 11А). Аналогично можно формировать различные БЗ по восстановительному лечению заболеваний (см. рисунок 11Б).

4 Обсуждение

Интеллектуальная поддержка врача при назначении лечения является важной и актуальной задачей. Наиболее адекватный метод её решения основан на использовании онтологических БЗ [13]. Одной из специфичных проблем данного класса задач является частое изменение знаний о лечении заболеваний. Учитывая, что заболеваний много (более 10 тыс.), что имеются различные подходы к их лечению в зависимости от возраста, состояния пациента, формы заболевания, степени тяжести и др., поддержка БЗ в актуальном состоянии становится трудоёмкой.

▼ вершина	→ Комплекс воздействий * [Λ] *
▼ вершины конкретной метаинформации	→ Комплекс методик восстановительного лечения [Λ]
« Λ »	
15 [соответствие]	
▼ вершина	→ Воздействие [Λ] *
▼ вершины конкретной метаинформации	→ Методика ВЛ [Λ]
« Λ »	
17 [соответствие]	
▼ вершина	→ Характеристика [Λ] *
▼ вершины конкретной метаинформации	→ Характеристика методики [Λ]
	→ Область / локализация применения реабилитационного фактора [Λ]
	→ Количество процедур [Λ]
	→ Продолжительность сеанса [Λ]
	→ Дни проведения [Λ]
18 [соответствие]	
▼ вершина	→ Блок характеристик [Λ] *
▼ вершины конкретной метаинформации	→ Режим проведения [Λ]
	→ Описание возможной / ожидаемой реакции при проведении процедуры [Λ]

Рисунок 10 - Таблица соответствий для восстановительной терапии

▼ Модель терапии (СПИСОК) (+ 'set') (ref-new)	▼ Дорсопатия * [Заболевание]
▶ Ссылка на документ описывающий модель терапии ([=] 'copymm') (ref-new)	▶ Коды МКБ-10
▶ Условие модели терапии ([=] 'copymm') (ref-new)	▶ Комплексная реабилитация больных дорсопатией поясничного отдела позвоночника.
▼ Схема терапии (СПИСОК) ([+] 'setmm') (ref-new)	▶ Ссылка на документ описывающий модель терапии
▶ Условия для назначения данной схемы лечения * ([=] 'copymm') (ref-new)	▼ 1 [Схема терапии]
▶ Цель терапии (СПИСОК) ([+] 'setmm') (ref-new)	▼ Снижение частоты характерных клинических симптомов [Цель терапии]
▶ Условия для выбора цели терапии ([=] 'copymm') (ref-new)	▼ 1 [Этап воздействия]
▼ Этап воздействия (СПИСОК) ([+] 'setmm') (new)	▶ Продолжительность этапа терапии
▶ Продолжительность этапа терапии (= 'copy') (ref-new)	▶ Комплекс методик восстановительного лечения
▶ Комплекс методик восстановительного лечения (СПИСОК) (= 'copy') (ref-new)	▼ Альтернативный набор методик
▶ Альтернативный набор методик (= 'copy') (ref-new)	▼ Ингаляции [Методика ВЛ]
▶ Совместно используемые методики * (= 'copy') (ref-new)	▶ Используемый сбор [Характеристика методики]
▶ Методика ВЛ (СПИСОК) (+ 'set') (ref-new)	▶ Качественные значения
▶ Условия применения методики ([+] 'setmm') (ref-new)	корень пиона отвар [значение (сорт: строковое)]
▶ Характеристика методики ([+] 'setmm') (all)	[значение (сорт: строковое)]
▶ Выбор типа значений {АЛЬТЕРНАТИВА} (~ 'proxy')	[Условие на характеристику]
▶ Качественные значения (= 'copy') (new)	▶ Аппарат распылитель [Характеристика методики]
▶ Числовые значения (= 'copy') (ref-new)	▶ Качественные значения
▶ Составные значения (= 'copy') (new)	ГЭГ-2 [значение (сорт: строковое)]
описать вариант альтернативы: ① ② ③ ④ ⑤ ⑥	[значение (сорт: строковое)]
▶ Условие на характеристику ([=] 'copymm') (ref-new)	[Условие на характеристику]
описать элемент списка: ① ② ③ ④ ⑤ ⑥	▶ Продолжительность процедуры [Характеристика методики]
▶ Блок характеристик методики ([+] 'seqmm') (new)	▶ Числовые значения
▶ Описание возможной / ожидаемой реакции при проведении процедуры	[Условие на характеристику]
▶ Область / локализация применения реабилитационного фактора (СПИСОК)	▼ СМТ-терапия [Методика ВЛ]
▶ Выбор типа значений (~ 'proxy')	▶ Оборудование [Характеристика методики]
▶ Условие на характеристику ([=] 'copymm') (ref-new)	▶ Род работы [Характеристика методики]
описать элемент списка: ① ② ③ ④ ⑤ ⑥	▶ Частота модуляции [Характеристика методики]
▶ Режим проведения (= 'copy') (ref-new)	▶ Глубина модуляции [Характеристика методики]
▶ Контроль ожидаемых побочных действий * ([=] 'copymm') (ref-new)	▶ Числовые значения
▶ Ряд терапии (сорт: строковое) ([+] 'opemmm') (all)	50.0 [значение (сорт: вещественное)]
описать элемент списка: ① ② ③ ④ ⑤ ⑥	75.0 [значение (сорт: вещественное)]
▶ Условия на комплекс (= 'copy') (ref-new)	100.0 [значение (сорт: вещественное)]
▶ Дни применения (= 'copy') (ref-new)	% [единица измерения (сорт: строковое)]
	[значение (сорт: вещественное)]
	[Условие на характеристику]
	▼ Укутывание [Методика ВЛ]

Рисунок 11 - Пример адаптации обобщённой онтологии к специализированной онтологии по назначению восстановительного лечения и создания на её основе соответствующей БЗ:

А – фрагмент онтологии назначения восстановительного лечения,

Б – фрагмент БЗ по комплексной реабилитации

Поэтому в таких классах задач перед разработчиками БЗ и СППР в качестве ключевых требований выдвигаются следующие: изменение знаний не должно приводить к изменению программного кода решателя; формирование и сопровождение БЗ должно осуществляться носителем информации (экспертом ПрО) без посредников; система должна быть ориентирована на широкий класс заболеваний и поддерживать возможность описания любого вида лечения [14].

Технология разработки интеллектуальных систем с онтологическими БЗ на платформе *IACPaas* поддерживает создание специализированных оболочек за счёт двухуровневого подхода к разработке БЗ. В соответствии с ним онтологии явно отделяются от БЗ, решатель задач основан на онтологии. Проводя аналогию с программированием, онтология является формальным параметром, алгоритм решения формируется с его использованием (т.е. решатель строится, используя онтологические термины), а конкретная БЗ является фактическим параметром. Таким образом обеспечивается независимость решателя от конкретной БЗ. Данный подход использовался авторами на протяжении ряда лет. Была создана оболочка для СППР по медикаментозному лечению. На её основе разработаны прикладные интеллектуальные системы – помощники врача по назначению лечения для ряда заболеваний (туберкулез, COVID-19, ОРВИ, болезни пищеварения, ишемическая болезнь сердца). Однако расширение функциональности системы - добавление восстановительного и хирургического лечения - потребовало бы разработать соответствующие онтологии и решатели. Несмотря на то, что онтология отделена непосредственно от БЗ, допускаются корректировки, уточнения/изменения терминологии, а это повлечёт изменение решателя (программного кода).

Эти факторы явились мотивацией разработки нового подхода, схема которого приведена на рисунке 12.

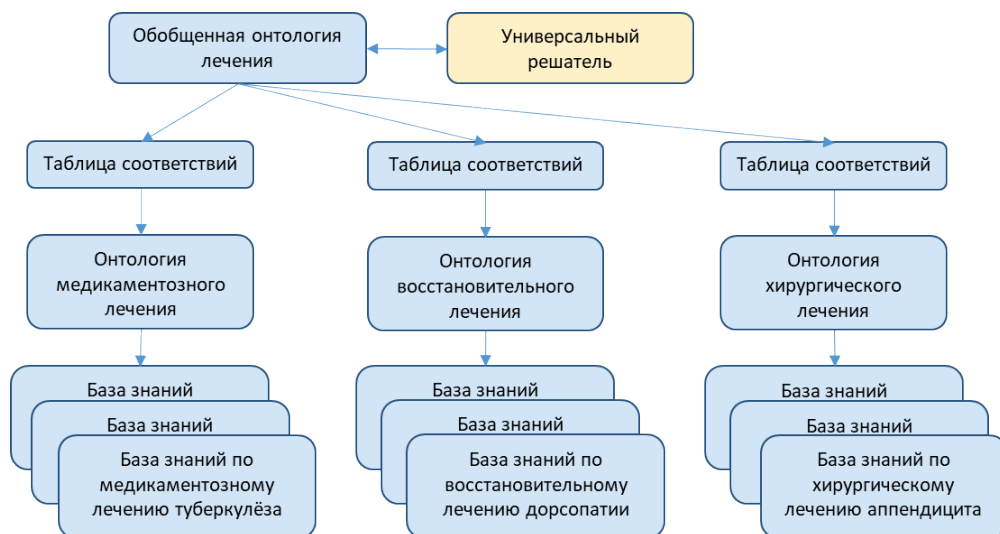


Рисунок 12 – Схема предлагаемого подхода к созданию интеллектуальных систем на основе обобщённой онтологии лечения

В предложенном подходе основу составляет обобщённая онтология лечения, которая через таблицу соответствия может быть адаптирована к целевой онтологии (восстановительного, медикаментозного, хирургического лечения). Универсальный решатель основан на обобщённой онтологии, поскольку все блоки и разделы обобщённой и специализированных онтологий имеют одинаковую структуру и семантический смысл и, как следствие, идентичный алгоритм обработки (решатель). Любая модификация онтологии не влечёт изменения решателя. Эксперты ПрО формируют БЗ в терминах специализированных онтологий, которые могут быть гибко (через таблицу соответствия) адаптированы к их требованиям.

Заключение

В работе представлена обобщённая онтология для назначения лечения и метод её адаптации к онтологиям, реализующим различные виды лечения. Эта онтология использована для разработки оболочки СППР по назначению лечения. Эксперты обеспечивают формирование её БЗ.

Предложенный подход к созданию системы на основе обобщённой онтологии лечения открыл возможность разработки универсального решателя, использующего различные специализированные онтологии, и соответствующих БЗ, а также объединения различных видов лечения в одной системе.

Для адаптации онтологии к конкретным условиям необходимо сформировать таблицу соответствий. Возможна адаптация онтологии к конкретным лечебным заведениям и специалистам, которые хотят использовать собственную специализированную онтологию, используя единый универсальный решатель. Такой подход позволяет снизить затраты на разработку и сопровождение интеллектуальных систем по назначению персонифицированного лечения.

Список источников

- [1] **Федосеев Г.Б.** Врачебные ошибки: характер, причины, последствия, пути предупреждения // *Терапия*. 2018. №5(23). С.109-115. DOI:10.22328/2079-5343-2020-11-3-111-117.
- [2] **Ефименко И.В., Хорошевский В.Ф.** Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в медицине: ретроспективный обзор состояния исследований и разработок и перспективы. – Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2017). Изд-во БГУИР. С.251-260.
- [3] **Moghadam S. et al.** The effects of clinical decision support system for prescribing medication on patient outcomes and physician practice performance: a systematic review and meta-analysis // *BMC medical informatics and decision making*. 2021. Vol.21. No.1. P.1-26. DOI: 10.1186/s12911-020-01376-8.
- [4] **Sutton R.T. et al.** An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success // *NPJ digital medicine*. 2020. Vol.3. No.1. P.17. DOI: 10.1038/s41746-020-0221-y.
- [5] **Кобринский Б.А.** Системы искусственного интеллекта в медицинской практике: состояние и перспективы // *Вестник Росздравнадзора*. 2020. №. 3. С.37-43. DOI: doi.org/10.35576/2070-7940-2020-3-37-43.
- [6] **Haendel M.A., Chute C.G., Robinson P.N.** Classification, ontology, and precision medicine // *New England Journal of Medicine*. 2018. Vol.379. No.15. P.1452-1462. DOI: 10.1056/NEJMr1615014.
- [7] **Загоруйко Г.Б.** Методология разработки интеллектуальных СППР и её применение для задач медицинской диагностики // Информационные технологии и системы: Труды Седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием, Ханты-Мансийск, 12–16 марта 2019 г.
- [8] **Aminu E.F. et al.** A review on ontology development methodologies for developing ontological knowledge representation systems for various domains // *International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB)*. 2020. Vol.12, No.2, P.28-39. DOI: 10.5815/ijeeb.2020.02.05.
- [9] **Tudorache T.** WebProtégé: A Collaborative Ontology Editor and Knowledge Acquisition Tool for the Web // *Semantic Web Journal*. 2013. Vol. 4, No 1. P.89-99. DOI: 10.3233/SW-2012-0057.
- [10] **Ковалев Р.И., Грибова В.В., Окунь Д.Б.** Специализированная оболочка для построения интеллектуальных систем назначения медикаментозного лечения // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2020. №4. С.66-79. DOI 10.14357/20718594200407.
- [11] **Ковалев Р.И., Бородулина Е.А., Грибова В.В., Еременко Е.П., Бородулин Б.Е., Колсанов А.В., Окунь Д.Б., Ураксина М.В., Федорищев Л.А.** Интеллектуальный сервис управления процессом лечения больных туберкулезом легких // *Врач и информационные технологии*. 2021. №2. С.36-45. DOI: 10.25881/18110193_2021_2_36.
- [12] **Грибова В.В., Клещев А.С., Москаленко Ф.М., Тимченко В.А., Федорищев Л.А., Шалфеева Е.А.** Облачная платформа IASPaas для разработки оболочек интеллектуальных сервисов: состояние и перспективы развития // *Программные продукты и системы*. 2018. Т.31. №3. С.527-536. DOI:10.15827/0236-235X.123.527-536.
- [13] **Гаврилова Т.А., Страхович Э.В.** Визуально-аналитическое мышление и интеллект-карты в онтологическом инжиниринге // *Онтология проектирования*. 2020. Т.10. №1. С.87-99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.

- [14] *Mahadevaiah G. et al.* Artificial intelligence- based clinical decision support in modern medical physics: selection, acceptance, commissioning, and quality assurance // *Medical physics*. 2020. Vol.47. No5. P.e228-e235. DOI: 10.1002/mp.13562.

Сведения об авторах



Ковалев Роман Игоревич, 1995 г. рождения. Окончил Дальневосточный федеральный университет по специальности «Программная инженерия». Научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН. Научные интересы: онтологии и базы знаний, интеллектуальные системы. AuthorID (РИНЦ): 1141695; AuthorID (Scopus): 57289025600; ResearcherID (WoS): AAD-7187-2022; ORCID: 0000-0002-1704-2675. koval-995@mail.ru ✉.

Грибова Валерия Викторовна, 1965 г. рождения. Окончила Ленинградский политехнический институт по специальности «Прикладная математика».

Заместитель директора по научной работе, научный руководитель лаборатории интеллектуальных систем Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, д.т.н., чл.-корр. РАН. Научные интересы: онтологии и базы знаний, прикладные и проблемно-ориентированные системы, основанные на знаниях, управление базами знаний.

В списке научных трудов более 280 работ. AuthorID (РИНЦ): 7400; AuthorID (Scopus):

7801667631; ResearcherID (WoS): Q-4250-2016; ORCID: 0000-0001-9393-351X. gribova@iacp.dvo.ru.



Окунь Дмитрий Борисович. 1973 г. рождения. Окончил Владивостокский государственный медицинский университет по специальности «Лечебное дело» в 1996 году, к.м.н. (2000). Научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН. Author ID (РИНЦ): 642886; Author ID (Scopus): 57204598165; Researcher ID (WoS): Q-3163-2016; SPIN-код: 8390-2749; ORCID: 0000-0002-6300-846X; okdm@iacp.dvo.ru

Поступила в редакцию 14.03.2023, после рецензирования 27.03.2023. Принята к публикации 22.05.2023.



Ontology of knowledge representation about the prescribed personalized treatment

© 2023, R.I. Kovalev^{1,2}✉, V.V. Gribova¹, D.B. Okun¹

¹ Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russia

² Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok, Russia

Abstract

The paper describes a generalized ontology that makes it possible to form knowledge about various types of treatment (medicamental, restorative, surgical), regardless of the branch of medicine. Ontology is a necessary component for creating an information system focused on solving a class of treatment planning problems. Planning allows you to combine treatments for various diseases and branches of medicine. A method for adapting a generalized ontology to various types of treatment and terminology, which is familiar to the developer of the knowledge base, an expert in the subject area, is described. All specialized ontologies for specific types of treatment are inherited from the generalized ontology, preserving its structure and semantic dependencies. This approach ensures the creation of knowledge bases in decision support systems for the complex prescription of patient treatment, opening up the possibility of creating a single solver, which provides a significant reduction in system development costs. The generalized ontology was developed on the IACPaaS cloud platform and is currently used to create knowledge bases in various fields of medicine.

Key words: decision support system, ontology, knowledge base, disease, personalized treatment.

For citation: Kovalev R.I., Gribova V.V., Okun D.B. Ontology of knowledge representation about the prescribed personalized treatment [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 192-203. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-192-203.

Financial Support: This work was partially supported by the state tasks FZNS-2023-0010 (development of a structure of generalized ontology), as well as 0202-2021-0004 (development of methods of adaptation of generalized ontology).

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

List of figures

Figure 1 - Model of the general ontology of treatment

Figure 2 - Description in the knowledge base of the *Therapy Scheme* section

Figure 3 - The *Complex of influence* section

Figure 4 - Condition structure

Figure 5 - Structure of the *Influence* section

Figure 6 - Structure of the *Characteristic* section

Figure 7 - Structure of the *Control points for evaluating the effectiveness of treatment* section

Figure 8 - Table of relation for drug therapy

Figure 9 - An example of adapting a generalized ontology to a specialized ontology by purpose drug treatment and the creation on its basis of the corresponding knowledge base: a – a fragment of the ontology of drug treatment prescription, b - KB on the treatment of tuberculosis

Figure 10 - Table of relation for rehabilitation therapy

Figure 11 - An example of adapting a generalized ontology to a specialized ontology by purpose rehabilitation treatment and the creation on its basis of an appropriate KB: a - a fragment of the ontology of the appointment of restorative treatment, b - fragment of the KB on complex rehabilitation

Figure 12 - Scheme of the proposed approach to the creation of intelligent systems based on a generalized treatment ontology

References

- [1] **Fedoseev GB.** Medical errors: nature, causes, consequences, ways of prevention [In Russian]. *Therapy*. 2018; 5(23): 109-115. DOI:10.22328/2079-5343-2020-11-3-111-117.
- [2] **Efimenko IV, Khoroshevsky VF.** Intelligent decision support systems in medicine: a retrospective review of the state of research and development and prospects [In Russian]. Open semantic technologies for designing intelligent systems (OSTIS-2017). Publishing house of BSUEP. P.251-260.
- [3] **Moghadam S et al.** The effects of clinical decision support system for prescribing medicine on patient outcomes and physician practice performance: a systematic review and meta-analysis // *BMC medical informatics and decision making*. 2021; 21(1): 1-26. DOI: 10.1186/s12911-020-01376-8.
- [4] **Sutton RT et al.** An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success // *NPJ digital medicine*. 2020; 3(1): 1-17. DOI: 10.1038/s41746-020-0221-y.
- [5] **Kobrinisky BA.** Artificial intelligence systems in medical practice: state and prospects [In Russian]. *Bulletin of Roszdravnadzor*. 2020. No. 3. P.37-43. DOI: doi.org/10.35576/2070-7940-2020-3-37-43.
- [6] **Haendel MA, Chute CG, Robinson PN.** Classification, ontology, and precisionmedicine // *New England Journal of Medicine*. 2018; 379(15): 1452-1462. DOI: 10.1056/NEJMra1615014.
- [7] **Zagorulko GB.** Methodology for the development of intelligent DSS and its application for the tasks of medical diagnostics [In Russian]. *Information technologies and systems* [In Russian]. Proceedings of the Seventh All-Russian Scientific Conference with international participation, Khanty-Mansiysk, March 12-16, 2019.
- [8] **Aminu EF et al.** A review on ontology development methodologies for developing ontological knowledge representation systems for various domains. // *International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB)*. 2020. Vol.12, No.2, P.28-39. DOI: 10.5815/ijieeb.2020.02.05.
- [9] **Tudorache T.** WebProtégé: A Collaborative Ontology Editor and Knowledge Acquisition Tool for the Web // *Semantic Web Journal*. 2013; 4(1): 89-99. DOI: 10.3233/SW-2012-0057.
- [10] **Kovalev RI, Gribova VV, Okun DB.** A specialized shell for building intelligent systems for prescribing medical treatment [In Russian]. *Artificial intelligence and decision-making*. 2020; 4: 66-79. DOI 10.14357/20718594200407.
- [11] **Kovalev RI, Borodulina EA, Gribova VV, Eremenko EP, Borodulin BE, Kolsanov AV, Okun DB, Uraksina MV, Fedorishchev LA.** Intelligent service for managing the treatment of patients with pulmonary tuberculosis [In Russian]. *Doctor and information technologies*. 2021; 2: 36-45. DOI: 10.25881/18110193_2021_2_36.
- [12] **Gribova VV, Kleshchev AS, Moskalenko FM, Timchenko VA, Fedorishchev LA, Shalfeeva EA.** IACPaaS cloud platform for the development of intelligent services shells: state and prospects of development [In Russian]. *Software products and systems*. 2018; 31(3): 527-536. DOI:10.15827/0236-235X.123.527-536.
- [13] **Gavrilova TA, Strahovich EV.** Visual and analytical thinking and intelligence maps in ontological engineering [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2020; 10(1): 87-99. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
- [14] **Mahadevaiah G. et al.** Artificial intelligence- based clinical decision support in modern medical physics: selection, acceptance, commissioning, and quality assurance. *Medical physics*. 2020. 47(5): e228-e235. DOI: 10.1002/mp.13562.

About the authors

Roman Igorevich Kovalev (b. 1995) graduated from the Far Eastern Federal University with a degree in Software Engineering. Post-graduate student of the Far Eastern Federal University, researcher at the Laboratory of Intelligent Systems of the Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The scientific interests are ontologies and knowledge bases, and intelligent systems. Author ID (RSCI): 1141695; Author ID (Scopus): 57289025600; Researcher ID (WoS): AAD-7187-2022; ORCID: 0000-0002-1704-2675. koval-995@mail.ru ✉.

Valeria Viktorovna Gribova (b. 1965) graduated from the Leningrad Polytechnic Institute with a degree in Applied Mathematics, Doctor of Technical Sciences (2008). Deputy Director for Scientific Work, Scientific supervisor of the Laboratory of Intelligent Systems. The scientific interests are ontologies and knowledge bases, applied and problem-oriented systems based on knowledge, and knowledge base management. There are more than 280 works in the list of scientific works. Author ID (RSCI): 7400; Author ID (Scopus): 7801667631; Researcher ID (WoS): Q-4250-2016 ORCID: 0000-0001-9393-351X. gribova@iacp.dvo.ru.

Dmitry Borisovich Okun (b. 1973) graduated from the Vladivostok State Medical University with a degree in Medical science in 1996, Ph.D. (2000). Researcher at the Laboratory of Intellectual Systems of the Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Author ID (RSCI): 642886; Author ID (Scopus): 57204598165; Researcher ID (WoS): Q-3163-2016; SPIN code: 8390-2749; ORCID ID: 0000-0002-6300-846X; okdm@iacp.dvo.ru.

Received March 14, 2023. Revised March 27, 2023. Accepted May 12, 2023.



Аналитическое и компьютерное моделирование поверхностей методом криволинейного проецирования

© 2023, Е.В. Денисова, Ю.А. Гурьева ✉

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассматривается формообразование поверхностей аналитическими методами и их визуализация средствами компьютерной графики. Эта тема привлекает внимание архитекторов, инженеров и учёных-механиков, которым важно видеть поверхности в конструкциях машин различного назначения и в формах сооружений, аппроксимировать сложные поверхности более простыми – аналитическими; выбирать рациональную форму оболочки из нескольких вариантов, учитывая функциональные, технологические и эргономические требования к изделию. Цель работы заключается в исследовании способов образования форм поверхностей. Методом исследования является общая аналитическая теория прикладного формообразования поверхностей, соответствующая современным требованиям применения компьютерных технологий. В работе получены параметрические уравнения циклической поверхности Иоахимсталя, показаны возможности формообразования таких поверхностей, которые рекомендованы для практического использования. На примерах визуализации поверхностей средствами компьютерной графики (программа *Maple*) показано применение аналитических моделей, позволяющих оценить конструктивные и эстетические качества оболочки в научных исследованиях, проектировании, изготовлении. Определены пути разработки аналитического аппарата, который позволяет моделировать процесс криволинейного проецирования и образования поверхностей как системы проецирующих лучей, проходящих через заданную проекцию поверхности. Целенаправленный выбор параметрической формы аналитического моделирования поверхностей способствует использованию моделей в системах автоматизированного проектирования, подготовки производства и в современных пакетах компьютерной графики (Компас 3D, Renga, Revit, Ansys, Лира Сапр, Scad и др.).

Ключевые слова: формообразование, циклическая поверхность, поверхность Иоахимсталя, конгруэнция, визуализация, аналитическое моделирование, оболочка, криволинейное проецирование.

Цитирование: Денисова Е.В., Гурьева Ю.А. Аналитическое и компьютерное моделирование поверхностей методом криволинейного проецирования // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №2(48). С.204-216. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-204-216.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Конструктивные способы образования поверхностей создавались в разные времена и соответствовали потребностям науки и техники [1, 2]. Первым из них был кинематический метод, который появился вместе с возникновением начертательной геометрии [3]. На стадии зарождения этот метод был применён для формообразования линейчатых поверхностей. Первой вехой в развитии этого метода явилось отнесение одной из инцидентных линий в бесконечность. В классе линейчатых поверхностей был выделен подкласс линейчатых поверхностей с плоскостью параллелизма – поверхностей Каталана¹. Следующим конструктивным способом образования поверхностей следует признать способ преобразований, появление которого связано с зарождением научной специальности «Прикладная геометрия, ин-

¹ Hazewinkel Michiel, ed. (2001). Catalan surface, Encyclopedia of Mathematics, Springer, ISBN 978-1-55608-010-4.

женерная графика». Первыми шагами использования способа преобразований стали применения аффинных и гомологических преобразований сложных поверхностей в более простые с целью упрощения решения задач начертательной геометрии [4].

Дальнейшее развитие прикладной геометрии поверхностей ассоциировалось с решением в основном методологических проблем: теории определителя поверхности [5], теории каркаса [6], теории параметризации [7]. Способ изъятия линейного каркаса поверхности с множественного числа, в частности с конгруэнции линий, следует из этих теорий. Одним из пространственных способов выделения линейного каркаса поверхности с конгруэнции является погружение в неё линии. Кроме конгруэнции прямых в формообразовании поверхностей применяются конгруэнции окружностей, парабол [8], плоских кривых [9], цилиндрических винтовых линий, конических винтовых линий [10].

Вопросам формообразования оболочек посвящено большое количество работ. Геометрические исследования формообразования оболочек в архитектуре обобщены в [11]. До середины XX века точный аналитический метод расчёта циклических оболочек был заменён приближённым расчётом относительно простых систем, на которые можно было расчленить конструкцию. Инженеры, механики и архитекторы, используя только приближённые методы расчёта, создали немало конструкций и сооружений в форме циклических поверхностей. Из циклических поверхностей широко известны и используются: поверхности вращения, круговые винтовые поверхности и трубчатые поверхности с произвольной плоской линией центров. В циклических поверхностях одно семейство образующих кривых представляет собой окружности постоянного или переменного радиуса, что значительно упрощает процесс изготовления тонких оболочек в форме этих поверхностей.

Аналитическому описанию циклических поверхностей, в т.ч. поверхностей Иоахимстале², с использованием различных подходов посвящено много работ [12, 13]. Конструктивная схема формообразования поверхности Иоахимстале заключается в отыскании поверхности, несущей на себе траектории, ортогональные к семейству сфер с центрами на прямой [14].

1 Постановка задачи и методы

В работе использованы приёмы формообразования оболочек из циклических поверхностей Иоахимстале. Аналитическим методом исследована система проецирования сплошной конгруэнцией окружностей с общей радикальной осью, любая проецирующая поверхность которой – циклическая поверхность Иоахимстале.

Пучком окружностей на плоскости называют множество окружностей¹, имеющих общую радикальную ось. В зависимости от количества общих точек, имеющих окружности пучка с радикальной осью, пучки могут быть: гиперболические (нет общих точек), параболические (одна общая точка) и эллиптические (две общие точки). Пучки окружностей с центрами на осях OX и OZ , радикальными осями которых являются соответственно оси OZ и OX , называют сопряжёнными. Параметрические уравнения семьи окружностей имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= \left(a - \frac{1}{2u}\right) + \sqrt{\left(a - \frac{1}{2u}\right)^2 - a^2 + r^2} \cos t, \\ z &= \sqrt{\left(a - \frac{1}{2u}\right)^2 - a^2 + r^2} \sin t, \end{aligned} \quad (1)$$

где a – абсциссы центра, r – радиус любой окружности, u – параметр пучка. В кинематическом способе формообразования поверхностей функции

² Поверхностью Иоахимстале называют поверхность с семейством плоских линий кривизны, лежащих в плоскостях пучка. См., например, Шуликовский В.И. Классическая дифференциальная геометрия. М.: Госиздат. физ.-мат. лит.-ры. 1963. 540 с.

$x = f(t, u, v)$, $y = \varphi(t, u, v)$, $z = \psi(t, u, v)$ выражают связь между прямоугольными декартовыми координатами x, y, z и специальной параметризацией пространства с помощью параметров u, v , которые являются криволинейными координатами на поверхности-носителе, и параметра положения t поверхности-носителя в его движении. Вращением вокруг оси OZ пучка (1) можно прийти к конгруэнции окружностей, параметрические уравнения которой:

$$\begin{aligned} x &= \left[a - \frac{1}{2u} + \sqrt{\left(a - \frac{1}{2u}\right)^2 - a^2 + r^2} \cos t \right] \cos v, \\ y &= \left[a - \frac{1}{2u} + \sqrt{\left(a - \frac{1}{2u}\right)^2 - a^2 + r^2} \cos t \right] \sin v, \\ z &= \sqrt{\left(a - \frac{1}{2u}\right)^2 - a^2 + r^2} \sin t. \end{aligned} \quad (2)$$

Поскольку пучок окружностей (1) симметричен относительно оси OZ , вращать для получения конгруэнции следует не весь пучок, а его часть, расположенную в полуплоскости. Конгруэнцию (2) окружностей с общей радикальной осью называют сплошной.

Если вращать вокруг общей радикальной оси пучок окружностей вместе с сопряжённым пучком, первый описывает конгруэнцию траекторий, ортогональных к семейству сфер, образованных вращением сопряжённого пучка. Таким образом, чтобы получить параметрические уравнения циклической поверхности Иохимсталя, необходимо воспользоваться уравнениями, выражающими поверхность как множество лучей конгруэнции ортогональных траекторий, которые проецируют линию:

$$x = f(w), \quad y = \varphi(w), \quad z = \psi(w). \quad (3)$$

Линию следует выбрать на одной из сфер, образованной вращением окружности сопряжённого пучка. В результате получается уравнение поверхности, как семьи окружностей конгруэнции (2), проецирующих точки линии (3):

$$\begin{aligned} x &= \frac{(\alpha(w) + \sqrt{(\beta(w) - d)^2 + \psi^2(w)(\psi^2(w) + 2(\beta(w) + d))} \cos t) f(w)}{2\beta(w)}, \\ y &= \frac{(\alpha(w) + \sqrt{(\beta(w) - d)^2 + \psi^2(w)(\psi^2(w) + 2(\beta(w) + d))} \cos t) \varphi(w)}{2\beta(w)}, \\ z &= \frac{\sqrt{(\beta(w) - d)^2 + \psi^2(w)(\psi^2(w) + 2(\beta(w) + d))} \sin t}{2\sqrt{\beta(w)}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$f(w) = a \cos(w_0 + c \sin(w)) \cos w, \quad \alpha(w) = 2a(a + r \sin(w_0 + c \sin(w))),$$

$$\varphi(w) = a \cos(w_0 + c \sin(w_n)) \sin w, \quad \beta(w) = a^2 \cos^2(w_0 + c \sin(w_n)), \quad ;$$

$$\psi(w) = a \sin(w_0 + c \sin(w n)) + r, \quad d = a^2 - r^2$$

a, r – соответственно расстояние от радикальной оси центра и радиус окружности, что вместе с радикальной осью задаёт пучок окружностей, который в результате вращения образует конгруэнцию окружностей;

r , a – соответственно расстояние от начала координат на радикальной оси и радиус сферы инциденции сферической линии;

w_0 – широта начальной параллели, которая является криволинейной осью синусоидальной сферической линии, аналога оси абсцисс плоской синусоидальной кривой;

c – криволинейная амплитуда синусоидальной сферической линии – аналог амплитуды плоской синусоидальной кривой;

n – количество складок (целое);

w – криволинейная координата на сфере сопряжённого пучка.

При любых выражениях функций (3) уравнения (4) выражают циклическую поверхность Иоакимсталя. Уравнения (4) удобны тем, что координатные линии $t = const$, $w = const$ – это линии кривизны. На такое совпадение ориентированы методы расчёта оболочек [15, 16].

Особый интерес представляет выявление влияния параметров, входящих в уравнение (4), на форму оболочки. Окружность радиуса r с координатами центра $(a, 0)$ на плоскости ZOX задаёт вместе с осью OZ первоначальный пучок окружностей с общей радикальной осью OZ . Окружность радиуса a с координатами центра $(0, r)$ задаёт в плоскости ZOX пучок, сопряжённый с первоначальным пучком. Вращением вокруг OZ сопряжённый пучок образует семью сфер с центрами на OZ , а первоначальный пучок – конгруэнцию окружностей, которые являются ортогональными траекториями семьи сфер (рисунки 1-3). Следовательно, параметры a и r напрямую и отдельно друг от друга влияния на форму поверхности Иоакимсталя не имеют. Влияние имеет их соединение, а именно

$$a^2 - r^2 = d. \quad (5)$$

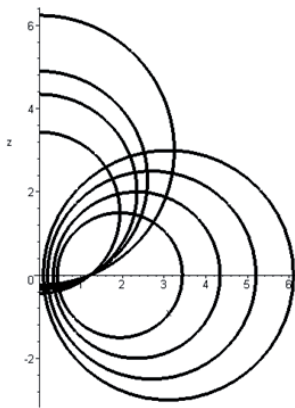


Рисунок 1 – Первоначальный гиперболический и сопряжённый эллиптический пучки окружностей

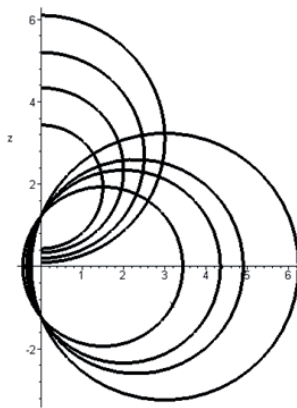


Рисунок 2 – Первоначальный эллиптический и сопряжённый гиперболический пучки окружностей

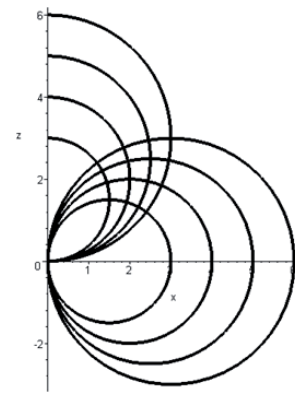


Рисунок 3 – Первоначальный и сопряжённый параболические пучки окружностей

2 Результаты

При исследовании влияния параметров a и r на форму поверхности Иоакимсталя выявлено три возможных случая:

Случай 1. $a > r$ ($d > 0$). Первоначальный пучок окружностей – гиперболический, сопряжённый – эллиптический (рисунок 1).

Гиперболический пучок окружностей содержит окружность нулевого радиуса, то есть при $r = 0$, $a = \sqrt{d}$. В этом случае сопряжённый пучок окружностей эллиптический. Все окружности сопряжённого пучка проходят через две фиксированные точки: $M_1(a, 0)$, $M_2(-a, 0)$. В результате вращения вокруг оси OZ точка M_1 описывает окружность радиуса a с центром в начале координат. Через него проходят все сферы, образованные вращением окружностей сопряжённого пучка. С целью установления достоверности результатов относительно правильности параметрических уравнений (4), необходимо показать, что окружность

$$x^2 + y^2 = a^2, \quad z = 0 \quad (6)$$

удовлетворяет уравнению (4) при $r = 0$.

Из уравнения (4) при условии $z = 0$ следует: $\sin t = 0$, что было обусловлено ранее, когда назначалось начало отсчёта параметра t , равенство нулю подкоренного выражения:

$$(a^2 \cos^2 \alpha - a^2)^2 + a^2 \sin^2 \alpha (a^2 \sin^2 \alpha + 2a^2 \cos^2 \alpha + 2a^2) = 4a^4 \sin^2 \alpha = 0, \quad (7)$$

где $\alpha = w_0 + c \sin(w n)$.

Равенство (7) возможно в двух случаях: $a = 0$ или $\sin \alpha = 0$. Сопоставив, получится $w_0 = 0$, $c = 0$. Поскольку w_0 и c использованы в представлении сферической линии на одной из сфер пучка, образованного сопряжённым пучком окружностей, то подставив полученные значения $r = 0$, $\sin t = 0$, $\cos t = \pm 1$ в уравнения (4), получится:

$$x = \frac{2a^3 \cos w}{2a^2}, \quad y = \frac{2a^3 \sin w}{2a^2}, \quad z = 0. \quad (8)$$

Если возвести обе части последних равенств (8) в квадрат и приравнять суммы левых и правых частей полученных равенств, получится выражение:

$$x^2 + y^2 + z^2 = a^2. \quad (9)$$

(9) – уравнение сферы, которое при $z = 0$ переходит в уравнения (6) линии пересечения сферы плоскостью $z = 0$.

Таким образом, при $r = 0$, $z = 0$, $w_0 = 0$, $c = 0$ получается сферическая линия – окружность (6), которую нельзя использовать для представления поверхности (4), поскольку лучи конгруэнции, образованные первоначальным пучком, есть окружности нулевого радиуса.

Случай 2. $a < r$ ($d < 0$). Первоначальный пучок окружностей – эллиптический (рисунок 2), все его окружности проходят через две фиксированные точки, расположенные на оси OZ : $N_1(0, \sqrt{r^2 - a^2})$, $N_2(0, -\sqrt{r^2 - a^2})$.

Точки N_1 , N_2 являются фокальными для конгруэнции ортогональных траекторий семьи сфер, образованной сопряжённым пучком окружностей. Любая поверхность конгруэнции проходит через эти точки. Значение параметра t для них:

$$t = \pm \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - a^2}}{r} + \pi. \quad (10)$$

В этом случае необходимо принимать во внимание уравнение, показывающее равенство нулю радиуса сферы, которая принадлежит пучку, образованному сопряжённым пучком окружностей.

Случай 3. $a = r$ ($d = 0$). Первоначальный и сопряжённый пучки окружностей – параболические (рисунок 3).

Окружности первоначального пучка и образованной им конгруэнции соприкасаются с радикальной осью OZ . Окружности сопряжённого пучка соприкасаются с радикальной осью OX , а образованные ими сферы семьи с центрами на OZ соприкасаются с плоскостью XOY . Как первые, так и вторые касания происходят в начале координат, который можно рассматривать как вырождение окружности конгруэнции – геометрического места окружности нулевого радиуса первоначального пучка при его вращении вокруг OZ в момент перехода гиперболического первоначального пучка в параболический.

Т.к. a и r входят в определитель как первоначального, так и сопряжённого пучков окружности, которые в свою очередь образуют соответственно конгруэнцию ортогональных траекторий и семью сфер, непосредственно окружность радиуса r с центром $(a, 0)$ и сфера радиуса a с центром $(0, r)$ могут быть вне области определения создаваемой поверхности Иоахимсталя. Такое же заключение можно сделать в отношении сферической линии, которая

задаётся функциями $f(w)$, $\varphi(w)$, $\psi(w)$ на сфере радиуса a с координатами центра $(0, r)$. Область определения поверхности зависит от интервала значений t , который определяется в процессе построения.

При $d < 0$ и интервале t поверхность будет иметь две конические точки $N_1(0, \sqrt{r^2 - a^2})$ и $N_2(0, -\sqrt{r^2 - a^2})$. Рисунок 4 демонстрирует такой случай при $0 \leq t \leq \frac{7\pi}{6}$. Построения поверхностей производились с помощью программы *Maple*.

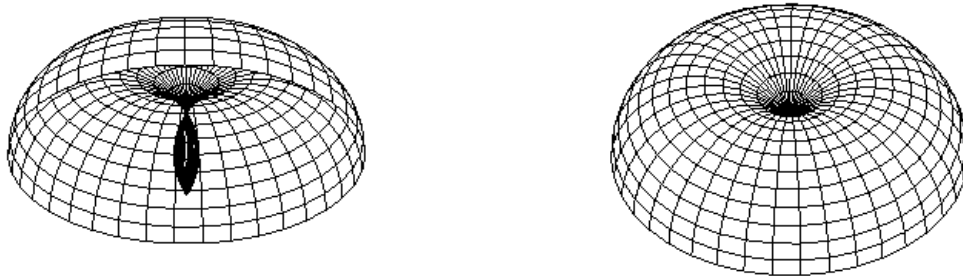


Рисунок 4 – При $d < 0$ и интервале $0 \leq t \leq \frac{7\pi}{6}$ поверхность имеет две конические точки

$$N_1(0, \sqrt{r^2 - a^2}) \text{ и } N_2(0, -\sqrt{r^2 - a^2})$$

Добиться исключения отсека, расположенного между коническими точками, можно уменьшением интервала до $0 \leq t \leq \frac{5\pi}{6}$ (рисунок 5).

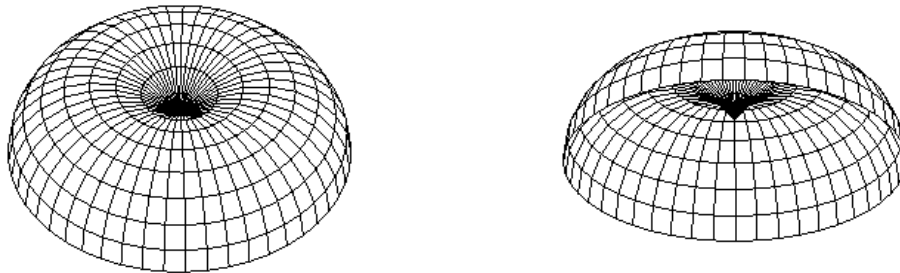


Рисунок 5 – При $d < 0$ уменьшение интервала до $0 \leq t \leq \frac{5\pi}{6}$ для исключения отсека, расположенного между коническими точками

Пределу интервала отвечает одна коническая точка. Дальнейшее уменьшение интервала $0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}$ приводит к появлению отверстия (рисунок 6).

Следует отметить, что касательные в точках N_1 , N_2 к семье линий $w = \text{const}$, по которым поверхность (4) пересекается с плоскостями пучка и с осью OZ , образуют конусы (рисунок 7). При $d = 0$ точки N_1 и N_2 совпадают друг с другом и с началом координат. Окружности $w = \text{const}$ не пересекаются с осью OZ , а соприкасаются с ней в начале координат. Конус касательных к линиям $w = \text{const}$ поверхности (4) вырождается в прямую линию – ось OZ . Особой точке (начало координат) поверхности (4) отвечает значение $t = \pi$ (рисунок 7).

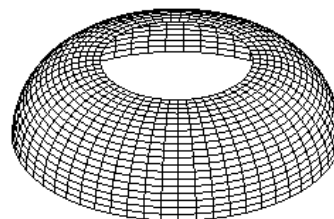


Рисунок 6 – Появление отверстия при уменьшении интервала до $0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}$

Поскольку наличие такой острой формы в конструкциях крайне нежелательно, для предотвращения её появления рекомендовано назначать соответствующую границу интервала таким образом, чтобы интервал не содержал $t = \pi$. Если ограничиться значениями $0 \leq t \leq 2\pi$ (исключая $t = \pi$), то верхней границе интервала $t = \pi$ определения поверхности соответствует её направленность остриём вниз, нижней границе – остриём вверх (рисунок 8).

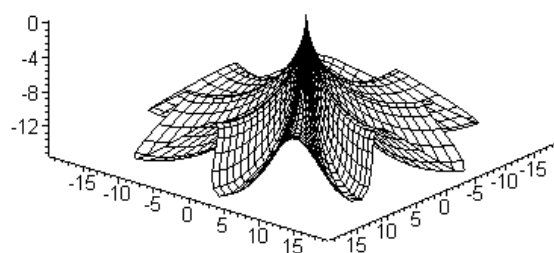


Рисунок 7 – Особая точка (начало координат) поверхности (4) при $d = 0$, которой соответствует значение $t = \pi$

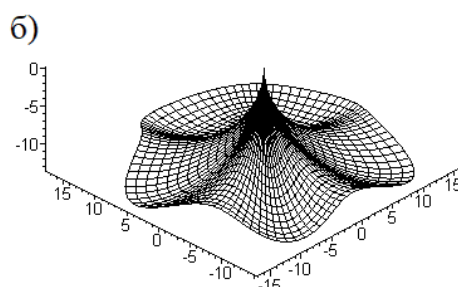
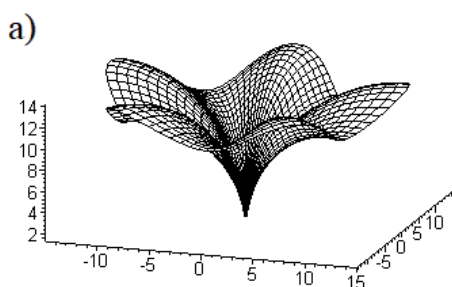


Рисунок 8 – Положение острия поверхности (остриё вниз при $t < \pi$, остриё вверх при $t > \pi$): а) при $1,5 \leq t \leq 3$; б) при $3,5 \leq t \leq 5$

Конгруэнция окружностей, образованная первоначальным пучком, имеет плоскость симметрии XOY . Поэтому смена знака параметра w_0 на противоположный не влияет на положение и направление острой формы (рисунок 9) в особой точке (начале координат).

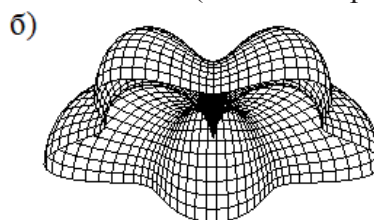
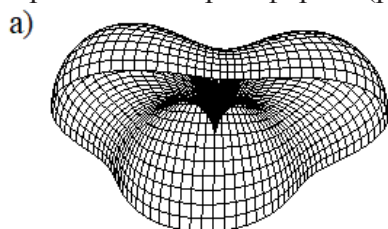


Рисунок 9 – Форма поверхности при смене знака параметра w_0 : а) при $w_0 = -\frac{\pi}{4}$; б) при $w_0 = \frac{\pi}{4}$

Параметр w_0 влияет на величину проекции амплитуды c на ось OZ . На рисунке 10 наглядно показано влияние изменения параметра c на получаемые модели поверхности. Амплитуда сферической синусоидальной линии – это её экстремальное отклонение вдоль меридиана сферы от окружности с широтой w_0 .

На форму поверхности также влияет параметр n , который соответствует количеству складок. При $n = 1$ получается дважды циклическая поверхность Иоахимсталя – отсек циклиды Дюпена (рисунок 11а), при $n = 2$ поверхность напоминает шляпу (рисунок 11б), при $n > 2$ – появляются хорошо выраженные складки, количество которых равно n .

Необходимо подчеркнуть, что семьи координатных линий $w = \text{const}$ (окружности или их дуги) и $t = \text{const}$ (сферические линии) являются линиями кривизны. Соединение (совпадение) координатной сетки с сеткой линий кривизны важно при использовании методов расчёта оболочек.

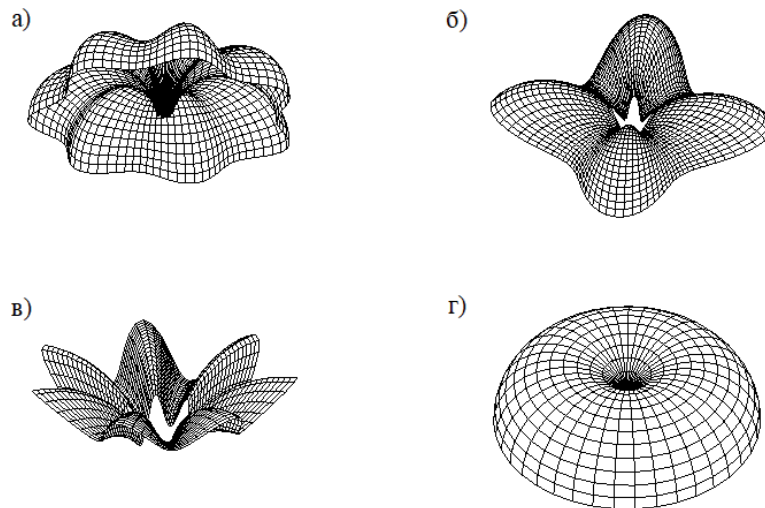


Рисунок 10 – Модели поверхности при разных значениях параметра c :
а) $c = 0,07$; б) $c = 0,15$; в) $c = 0,2$; г) при $c = 0$ получается поверхность вращения



Рисунок 11 – Поверхности при разных значениях параметра n , который соответствует количеству складок:
а) при $n = 1$ получается дважды циклическая поверхность Иохимсталя – отсек циклиды Дюпена;
б) при $n = 2$ поверхность напоминает шляпу

3 Выводы

По результатам анализа исследований, проведённых в области образования поверхностей лучами криволинейного проецирования, можно сделать следующие выводы.

На примерах показаны широкие возможности формообразования циклических поверхностей Иохимсталя, которые рекомендованы для использования в проектировании складчатых оболочек, благодаря следующим свойствам:

- многопараметричность общих моделей, позволяющая охватить широкий круг форм варьированием значениями параметров;
- отнесение к линиям кривизны, что является предпосылкой применения методов расчёта оболочки на прочность;
- программные реализации разработанных аналитических моделей позволяют оценить конструктивные и эстетические качества оболочки по наглядным графическим изображениям.

Применение методов криволинейного проецирования и поверхностей, образуемых этими методами, охватывают различные области [17-24]: решение задач начертательной геометрии, профилирование режущего инструмента, конструирование исполнительных органов землеобрабатывающих машин, моделирование пространства на плоскости, конструирование оболочек. Системы проецирования рассматриваются не только на плоскости, но и на криволинейных поверхностях.

Полученные поверхности и их алгебраические описания можно использовать для разработки удобных для работы плагинов различных программных комплексов (рисунки 12-16), в том числе для программ геометрического 3D моделирования и *BIM* программ (Компас 3D, Nanocad, Inventor, Renga, Revit и др.), а также для разработки расчётных моделей объектов не

только для получения геометрии, но и при формировании сетки (*Meshing*) расчётных моделей (программы *Ansys*, ЛИРА САПР, *Scad* и др.) [25-27].

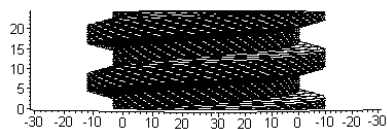


Рисунок 12 – Винтовая нарезка трапецеидальной резьбы

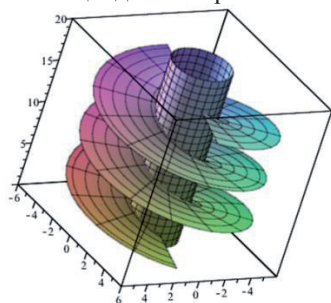


Рисунок 13 – Визуализация поверхности «Шнек»

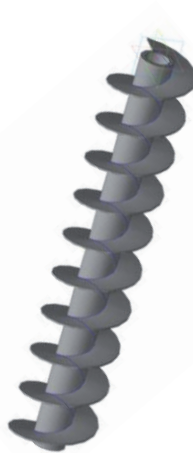


Рисунок 14 – Модель шнека для бурения

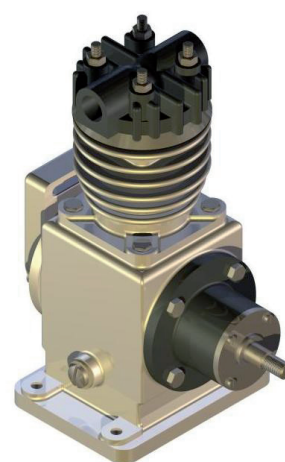


Рисунок 15 – Модель компрессора

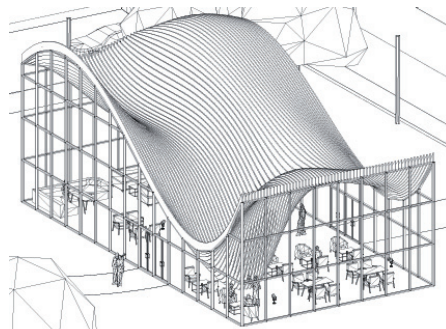
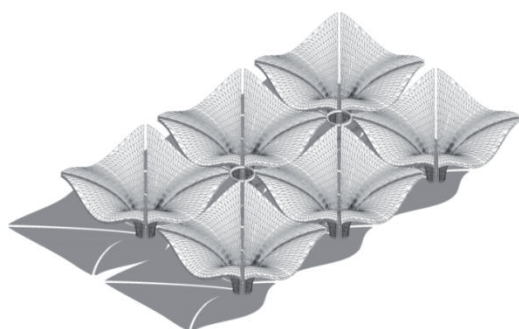


Рисунок 16 – Модели навесов

Заключение

Применение систем криволинейного проецирования в научных исследованиях, проектировании и производстве на оборудовании с числовым программным управлением сдерживается отсутствием общей математической модели, на основе которой можно было бы разрабатывать и развивать необходимые компьютерные технологии. Такая ситуация вызвана тем, что способы криволинейного проецирования зарождались и развивались на конструктивной основе, их аналитические интерпретации были разрознены и не привели к возникновению схемы обобщённого характера. Решения основывались на алгебраическом подходе, в то время как современные программные продукты в этой области ориентированы на параметрическое представление.

Общая аналитическая модель, предложенная в работе, реализована для систем криволинейного проецирования, лучами которых являются окружности. Циклические поверхности могут принимать привлекательные с точки зрения архитектора формы. Поэтому важно иметь теоретическое обобщение поставленной задачи, которое представлено в разработке общей аналитической модели систем криволинейного проецирования и их проецирующих поверхностей, отличающихся параметрическим представлением, которое позволяет выделить ха-

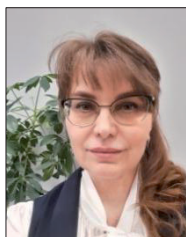
рактёрную семью линий на поверхности в системах компьютерной графики и затем в системах с числовым программным управлением программировать обработку вдоль этих линий. На параметрическое представление ориентированы современные пакеты автоматизированных систем научных исследований, автоматизации проектных работ и технологической подготовки производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] *Cayley A.A.* Third memoir on skew surfaces otherwise scrolls // Philosophical Transactions of Royal Society of London. 1869. Vol. CLIX.
- [2] *Darboux G.* Lecons sur la theorie generale des surfaces. Paris. 1914. Vol. 4. 576 p.
- [3] *Монж Г.* Начертательная геометрия. Москва: Изд-во АН СССР. 1947. 291 с.
- [4] *Джапаридзе И.С.* Геометрические преобразования пространства и их применение в начертательной геометрии // Методы начертательной геометрии и её приложения. Москва. ГИТТЛ. 1955. С.54-82.
- [5] *Рыжов Н.Н.* Определитель поверхности и его применение // Труды Университета дружбы народов им. П. Лумумбы. Том LIII: Прикладная геометрия. Вып. 4. Москва. 1971. С.3-16.
- [6] *Рыжов Н.Н.* О теории каркаса // Труды Университета дружбы народов им. П. Лумумбы. Том II: Начертательная геометрия. Вып. 1. Москва. 1963. С.9-19.
- [7] *Рыжов Н.Н.* Параметризация поверхностей // Труды Университета дружбы народов им. П. Лумумбы. Том XXVI: Математика. Вып. 3: Прикладная геометрия. Москва. 1967. С.3-17.
- [8] *Нарзуллаев С.А.* Множество окружностей, выделение из него циклических поверхностей // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Вип. 66. Київ: КНУБА. 1999. С.123-125.
- [9] *Ivzhenko A.V.* Designing surfaces by separating them from congruences of parabolas // Collection of works of the III International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Geometric Modeling". Vol. II. Melitopol, Ukraine. 1996. P.231-232.
- [10] *Simenko E.V., Ignatiev S.A., Voronina M.V.* Analytical and computer graphic method of surfaces' formation projected by rays of congruence of cylindrical screw lines with the constant step // International Journal of Engineering and Technology. № 9(5). 2017. P.3912-3921.
- [11] *Тевлин А.М.* Методы нелинейных отображений и их технические приложения. Москва: МАИ. 1971. 136 с.
- [12] *Михайленко В.Е., Обухова В.С., Подгорный А.Л.* Формообразование оболочек в архитектуре. Киев: «Будівельник». 1972. 270 с.
- [13] *Михайленко В.Е., Ковалев С.Н.* Конструирование форм современных архитектурных сооружений. Киев: «Будівельник». 1978. 112 с.
- [14] *Иванов В.Н.* Конструирование оболочек на основе каналовых поверхностей Иоакимсталя // Вестник РУДН: специальный выпуск «Инженерные исследования». № 1. 2000. С.23-30.
- [15] *Иванов В.Н.* Циклические поверхности: геометрия, классификация, конструирование оболочек // Архитектура оболочек и прочностной расчет тонкостенных строительных и машиностроительных конструкций сложной форм. Труды Международной научной конференции. Москва: изд-во РУДН. 2001. С.127-134.
- [16] *Скидан І.А., Фролов О.В.* Каналові поверхні Іоакимсталя з плоскою лінією центрів // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці Таврійська державна агротехнічна академія. Вип. 4. Т.16. Мелітополь: ТДАТА. 2002. С.130-134.
- [17] *Frumusanu G., Berbinschi S., Oancea N.* Cylindrical surfaces enwrapping helical surfaces rack-tool versus planing tool // Proceedings in Manufacturing Systems. № 8(3). 2013. P.153-158.
- [18] *Skidan I.A.* Generalization of Analytical Formation Methods // The Applied Geometry and Engineering Graphics. Kiev: Ukraine: KNUBA. 2002. P.79-84.
- [19] *Ćuković S., Devedžić G., Ghionea I.* Automatic determination of grinding tool profile for helical surfaces machining using catia/vb interface // U.P.B. Sci. Bull. Series D. № 72(2). 2009. P.85-96.
- [20] *Иванов В.Н., Наср Юнес Ахмед Аббуши.* Расчёт каналовых поверхностей Иоакимсталя на собственный вес вариационно-разностным методом // Архитектура оболочек и прочностной расчет тонкостенных строительных и машиностроительных конструкций сложной формы / Труды Международной научной конференции. Москва: изд-во РУДН. 2001. С.121-126.
- [21] *Ergut M., Korpinar T., Turhan E.* On normal ruled surfaces of general helices in the sol space // TWMS J. Pure Appl. Math. № 4(2). 2013. P.125-130.
- [22] *Baroiu N., Berbinschi S., Teodor V., Oancea N.* The modeling of the active surfaces of a multi-flute helical drill with curved cutting edge using the toolbox environment / ICN-2012 13th International Conference on Tools. 2012.

- [23] **Han Quan-Quan, Liu Ri-Liang** Mathematical Model and Tool Path Calculation for Helical Groove Whirling / Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 6(1). 2013. P.3584-3587.
- [24] **Hudyakov G.I.** Development of methods of analytical geometry of a sphere for solving geodesy and navigations tasks / Journal of Mining Institute. Vol. 223. 2017. P.70-82.
- [25] **Simenko E.V., Voronina M.V.** Constructive methods of forming surfaces / International Journal of Applied Engineering Research. № 6, V. 12. 2017. P.956-962.
- [26] **Denisova E.V.** Geometric Modeling of New Surface Shapes in Architecture. 2022. AIP Conference Proceedings 2657(1):020001. DOI:10.1063/5.0107523.
- [27] **Simenko E.V., Voronina M.V.** Constructive methods of forming surfaces / International Journal of Applied Engineering Research. 12(6). 2017. P.228-234.

Сведения об авторах



Денисова Елена Васильевна. Окончила Ленинградский горный институт по специальности «Прикладная геодезия». К.т.н. (2006). Заведующая кафедрой начертательной геометрии и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ). Научные интересы: разработка общей аналитической и компьютерно-графической модели систем проецирования. Author ID (РИНЦ): 896146. SPIN-код: 3913-0954; ORCID: 0000-0001-5058-1200. Deni_sovaev@mail.ru.



Гурьева Юлиана Александровна. Окончила СПбГАСУ по специальности «Промышленное и гражданское строительство». К.т.н. (2009). Доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики СПбГАСУ. Author ID (РИНЦ): 510965. SPIN-код: 3262-5546. ORCID: 0000-0002-5814-423X. Yul2017@mail.ru. ✉.

Поступила в редакцию 11.05.2023, после рецензирования 27.06.2023. Принята к публикации 29.06.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-204-216

Analytical and computer modeling of surfaces with the curvilinear projection method

© 2023, E.V. Denisova, Yu.A. Guryeva ✉

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The article discusses the shaping of surfaces by analytical methods and their visualization by means of computer graphics. This topic attracts the attention of architects, engineers and mechanical scientists, for whom it is important to see the surfaces in the structures of machines for various purposes and in the forms of structures, to approximate complex surfaces with simpler ones - analytical ones; choose a rational form of the shell from several options, taking into account the functional, technological and ergonomic requirements for the product. The purpose of the work is to study the methods of formation of surface shapes. The research method is the general analytical theory of applied surface shaping, which meets modern requirements for the use of computer technology. In this paper, parametric equations of the cyclic surface of Joachimsthal are obtained, the possibilities of shaping such surfaces, which are recommended for practical use, are shown. Using examples of visualization of surfaces by means of computer graphics (Maple program), the use of analytical models is shown, which makes it possible to quickly and reliably assess the constructive and aesthetic qualities of the shell in scientific research, design, and manufacture. The ways of developing an analytical apparatus are determined, which allows modeling the process of curvilinear projection and the formation of surfaces as a system of projecting rays passing through a given surface projection. The purposeful choice of the parametric form of analytical modeling of surfaces contributes to the direct use of models in automated design systems, pre-production systems and in modern computer graphics packages (Kompas 3D, Renga, Revit, Ansys, Lira Sapr, Scad, etc.).

Keywords: shaping, cyclic surface, Joachimstal surface, congruence, visualization, analytical modeling, shell, curved projection.

For citation: Denisova EV, Guryeva YuA. Analytical and computer modeling of surfaces with the curvilinear projection method [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 204-216. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-204-216.

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

List of figures

Figure 1 – Primary hyperbolic and conjugate elliptic circle bundles

Figure 2 – Primary elliptic and conjugate hyperbolic circle bundles

Figure 3 – Primary and conjugate parabolic circle bundles

Figure 4 – At $d < 0$ and the interval $0 \leq t \leq \frac{7\pi}{6}$, the surface will have two conical points $N_1(0, \sqrt{r^2 - a^2})$ and

$$N_2(0, -\sqrt{r^2 - a^2})$$

Figure 5 – For $d < 0$, reducing the interval to $0 \leq t \leq \frac{5\pi}{6}$ to exclude the compartment located between the conical points

Figure 6 – The appearance of a hole when the interval is reduced to $0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}$

Figure 7 – The singular point (origin) of the surface (4) at $d = 0$, to which the value corresponds $t = \pi$

Figure 8 – The position of the tip of the surface (tip down at $t < \pi$, tip up at $t > \pi$):

a) when $1,5 \leq t \leq 3$; b) when $3,14 \leq t \leq 5$

Figure 9 – The shape of the surface when changing the sign of the parameter w_0 : a) when $w_0 = -\frac{\pi}{4}$; b) when $w_0 = \frac{\pi}{4}$

Figure 10 – Surface models at different values of the parameter with: a) $c = 0.07$, b) $c = 0.15$, c) $c = 0.2$, d) at $c = 0$ the surface of rotation is obtained

Figure 11 – Surfaces at different values of the parameter n , which corresponds to the number of folds: a) at $n = 1$, a doubly cyclic Joachimstal surface is obtained – a compartment of the Dupin cyclide; b) at $n = 2$ the surface resembles a hat

Figure 12 – Screw cutting of trapezoidal thread

Figure 13 – Visualization of the "Auger" surface

Figure 14 – Auger model for drilling

Figure 15 – Compressor model

Figure 16 – Shed models

References

- [1] Cayley AA. Third memoir on skew surfaces otherwise scrolls. Philosophical Transactions of Royal Society of London. 1869. Vol. CLIX.
- [2] Darboux G. Lecons sur la theorie generale des surfaces. Paris. 1914. Vol. 4. 576 p.
- [3] Monge G. Descriptive geometry [In Russian]. AN USSR. Moscow. 1997. 291 p.
- [4] Japaridze IS. Geometric transformations of space and their application in descriptive geometry [In Russian]. Methods of descriptive geometry and its applications. Moscow: GITTL. 1955. P.54-82.
- [5] Ryzhov NN. Surface determinant and its application [In Russian]. Proceedings of the Peoples' Friendship University named after P. Lumumba. Vol. LIII: Applied Geometry. Issue 4. 1971. P.3-16.
- [6] Ryzhov NN. About the framework theory [In Russian]. Proceedings of the Peoples' Friendship University named after P. Lumumba. Vol. II: Applied Geometry. Issue 1. 1963. P.9-19.
- [7] Ryzhov NN. Parameterization of surfaces [In Russian]. Proceedings of the Peoples' Friendship University named after P. Lumumba. Vol. XXVI: Mathematics. Issue 3: Applied Geometry. 1967. P.3-17.
- [8] Narzullaev SA. The set of circles, the selection of cyclic surfaces from it [In Russian]. Applied geometry and engineering graphics. Kiev: KNUBA. 1999; 66: 123-125.
- [9] Ivzhenko AV. Designing surfaces by separating them from congruences of parabolas. Collection of works of the III International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Geometric Modeling". Vol. II. Melitopol, Ukraine. 1996. P.231-232.
- [10] Simenko EV, Ignatiev SA, Voronina MV. Analytical and computer graphic method of surfaces' formation projected by rays of congruence of cylindrical screw lines with the constant step. International Journal of Engineering and Technology. 2017; 9(5): 3912-3921.

- [11] **Tevlin AM.** Nonlinear mapping methods and their technical applications [In Russian]. Moscow: MAI. 1971. 136 p.
 - [12] **Mikhailenko VE, Obukhova VS, Podgorny AL.** Shaping of shells in architecture [In Russian]. Kiev: Budivelnik. 1972. 270 p.
 - [13] **Mikhailenko VE, Kovalev SN.** Design of the forms of modern architectural structures [In Russian]. Kiev: Budivelnik. 1978. 112 p.
 - [14] **Ivanov VN.** Design of shells based on Joachimsthal channel surfaces [In Russian]. RUDN Bulletin: Special Issue "Engineering Research". 2000; 1: 23-30.
 - [15] **Ivanov VN.** Cyclic surfaces: geometry, classification, shell design [In Russian]. Shell architecture and strength analysis of thin-walled building and machine-building structures of complex shape / Proceedings of the International Scientific Conference. Moscow: RUDN Publishing House. 2001. P. 127-134.
 - [16] **Skidan IA, Frolov OV.** Channel surfaces of Joachimsthal with a flat line of centers [In Ukrainian]. Applied geometry and engineering graphics. Works Tavriya State Agrrotechnical Academy. 2002; 16(4): 130-134.
 - [17] **Frumusanu G, Berbinschi S, Oancea N.** Cylindrical surfaces enwrapping helical surfaces rack-tool versus planning tool. Proceedings in Manufacturing Systems. № 8(3). 2013. P. 153-158.
 - [18] **Skidan IA.** Generalization of Analytical Formation Methods // The Applied Geometry and Engineering Graphics. Kiev: Ukraine: KNUBA. 2002. P. 79-84.
 - [19] **Čuković S, Devedžić G, Ghionea I.** Automatic determination of grinding tool profile for helical surfaces machining using catia/vb interface. U.P.B. Sci. Bull. Series D. № 72(2). 2009. P. 85-96.
 - [20] **Ivanov VN, Nasr Younes Ahmed Abbushi.** Calculation of Joachimsthal channel surfaces for dead weight by the variational-difference method [In Russian]. Shell architecture and strength analysis of thin-walled building and machine-building structures of complex shape / Proceedings of the International Scientific Conference. Moscow: RUDN Publishing House. 2001. P.121-126.
 - [21] **Ergut M, Korpınar T, Turhan E.** On normal ruled surfaces of general helices in the sol space. TWMS J. Pure Appl. Math. 2013; 4(2): 125-130.
 - [22] **Baroiu N, Berbinschi S, Teodor V, Oancea N.** The modeling of the active surfaces of a multi-flute helical drill with curved cutting edge using the toolbox environment. ICN-2012 13th International Conference on Tools. 2012.
 - [23] **Han Quan-Quan, Liu Ri-Liang** Mathematical Model and Tool Path Calculation for Helical Groove Whirling. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013; 6(1): 3584-3587.
 - [24] **Hudyakov GI.** Development of methods of analytical geometry of a sphere for solving geodesy and navigations tasks. Journal of Mining Institute. 2017; 223: 70-82.
 - [25] **Simenko EV, Voronina MV.** Constructive methods of forming surfaces. International Journal of Applied Engineering Research. 2017; 12(6): 956-962.
 - [26] **Denisova EV.** Geometric Modeling of New Surface Shapes in Architecture. 2022. AIP Conference Proceedings 2657(1):020001. DOI:10.1063/5.0107523.
 - [27] **Simenko EV, Voronina MV.** Constructive methods of forming surfaces / International Journal of Applied Engineering Research. 12(6). 2017. P. 228-234.
-

About the authors

Denisova Elena Vasilievna. Graduated from the Leningrad Mining Institute with a degree in Applied geodesy. Ph.D of Tech. Science (2006). Head of Descriptive Geometry and Engineering Graphics Department, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU). Research interests include development of a general analytical and computer and graphical model of projection systems. AuthorID (РИНЦ): 896146; ORCID: 0000-0001-5058-1200. Deni_sovaev@mail.ru.

Guryeva Yuliana Aleksandrovna. Graduated from the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU) with a degree in Industrial and civil construction. Ph.D of Tech. Science (2009). Associate Professor of Descriptive Geometry and Engineering Graphics Department, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU). Author ID (РИНЦ): 510965. SPIN-код: 3262-5546. ORCID: 0000-0002-5814-423X. Yual2017@mail.ru ✉

Received May, 11. 2023. Revised June, 27. 2023. Accepted June, 29. 2023.



Ontology for pervasive traceability of agrochemicals

© 2023, Emiliano Soares Monteiro¹ ✉, Rodrigo da Rosa Righi², Sandro Rigo²,
Jorge Luis Victoria Barbosa², Lidia Martins da Silva², Andresa Vargas Larentis³

¹ State University of Mato Grosso (UNEMAT) 78550-000, Sinop – MT – Brazil

² Graduate Program in Applied Computing PPGCA (UNISINOS) 93022-750, São Leopoldo – RS – Brazil

³ Independent researcher 93022-750, São Leopoldo – RS – Brazil

Abstract

The growth of the world population forces a more outstanding and more efficient food production, forcing agribusiness into the race for greater productivity. Thus, agrochemicals as a tool for increasing and defending production have become more critical with each harvest. This work presents an ontology that describes the knowledge involved in the need for Agrochemical Pervasive Traceability Model (APTM). This proposed ontology is called ontology for pervasive traceability of agrochemicals (OntoPTA). We present classes and their relationships in a hierarchical way and a visualization from the OWL ontology language. This ontology fills the gap in the understanding and modeling of this type of agribusiness process. This modeling helps farm administrators and software developers to perform better analysis for the development, use and maintenance of systems in agribusiness.

Key words: *Ontology, Agrochemicals, Blockchain, Traceability, OntoPTA.*

For citation: Monteiro ES, Righi R. da Rosa, Rigo S, Barbosa JLV, da Silva LM, Larentis AV. Ontology for pervasive traceability of agrochemicals. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 217-231. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-217-231.

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

Introduction

The population growth has been increasing year after year, and currently, it is close to 8 billion people (the last estimate in 2019 had exceeded 7.5 billion) [1, 2]. To meet this population growth, agriculture is of paramount importance. Agriculture becomes relevant for the production of food for people and animals (in the form of animal feed) and also as an engine of the trade balance [3, 4].

When dealing with food production in agriculture, it is inevitable to address the use of agrochemicals in the production chain [5]. Agrochemicals are unique products due to their intrinsic characteristics such as ways of operation, commercialization, storage, and disposal [6, 7], including specific legislation both in Brazil and internationally [8]. The increased need for greater land productivity with monoculture operations (such as soy, corn and cotton) demands greater use of agrochemicals [9].

The use of agrochemicals is carried out in a supply chain with a reverse route; that is, the packaging of the product used must return to this chain for its proper disposal; there is a need to monitor the events of this supply chain [10, 11]. Technology becomes an ally of the rural producer; Disruptive technologies such as blockchain, Internet of Things (IoT), and machine learning can help increase agricultural production; helping the producer in the management of the agrochemical supply chain and operation [12-14].

The area of pervasive traceability of agrochemicals is wide. It presents several challenges such as the integration of systems, the need for standardization of sensors and microcontrollers to detect packaging movements, regulation on the use of technologies for this type of product, use of private blockchains and government blockchains green certificates for rural producers who record correct

operations in blockchains generates the possibility of gaining tax incentives from documentation of transactions recorded in blockchains.

We detected as a gap the lack of reliable traceability of the movement of agrochemicals both in the supply chain and within internal operations on the farm [15]. The need for transparency of operations for those involved in the same production chain could improve commercial relations [16]. The need to monitor high-cost products during the production process is also necessary. The handling of products that are toxic to people and the environment is of interest to various actors, including government agencies [17, 18]. In addition to scientific journals via media such as the traditional press addressing environmental, fiscal, and worker health problems [19-21], indicating the escalation of the issue.

This paper presents an ontology suggestion focused on pervasive traceability in the agrochemical reverse chain. We are introducing concepts related to monitoring them through disruptive technologies (blockchain, IoT, machine learning). It can also be considered a complementary and evolutionary work of the model of pervasive traceability of agrochemicals [22].

This article is organized as follows: a brief introduction to the topic, a section presenting concepts discussed on the pervasive traceability of agrochemicals and ontology; a section presenting related works; a section addressing the application of the proposed ontology and finally a analysis and conclusion, including limitations and future work.

1 Theoretical background

Several concepts are presented to explain the domain to which the ontology is proposed such as: ontology, reverse supply chain, IoT, machine learning, and blockchain.

1.1. Ontology

Ontology is a reference to the specification of a conception, allowing the development of a model for an area of knowledge, becoming a repository of meanings [23]. The ontologies can be different according to the assertions of different individuals [24]; thus, ontology becomes meaningful for those who are familiar with its domain area. "Ontology is the basic description of things in the world" [25]; more elaborately, it can be considered a documentation item or artifact in the area of software engineering or information science. The ontology concept will be applied later in the following sections to represent knowledge in the traceability of agrochemicals.

OWL (Ontology Web Language)¹ is used as a language to descript ontologies. The Protegé² tool is used for ontologies containing the following elements: a) classes: they are sets of what you want to represent; b) attributes: characteristics of objects (or individuals); c) individuals: they are objects or instances of classes. It can be seen as the instance of objects or a singular representation of an object; d) properties or relationships: they are the means of interconnection between individuals. Properties can be of the type: I) object property or II) properties that connect individuals to values.

1.2. Reverse supply chain

The logistics of products that are concerned with the return of the used product or its packaging in a reverse flow, that is, leaving the consumer towards the factory, is called reverse logistics [26]. End-of-life (EOL) products are collected and returned by their users and re-entered the supply chain, starting the reverse path, which will end with repair, disassembly, remanufacturing, recy-

¹ <https://www.w3.org/TR/owl-guide/>

² <https://protege.stanford.edu/>

cling, and disposal [27]. Agrochemicals are also products whose packaging must be returned in the reverse chain [28, 29].

The reverse chain is one of the ways in which the products and later the packaging of agrochemicals travel; Internally, on the farms, traffic moves randomly according to the physical layout of each property. An example of the reverse supply chain can be seen with its actors and the logical sense of its flow. Several actors are present in this logistics chain (participants who manufacture, move and operate products and packaging). The actors in this scenario can be seen in Figure 1; it is also possible to observe the flow of accessory documents that are necessary in the monitoring of used products and packaging, indicating the need for transit of legal and tax information for its operation.

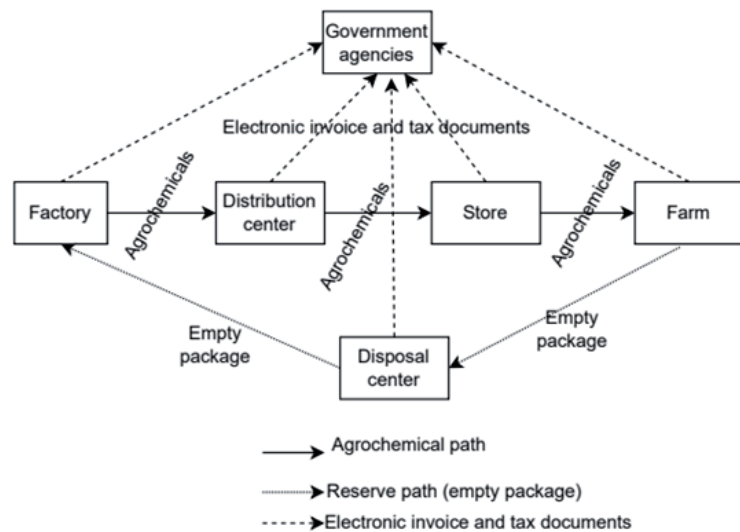


Figure 1 - Actors and agrochemicals reverse the supply chain flow [22]

1.3. Internet of Things

Communication between various electronic devices and sensors via the Internet in order to make life easier for its users is considered the IoT; the use of devices and sensors provides data and interaction in various environments [30]. An IoT network can be seen as a broad communication infrastructure with multiple devices ubiquitously, enabling multiple services to also be delivered in multiple locations as well as the collection of information in locations of greater network capillarity via a rich array of sensors [31]. IoT is of interest for monitoring agrochemical packaging in two situations: a) in the supply chain, sending data such as barcodes and QR codes shared between the actors in the chain, and b) inside the farm triggering several sensors and indicating their positioning by collecting data for its respective monitoring. Figure 2, show IoT basic blocks.

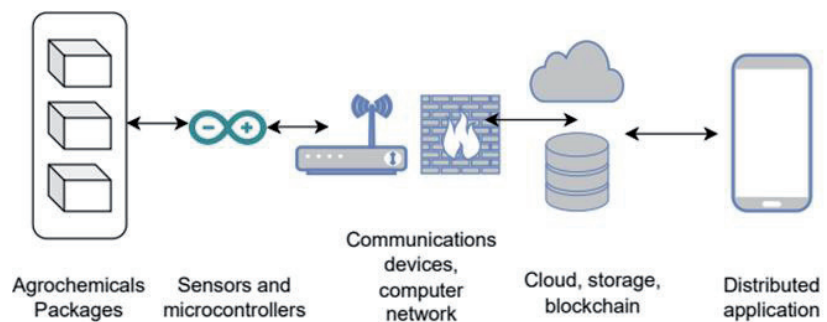


Figure 2 - IoT basic blocks

1.4. Machine learning

Machine learning refers to the ability to learn from past experiences in the form of historical data to improve future actions. The development of a system that uses machine learning in some characteristic activity [32], is one of the many categories within artificial intelligence [33] that propose to teach computers to complete specific tasks without the explicit need for programming and using previously collected data [34]. Machine learning is also a branch of artificial intelligence closely related to computational statistics, which is very focused on [35] prediction. Machine learning comes into play by generating analytical information after processing data collected by sensors and

microcontrollers; these devices monitor operations with agrochemicals within the farm. A brief representation of the machine learning process can be used with the input of data, the extraction of features, and the division into a supervised and unsupervised path where the algorithms operate and later the output of this process.

1.5. Blockchain

In January 2009, Bitcoin was created, attributed to the pseudonym Satoshi Nakamoto; his ideas were disseminated via article [36]; describing ideas that underpin the blockchain. Blockchain can be conceptualized as a data structure that only receives data (not allowing deletion or alteration) with the addition of a timestamp, storing this data in a chained and sequential way in a distributed point-to-point network [37]. This read-only guarding technology for chained data allows trust, verification, credibility, and transparency [38]; in addition to the ubiquity characteristic that distributed networks provide. These blocks are structured to contain a time mark (timestamp) and a hash code that assists in pointing to the other previous blocks. Then reinforcing the immutability of the blockchain [39]. Blockchain are often used in logistics projects [40, 41]; contributing to the recording of the movement of assets among the actors. A brief representation of a block structure with pointers to the previous blocks can be seen in Figure 3.

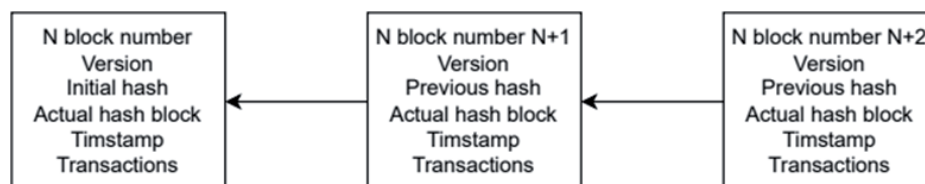


Figure 3 - Simplified Blockchain Schema

2 Related work

On ontology some studies address (articles were searched with an

example of ontology application): A) eHealth is an ontology that increases interoperability between different heterogeneous systems networks and provides situational awareness in the area of health [42]; B) Studies on the use of ontology to document and treat logistics from the user as the central point of the distribution of the chain [43]; C) Interoperability is addressed in a basic supply chain aimed at increasing communication and interoperability between participants [44]; D) Present a reference in the form of ontology for manufacturing industries (in particular yarn production) that can be reproduced and expanded in their production process [45]; E) The authors [46], held a discussion on the use of an ontology for the industry area and how it could be integrated into the development process in a modular and reusable way, including two domain areas: logistics and production planning; F) An ontology in the selection of suppliers for a green logistic supply chain [47]; G) a open-up with ontology was used to enable an agro-food supply chain [48].

On traceability we have some studies that point out: a) Some authors have addressed standardization, legislation and political aspects related to the tracking of dangerous products; indicating cases in Brazil and comparing the acceptance by farmers and others of the recycling of pesticide packaging [5]; b) other studies indicate Brazil as a model case to be followed and studied with regard to regulation and policies of return of packaging and recycling [49]; the opposite occur in developing countries such as Ghana which must evolve in the regulatory and legislation aspect, mainly involving agrochemical [50]; c) other authors have proposed blockchains addressing drug chains with the combined use of smart contracts [51]; d) the combined use of tracking technologies such as RFID (Radio Frequency IDentification) and facial recognition is also explored in the case of loads with high value and dangerousness [52]; in [53] also proposed the combined use of technologies for identification such as barcodes with RFID and even holograms among others; e) alternatives for the traceability of products with an appropriate labeling system and their management by the actors of the reverse supply chain are pointed out by [54]; f) another study points to the combined use of

RFID and blockchain in situations where supply chain members could change include through mining focused on food logistics [55].

3 Methodology

The development methodology used in this section presents how the documentation of a business area (agrochemical reverse logistics) can be performed using ontology, via modeling an ontology application with Protégé.

3.1. Proposed model

The application in focus aims to monitor agrochemicals in a reverse logistics chain. Monitoring uses data at two levels: a) in the reverse logistics chain and its actors, and b) inside the farm with operations with products perceived by IoT sensors and devices. A more detailed view of this supply chain can be seen in Figure 4. This ontology proposal is a complement to the proposed model for pervasive monitoring of agrochemicals [22]. In this scenario, the farm plays a central role that is detailed below: the logistics chain begins at the agrochemical plant developing the product; the product is subsequently sold and transported to the distributor; the distributor temporarily stores the product until it is sold and sent to a store; the store receives the product and stores temporarily until the sale to the farmer is made.

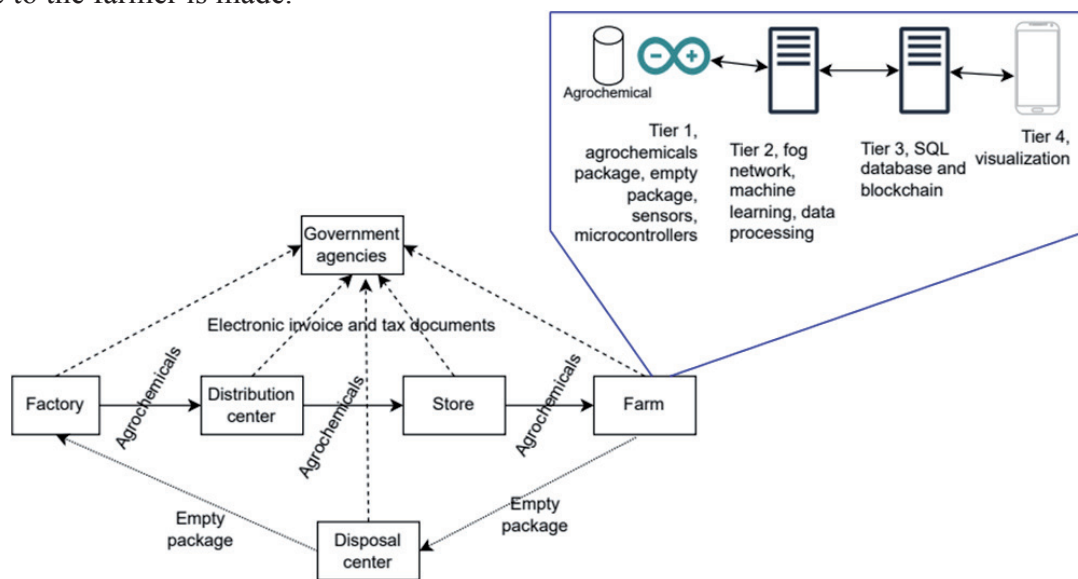


Figure 4 - Reverse logistics chain and layers inside the farm

The activities carried out within a farm can be summarized as: the farmer buys the product (agrochemicals) and takes it to the farm on which he will perform the application on the cropland. After using the product, empty packages are sent to an official disposal center. The disposal center receives empty packaging, temporarily stores it, and then forwards it to a factory for the correct disposal. The transit of empty products and packaging between the actors of the chain is always done with documents such as the electronic invoice; the exception is the act of purchase by the farmer who adds an agronomic recipe. In this scenario, public agencies also participate in receiving product transit data via electronic invoice. Each actor in this scenario is running a node of a blockchain and has its own ERP (Enterprise Resource Planning).

An internal scenario of the use of agrochemicals, also represented in Figure 4 is the treatment of products and packaging within the farm [22]. The products are received, labeled with RFID tags,

and stored in a secure cabinet (closed); this secure cabinet and various points of manipulation of agrochemicals must rely on sensors and microsensors to record the movement of these. Within the farm, this proposal presents four layers for data processing: a) Tier 1: this is where the agrochemical packages are with RFID tags, sensors, and microcontrollers that collect data and send it to the layer are located; several sensors are used here: ultrasonic, vibration, weight, camera, luminosity, among others; b) Tier 2: receives data and applies machine learning algorithms; the data received by the sensors is sent to storage in a SQL bank that is in layer 3; layer 2 has only scripts to perform machine learning functions; c) Tier 3: it performs SQL data persistence and runs a blockchain node persisting data also in this blockchain; d) Tier 4: this is where user applications are: for farm employees to perform data entry and for the farm to observe operations statistics.

3.2. Main classes

This proposed ontology is called ontology for pervasive traceability of agrochemicals (OntoPTA). The main classes that are presented in this ontology can be seen in Figure 5. The same hierarchical representation can be seen as a graph by using the plugin in OWLViz³ in Figure 6. From the Thing class we have: actors, path_direction, users, chemical_product, regulation, technologies.

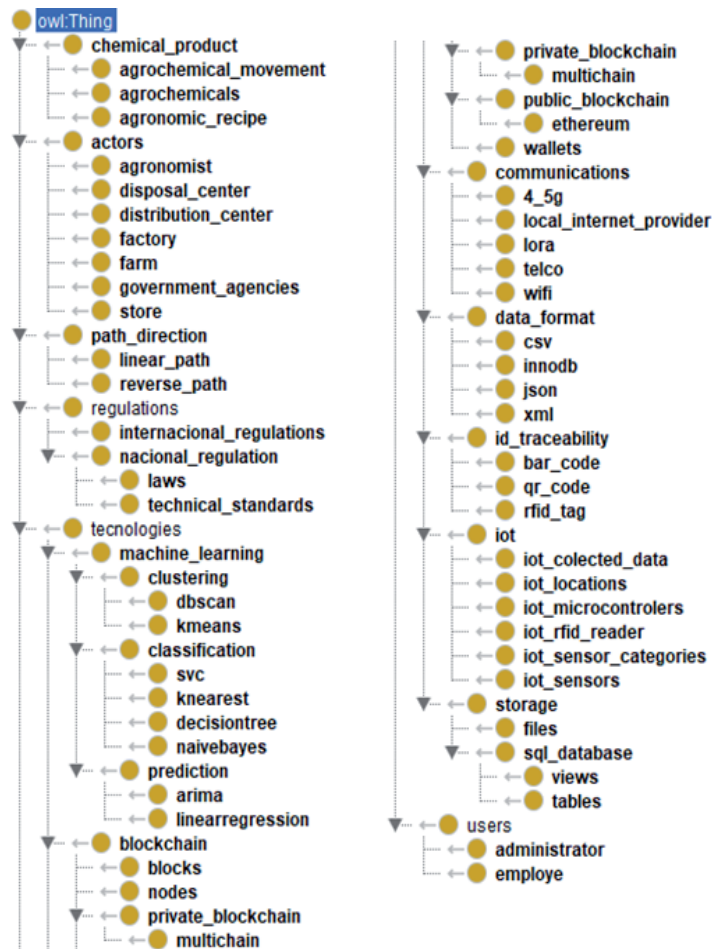


Figure 5 - OntoPTA classes and hierarchy

³<https://protegewiki.stanford.edu/wiki/OWLViz>

3.3. Class visualization

The OWLViz library allows a presentation of a graph indicating classes, sub-classes, and their relationships, showing a network of interconnections between the main elements of ontology, Figure 6.

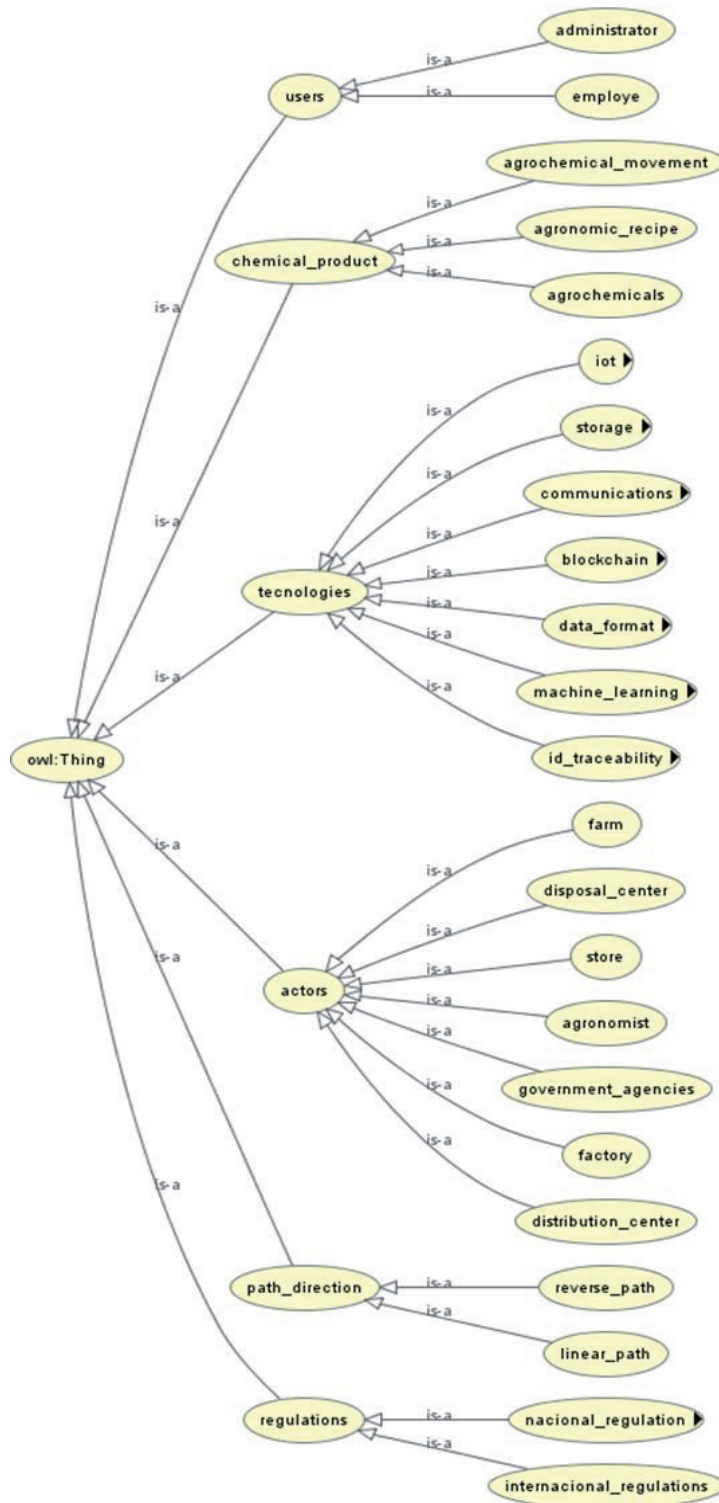


Figure 6 - View of some OntoPTA classes in the OWLViz view made with Protégé

3.4. Main relationships

Relationships are called in Protégé as object property and are all the child of an object called topObjectProperty. Relationships join classes such as "administrator" and "farm" forming "administrator manage farm" or "administrator owns wallet". The relationships are presented in Figure 7.



Figure 7 - OntoPTA, list of relationships

3.5. Questions applied to the model

Queries were also performed via Protégé. In addition to classes, attributes and properties, some data were inserted so that the model could be tested via SPARQL⁴ queries. For example, to verify who are the actors involved in the supply chain, the following query was executed and its respective result in Figure 8 and Figure 9.

```
SELECT * WHERE {
  {SELECT ?atores WHERE { ?atoresrdf:typeex:loja }}
  UNION
  {SELECT ?atores WHERE { ?atoresrdf:typeex:cliente }}
  UNION
  {SELECT ?atores WHERE { ?atoresrdf:typeex:fabrica }}
}
```

atores
ClienteC1
ClienteC2
ClienteC3
FabricaA1
LojaL1
LojaL2

Figure 8 - Query example 1, showing who the actors are.

⁴SPARQL Protocol and RDF Query Language

```

SELECT * WHERE {
{
SELECT ?cliente ?cliente_produtoP1 ?cliente_produtoP2
  WHERE { ?cliente ex:cliente_produtoP1 ?cliente_produtoP1 .
          ?cliente ex:cliente_produtoP2 ?cliente_produtoP2 .
FILTER (?cliente_produtoP1 > 0 || ?cliente_produtoP2 > 0)}
}
UNION
{SELECT ?loja ?loja_produtoP1 ?loja_produtoP2
  WHERE { ?loja ex:loja_produtoP1 ?loja_produtoP1 .
          ?loja ex:loja_produtoP2 ?loja_produtoP2 .
FILTER (?loja_produtoP1 > 0 || ?loja_produtoP2 > 0)}
}
UNION
{SELECT ?fabrica ?fabrica_produtoP1 ?fabrica_produtoP2
  WHERE { ?fabrica ex:fabrica_produtoP1 ?fabrica_produtoP1 .
          ?fabrica ex:fabrica_produtoP2 ?fabrica_produtoP2 .
FILTER (?fabrica_produtoP1 > 0 || ?fabrica_produtoP2 > 0)}
}
}
}

```

atores	produtoP1	produtoP2
ClienteC1	"30"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>"1"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>	
ClienteC3	"5"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>"60"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>	
FabricaA1	"50"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>"30"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>	
LojaL1	"10"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>"20"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int>	

Figure 9 - Query example 2, showing which actors have products.

4 Results and discussion

The ontology concepts presented are in accordance with [23-25]. The notation used to represent the business area that involves the reverse supply chain of agrochemicals was the OWL is used as a language to descript ontologies. The work of representing knowledge, discovering new relationships, testing data, visualizing data, and queries were carried out following the reasoners engines Hermit (Figure 10) of the Protégé tool. The area of studies of the reverse chain of agrochemicals has already been treated in the computational model previously published by [22] and now has completed documentation via ontology. The ontology modeling allowed the identification of business classes and their documentation with descriptions that include attributes and relationships. Queries via SPARQL queries allowed for evaluating relationships and obtaining data allowing the model to be implemented in other platforms that use similar notation, such as the UML (Unified Modeling Language). Through queries and the use of the reasoner, this model will be able to provide new approaches in the study of reverse traceability. This ontology version of the agrochemicals reverse traceability model resulted in a knowledge base to be explored and a guide for new software applications in the reverse traceability of products with a high degree of danger and legal monitoring requirements.

```

INFO 19:45:00 Pre-computing inferences:
INFO 19:45:00 - class hierarchy
INFO 19:45:00 - object property hierarchy
INFO 19:45:00 - data property hierarchy
INFO 19:45:00 - class assertions
INFO 19:45:00 - object property assertions
INFO 19:45:00 - same individuals
INFO 19:45:00 Ontologies processed in 40 ms by Hermit
INFO 19:45:00

```

Figure 10 - Running the reasoner

Conclusion

The reasoner Hermit processed in about 40 ms. The results were organized by computing inferences for: class hierarchy, object property hierarchy, data property hierarchy, class assertions, object property assertions and individuals. The numbers presented were: 304 axioms, 167 logical axiom count, 116 declaration axioms count, 71 class count, 41 object property count, 65 sub class, 10 disjoint classes, 45 object property domain and 46 object property range.

We describe via ontology the knowledge within the scope of transit and monitoring of agrochemicals from the logistic chain to the internal use in a farm, allowing to present the concepts graphically and via classes and their relationships. This ontology will be available for future access for those who wish to expand to other dangerous products such as radioactive ones. This work allows the understanding of the agrochemical movement cycle. Today the MRPA is already published and is an alternative to the monitoring of agrochemicals and this ontology adds knowledge to the business rules about the pervasiveness of the movement of this type of product.

As limitations, this work did not use a real connection to a database or import data from a table in order to infer new relationships between the data collected by sensors. Recorded blockchain movement data can only be analyzed if previously recorded in the bank and compared with those of other logistic supply chains.

As future works, we perceive the need to integrate ontology concepts with software engineering practices and their proper marriage to UML diagrams. The presentation of concepts via notation as ontologies with classes and their relationships allows a greater understanding of the theme, their operationalization and implementation by various sectors of the actors involved.

References

- [1] **C. Gibson, K. Jung.** Historical Census Statistics on the Foreign-born Population of the United States, 1850 to 2000. Working paper series (United States. Bureau of the Census. Population Division). Population Division, U.S. Census Bureau, 2006. 102 p. URL <https://books.google.com.br/books?id=8mXJNAEACAAJ>.
- [2] UN. 2022 revision of world population prospects. Technical report, United Nations, 2022. URL <https://population.un.org/wpp/>.
- [3] **J.R. Vicente.** Economic efficiency of agricultural production in Brazil. *Revista De Economia E Sociologia Rural*, 2004; 42(2): 201–222.
- [4] FAO. The future of food and agriculture trends and challenges. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2017. URL <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>.
- [5] **S. Marnasidis, K. Stamatelatos, E. Verikouki, and K. Kazantzis.** Assessment of the generation of empty pesticide containers in agricultural areas. *Journal of Environmental Management*, 224: 37–48, 2018. ISSN 0301-4797. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.012>.
- [6] **N.R. Gonzalez.** Producción subjetiva sobre la exposición a agroquímicos. revision de la bibliografía científica. *Ciencia Saúde Coletiva*, 24(3):781–792, Mar 2019. ISSN 1413-8123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.012>.
- [7] **J.P.d. Souza, M.d.J. Porto, G.C. Credidio, and A.L.B. Teles.** Commercialization and use of pesticides in the city of Crisópolis-BA. *Research, Society and Development*, 11 (3):e4011326206, Feb. 2022. doi: 10.33448/rsd-v11i3.26206.
- [8] Brasil. Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, 2002. URL http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4074.htm.
- [9] IBAMA. Relatorios de comercialização de agrotóxicos. Technical report, IBAMA, Brasília, DF, 2022. URL <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>.
- [10] **M.D. Marques, S.S. Braga, and J.C. Forti.** The pesticides law under the optics of rural producers. *Interações (Campo Grande)*, 20(2):599–613, Apr 2019. ISSN 1518-7012. doi: 10.20435/inter.v0i0.1828.
- [11] **M. Kim, B. Hilton, Z. Burks, and J. Reyes.** Integrating blockchain, smart contracttokens, and IoT to design a food traceability solution. In *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, pages 335–340, 2018. doi: 10.1109/IEMCON.2018.8615007.
- [12] **S. Das, I. Ghosh, G. Banerjee, and U. Sarkar.** Artificial intelligence in agriculture: A literature survey. 05 2018.

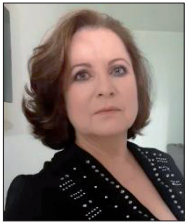
- https://www.researchgate.net/publication/326057794_Artificial_Intelligence_in_Agriculture_A_Literature_Survey.
- [13] **R. Mavilia and R. Pisani.** Blockchain for agricultural sector: The case of south africa. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 14 (3):845–851, 2022. doi: 10.1080/20421338.2021.1908660.
 - [14] **G. Mirabelli and V. Solina.** Blockchain and agricultural supply chains traceability: research trends and future challenges. *Procedia Manufacturing*, 42: 414–421, 2020. ISSN 2351-9789. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.054>.
 - [15] **A.A. Benyam, T. Soma, and E. Fraser.** Digital agricultural technologies for food loss and waste prevention and reduction: Global trends, adoption opportunities and barriers. *Journal of Cleaner Production*, 323:129099, 2021. ISSN 0959-6526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129099>.
 - [16] **Y.A. Yigezu, A. Mugeru, T. El-Shater, A. Aw-Hassan, C. Piggin, A. Haddad, Y. Khalil, and S. Loss.** Enhancing adoption of agricultural technologies requiring high initial investment among smallholders. *Technological Forecasting and Social Change*, 134:199–206, 2018. ISSN 0040-1625. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.06.006>.
 - [17] **H. Hashimoto, K. Yamada, H. Hori, S. Kumagai, M. Murata, T. Nagoya, H. Nakahara, and N. Mochida.** Guidelines for personal exposure monitoring of chemicals: Part vi. *Journal of Occupational Health*, 60(4):275–280, 2018. doi: <https://doi.org/10.1539/joh.2018-0121-RA>.
 - [18] **FAO.** Pest and pesticide management - pesticide related waste management. Technical report, United Nations, 2022. URL <https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/pesticide-risk-reduction/code-conduct/waste-management/en/>.
 - [19] **J. Camara.** Antas estão morrendo e sendo afetadas por agrotóxicos utilizados no cerrado de ms, aponta pesquisa, 2021. URL <https://g1.globo.com/ms/mato-grosso-do-sul/noticia/2021/06/30/antas-estao-morrendo-e-sendo-afetadas-por-agrotoxicos-utilizados-noghtml>.
 - [20] **PJC-MT.** Operação prende 12 pessoas e recupera mais de R\$ 2 milhões em defensivos, 2019. URL <https://www.sesp.mt.gov.br/-/13471710-operacao-prende-12-pessoas-e-recupera-mais-de-r-2-milhoes-em-defensivos>.
 - [21] **G1.** Brasil registra 40 mil casos de intoxicação por agrotóxicos em uma década, 2019. URL <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/globo-rural/noticia/2019/03/31/brasil-tem-40-mil-casos-de-intoxicacao-por-agrotoxicos-em-uma-decada.ghtml>.
 - [22] **E.S. Monteiro, R. da Rosa Righi, J.L.V. Barbosa, and A.M. Alberti.** Aptm: A model for pervasive traceability of agrochemicals. *Applied Sciences*, 11(17), 2021. ISSN 2076-3417. doi: 10.3390/app11178149.
 - [23] **J. Lumsden, H. Hall, and P. Cruickshank.** Ontology definition and construction, and epistemological adequacy for systems interoperability: A practitioner analysis. *Journal of Information Science*, 37(3):246–253, 2011. doi: 10.1177/0165551511401804.
 - [24] **M.M. Rawnsley.** Ontology, epistemology, and methodology: A clarification. *Nursing Science Quarterly*, 11(1):2–4, 1998. doi: 10.1177/089431849801100102.
 - [25] **F. Fonseca.** The double role of ontologies in information science research. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 58 (6):786–793, 2007. doi: <https://doi.org/10.1002/asi.20565>.
 - [26] **T.A. Banihashemi, J. Fei, and P.S.-L. Chen.** Exploring the relationship between reverse logistics and sustainability performance. *Modern Supply Chain Research and Applications*, 1(1):2–27, Jan 2019. ISSN 2631-3871. doi: 10.1108/MSCR-03-2019-0009.
 - [27] **K. Govindan and H. Soleimani.** A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a journal of cleaner production focus. *Journal of Cleaner Production*, 142:371–384, 2017. ISSN 0959-6526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.126>.
 - [28] **M.A.R. Joao, B. Lopes, and E.A. da Silva.** Management of agricultural pesticide packaging in the piauí cerrado. *ANPPAS - Revista Ambiente e Sociedade*, 2021. doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200071r1vu2021L4AO>.
 - [29] **S. Jin, B. Bluemling, and A.P. Mol.** Mitigating land pollution through pesticide packages – the case of a collection scheme in rural china. *Science of The Total Environment*, 622-623:502–509, 2018. ISSN 0048-9697. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.330>.
 - [30] **S. Kumar, P. Tiwari, and M. Zymbler.** Internet of things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *Journal of Big Data*, 6(1):111, Dec 2019. ISSN 2196-1115. doi: 10.1186/s40537-019-0268-2.
 - [31] **D. Kiran.** Chapter 35 - internet of things. In D. Kiran, editor, *Production Planning and Control*, pages 495–513. Butterworth-Heinemann, 2019. ISBN 978-0-12-818364-9. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818364-9.00035-4>.
 - [32] **R. Behera and K. Das.** A survey on machine learning: Concept, algorithms and applications. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2, 02 2017. URL

- <https://www.rroij.com/open-access/a-survey-on-machine-learning-conceptalgorithms-and-applications-.pdf>.
- [33] **R. Cioffi, M. Travaglioni, G. Piscitelli, A. Petrillo, and F. De Felice.** Artificial intelligence and machine learning applications in smart production: Progress, trends, and directions. *Sustainability*, 12(2), 2020. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su12020492.
- [34] **A. Moubayed, M. Injadat, A. B. Nassif, H. Lutfiyya, and A. Shami.** E-learning: Challenges and research opportunities using machine learning data analytics. *IEEE Access*, 6:39117–39138, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2851790.
- [35] **Y. Xin, L. Kong, Z. Liu, Y. Chen, Y. Li, H. Zhu, M. Gao, H. Hou, and C. Wang.** Machine learning and deep learning methods for cybersecurity. *IEEE Access*, 6: 35365–35381, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2836950.
- [36] **S. Nakamoto.** Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. May 2009. URL <http://www.bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [37] **F. Casino, T. K. Dasaklis, and C. Patsakis.** A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36:55–81, 2019. ISSN 0736-5853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>.
- [38] **S. Leible, S. Schlager, M. Schubotz, and B. Gipp.** A review on blockchain technology and blockchain projects fostering open science. *Frontiers in Blockchain*, 2, 2019. ISSN 2624-7852. doi: 10.3389/fbloc.2019.00016.
- [39] **D.B. Rawat, V. Chaudhary, and R. Doku.** Blockchain technology: Emerging applications and use cases for secure and trustworthy smart systems. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, 1(1):4–18, 2021. doi: 10.3390/jcp1010002.
- [40] **Y. Issaoui, A. Khat, A. Bahasse, and H. Ouajji.** Smart logistics: Study of the application of blockchain technology. *Procedia Computer Science*, 160:266–271, 2019. ISSN 1877-0509. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.467>. The 10th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks (EUSPN-2019) / The 9th International Conference on Current and Future Trends of Information and Communication Technologies in Healthcare (ICTH-2019) / Affiliated Workshops.
- [41] **S. Karakas, A.Z. Acar, and B. Kucukaltan.** Blockchain adoption in logistics and supply chain: a literature review and research agenda. *International Journal of Production Research*, 0(0):1–24, 2021. doi: 10.1080/00207543.2021.2012613.
- [42] **A. Chatterjee, A. Prinz, M. Gerdes, and S. Martinez.** An automatic Ontology-Based approach to support logical representation of observable and measurable data for healthy lifestyle management: Proof-of-Concept study. *J Med Internet Res*, 23(4):e24656, apr 2021. doi: 10.2196/24656.
- [43] **S. Sivamani, K. Kwak, and Y. Cho.** A study on intelligent user-centric logistics service model using ontology. *Journal of Applied Mathematics*, 2014:1–10, 06 2014. doi: 10.1155/2014/162838.
- [44] **D. Morrow.** Developing a basic formal supply chain ontology to improve communication and interoperability. *AFIT Scholar*, 6:210, 2021. URL <https://scholar.afil.edu/etd/5062/>.
- [45] **L. Nagy, T. Ruppert, and J. Abonyi.** Ontology-based analysis of manufacturing processes: Lessons learned from the case study of wire harness production. *Complexity*, 2021:8603515, Nov 2021. doi: 10.1155/2021/8603515.
- [46] **F. Ameri, D. Sormaz, F. Psarommatis, and D. Kiritsis.** Industrial ontologies for interoperability in agile and resilient manufacturing. *International Journal of Production Research*, 60(2):420–441, 2022. doi: 10.1080/00207543.2021.1987553.
- [47] **J. Watrobski.** Ontology supporting green supplier selection process. *Procedia Computer Science*, 159:1602–1613, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.331>.
- [48] **F. Ameri, E. Wallace, R. Yoder, and F. Riddick.** Enabling traceability in agri-food supply chains using an ontological approach. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, page 17, 2022. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4054092>.
- [49] **Z. Li and J. Huang.** How to effectively improve pesticide waste governance: A perspective of reverse logistics. *Sustainability*, 10(10), 2018. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su10103622.
- [50] **M. Onwona Kwakye, B. Mengistie, J. Ofosu-Anim, A. T. K. Nuer, and P. J. Van den Brink.** Pesticide registration, distribution and use practices in ghana. *Environment, Development and Sustainability*, 21(6):2667–2691, Dec 2019. ISSN 1573-2975. doi: 10.1007/s10668-018-0154-7.
- [51] **K. Douladiris, T. Dasaklis, F. Casino, and C. Douligeris.** A blockchain framework for reverse logistics of used medical equipment. In *Proceedings of the 24th Pan-Hellenic Conference on Informatics, PCI '20*, page 148–151, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery. ISBN 9781450388979. doi: 10.1145/3437120.3437295.
- [52] **L. Guo, C. Jin, and G. Liu.** Design of monitoring system for hazardous chemicals logistics based on internet of things. pages 1168–1173, 12, 2017. doi: 10.1109/CompComm.2017.8322727.
- [53] **K. Dandage, R. Badia-Melis, and L. Ruiz-García.** Indian perspective in food traceability: A review. *Food Control*, 71:217–227, 2017. ISSN 0956-7135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.005>.
- [54] **S. Yao and K. Zhu.** Combating product label misconduct: The role of traceability and market inspection. *European Journal of Operational Research*, 282:559–568, 2020. doi: 10.1016/j.ejor.2019.09.031.
- [55] **S. Mondal, K. P. Wijewardena, S. Karuppuswami, N. Kriti, D. Kumar, and P. Chahal.** Blockchain inspired rfid-

based information architecture for food supply chain. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3):5803–5813, 2019. doi: 10.1109/JIOT.2019.2907658.

About the authors

Prof. Dr. **Emiliano Soares Monteiro**. PhD in Applied Computing, by UNISINOS. Master in Computer Science from the Federal University of Santa Catarina (UFSC), specialist in Business Systems Analysis (UNIC), Technologist in Data Processing from the Faculty of Informatics of Cuiabá (FIC). Professor at Unemat. Areas of interest: computer networks, computer programming, accessibility, project design and management, blockchain, reverse logistics, renewable energies and software engineering. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3476-3842>. emiliano@unemat.br. ✉



Prof. Msc. **Lidia Martins da Silva**. Lidia Martins da Silva is a Ph.D. student in Applied Computing at the University of Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, Brazil. She received a master's degree in Computer Science from the Methodist University of Piracicaba (UNIMEP), Piracicaba, SP. Currently, she is the Coordinator of the Execution Nucleus for the distance learning courses - Project of the State Court of Auditors (TCE) and the Federal University of Mato Grosso, and also acts as Coordinator of the Technology Courses in Analysis and Development of Systems, Technology in Computer Networks and Bachelor in Computer Science at the INVEST Faculty of Science and Technology in Cuiabá –

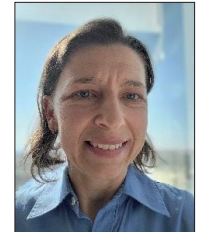


MT. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9480-8005>. lidiamartins10@gmail.com.

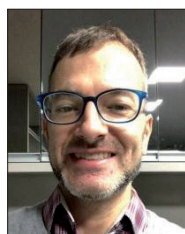
Prof. Dr. **Andrêsa Vargas Larentis**. Andrêsa Vargas Larentis received M.Sc. and Ph.D in applied computing from the University of Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, Brazil. Andrêsa works with game development for the health area at Feevale University. Her research interests are Machine Learning, Data Analysis, Games Development, Software Development, Applied Computing in Health, Learning and Industry. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4164-6687>. andresa.vargas@gmail.com.



Prof. Dr. **Sandro José Rigo**. Sandro José Rigo is a Professor at UNISINOS University and a researcher in the Post-Graduate Program in Applied Computing (UNISINOS / PPGCA), Consultant in Innovation and Information Technology and Coordinator of Research Projects. His areas of interest are Artificial Intelligence, Educational Data Mining, Semantic Web and Natural Language Processing. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8140-5621>. rigo@unisinis.br.



Prof. Dr. **Jorge Luis Victória Barbosa**. Jorge Luis Victória Barbosa received M.Sc. and Ph.D. in computer science from the Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil. He conducted post-doctoral studies at Sungkyunkwan University (SKKU, Suwon, South Korea) and University of California Irvine (UCI, Irvine, USA). Jorge is a full professor at the Applied Computing Graduate Program (PPGCA) of the University of Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), head of the university's Mobile Computing Lab (MOBILAB), and a researcher at the Brazilian Council for Scientific and Technological Development (CNPq). His research interests are Ubiquitous Computing, Ambient Intelligence, Big Data, Internet of Things (IoT), Machine Learning, Data Analysis, Games Development, Context Histories, Context Prediction mainly through similarity and pattern analysis, Applied Computing in Health, Accessibility, Learning, Industry and Agriculture. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7471-6173>. jbarbosa@unisinis.br.



Prof. Dr. **Rodrigo da Rosa Righi**. Rodrigo da Rosa Righi is a senior member of the IEEE, CNPq productivity fellow and coordinator of the Graduate Program in Applied Computing (PPGCA) at the University of Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), where he also works as a researcher. He has a postdoctoral degree, held at KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology)-South Korea, with emphasis on the areas of Internet of Things and Cloud Computing. The master's and doctorate in Computer Science were done at the Federal University of Rio Grande do Sul (conclusions in 2005 and 2009, respectively). In particular, the doctorate was done in the sandwich modality at Technische Universität Berlin, Germany. He works on the following topics: performance evaluation, process migration and scheduling, load balancing and adaptation of communication in distributed environments (Clusters, Grids and Clouds), embedded computing and Internet of Things (RFID technology). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5080-7660>. rrrighi@unisinis.br.

Received June 10, 2023. Revised June 22, 2023. Accepted June 29, 2023.



Онтология всеобъемлющей прослеживаемости агрохимикатов

© 2023, Эмилиано Соарес Монтейро ¹✉, Родриго да Роса Риги ², Сандро Риги ², Хорхе Луис Виктория Барбоза ², Лидия Мартинс да Силва ², Андреса Варгас Ларентис ³

¹ Государственный университет Мату-Гросу (UNEMAT), Синоп, Бразилия

² Программа прикладных вычислений PPGCA (UNISINOS), Сан-Леопольдо, Бразилия

³ Независимый исследователь, Сан-Леопольдо, Бразилия

Аннотация

Рост мирового населения приводит к более крупному и более эффективному производству продуктов питания, заставляя агробизнес участвовать в гонке за большей производительностью. Таким образом, агрохимикаты, как инструмент увеличения и защиты производства, становятся всё важнее с каждым урожаем. В работе представлена онтология, описывающая знания, необходимые для создания модели всеобъемлющей прослеживаемости агрохимикатов (онтология всеобъемлющей прослеживаемости агрохимикатов, *OntoPTA*). В статье представлены классы и их отношения в иерархическом порядке, а также визуализация на языке онтологий *OWL*. Эта онтология заполняет пробел в понимании и моделировании этого типа процесса агробизнеса. Проведённое моделирование помогает администраторам ферм и разработчикам программного обеспечения лучше анализировать разработку, использование и обслуживание систем в агробизнесе.

Ключевые слова: онтология, агрохимикаты, блокчейн, прослеживаемость, *OntoPTA*.

Цитирование: Монтейро Э.С., да Роса Риги Р., Риги С., Барбоза Х.Л.В., да Силва Л.М., Ларентис А.В. Онтология всеобъемлющей прослеживаемости агрохимикатов. *Онтология проектирования*. 2023; 13(2): 217-231. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-217-231.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рисунки

Рисунок 1 – Участники и цепочки поставок агрохимикатов

Рисунок 2 – Основные блоки Интернета вещей

Рисунок 3 – Упрощённая схема блокчейна

Рисунок 4 – Обратная логистическая цепочка и уровни внутри фермы

Рисунок 5 – Классы и иерархия *OntoPTA*

Рисунок 6 – Представление некоторых классов *OntoPTA* в представлении *OWLviz*, созданном с помощью *Protégé*

Рисунок 7 – *OntoPTA*, список отношений

Рисунок 8 – Пример запроса 1, показывающий, кто является участниками

Рисунок 9 – Пример запроса 2, показывающий, у каких участников есть продукты

Рисунок 10 – Запуск механизма рассуждения

Сведения об авторах

Эмилиано Соарес Монтейро. Доктор наук в прикладных вычислениях, Университет Вале-ду-Риу-дус-Синос (UNISINOS). Магистр компьютерных наук Федерального университета Санта-Катарины (UFSC), специалист по анализу бизнес-систем (UNIC), технолог по обработке данных факультета информатики Куябы (FIC). Профессор в Государственном университете Мату-Гросу (Unemat). Сферы интересов: компьютерные сети, проектирование и управление проектами, блокчейн, логистика, возобновляемые источники энергии и разработка программного обеспечения. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3476-3842>. emiliano@unemat.br. ✉

Лидия Мартинс да Силва. Доктор наук, окончила факультет прикладных вычислений Университета Вале-ду-

Риу-дус-Синос (UNISINOS), Сан-Леопольдо, Бразилия. Получила степень магистра компьютерных наук в Методистском университете Пирасикабы (UNIMEP). В настоящее время она является координатором курсов дистанционного обучения: Проект Государственной аудиторской палаты (TCE) и Федерального университета Мату-Гросу, а также выступает в качестве координатора технологических курсов по анализу и разработке систем, по технологии в компьютерных сетях и курсу компьютерных наук на факультете науки и технологий INVEST в Куябе. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9480-8005>. lidiamartins10@gmail.com.

Андреса Варгас Ларентис. Магистр наук и доктор наук в области прикладных вычислений Университета Вале-ду-Риу-дус-Синос (UNISINOS), Сан-Леопольдо, Бразилия. Андреса занимается разработкой игр для сферы здравоохранения в Университете Фивейл. Её исследовательские интересы включают: машинное обучение, анализ данных, разработку игр, разработку программного обеспечения, прикладные вычисления в здравоохранении, обучении и промышленности. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4164-6687>. andresa.vargas@gmail.com.

Сандро Хосе Ригу. Профессор Университета UNISINOS и научный сотрудник программы последипломного образования в области прикладных вычислений (UNISINOS/PPGCA), консультант по инновациям и информационным технологиям, координатор исследовательских проектов. В сферу его интересов входят: искусственный интеллект, интеллектуальный анализ образовательных данных, семантическая сеть и обработка естественного языка. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8140-5621>. rigo@unisinoss.br.

Хорхе Луис Виктория Барбоса. Магистр наук и доктор наук по информатике Федерального университета Риу-Гранди-ду-Сул, Порту-Алегри, Бразилия. Он проводил исследования в Университете Сонгюнган (SKKU, Сувон, Южная Корея) и Калифорнийском университете в Ирвине (UCI, Ирвин, США). Хорхе является профессором Программы прикладных вычислений (PPGCA) Университета Вале-ду-Риу-дус-Синос (UNISINOS), руководителем лаборатории мобильных вычислений (MOBILAB) и научным сотрудником Бразильского совета по научно-техническому развитию (CNPq). Его интересы: большие данные, Интернет вещей (IoT), машинное обучение, анализ данных, разработка игр, прикладные вычисления в здравоохранении, обучении, промышленности и сельском хозяйстве. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7471-6173>. jbarbosa@unisinoss.br.

Родриго да Роза Риги. Член IEEE, научный сотрудник CNPq и координатор Программы прикладных вычислений (PPGCA) в Университете Вале-ду-Риу-дус-Синос (UNISINOS), где он работает научным сотрудником. Степень магистра и доктора компьютерных наук получил в Федеральном университете Риу-Гранди-ду-Сул (в 2005 и 2009 годах соответственно). Докторскую степень получил в KAIST (Корейский передовой институт науки и технологий) в Южной Корее в области Интернета вещей и облачных вычислений; в Берлинском техническом университете (Technische Universitaet Berlin), Германия. Он работает над темами: оценка производительности, планирование бизнес процессов, встроенные вычисления и Интернет вещей (технология RFID). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5080-7660>. rrrighi@unisinoss.br.

Поступила в редакцию 10.06.2023, после рецензирования 22.06.2023. Принята к публикации 29.06.2023.

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 519.711.3

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-232-242



Применение графовых моделей в проектном управлении

© 2023, А.З. Асанов¹✉, И.Ю. Мышкина², Л.Ю. Грудцына²

¹ Институт искусственного интеллекта МИРЭА – Российского технологического университета, Москва, Россия

² Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

Аннотация

Исследуется возможность применения графовых моделей в проектном управлении для решения задачи формирования проектной группы и распределения работ проекта между потенциальными исполнителями. Выделены возможные направления применения онтологического моделирования в проектном управлении. Средствами редактора онтологий *Protégé* реализована онтология проекта. Исследуется возможность построения векторных представлений элементов простых графов и графов знаний в задаче формирования проектной группы. Задачи исследования: построение графовых моделей проектов – простого графа и графа знаний; применение векторных представлений вершин и отношений графовых моделей для решения задачи распределения работ проекта. Рассматривается возможность применения мер семантической близости в онтологии. Новизна предложенного подхода заключается в использовании при формировании проектной группы данных об участниках реализованных проектов, что повышает вероятность успешной реализации проекта. Представление элементов графа в виде числовых векторов позволяет применить к исследованию предметной области методы машинного обучения. Приводится пример решения задачи формирования рабочей группы проекта, в котором осуществлён выбор исполнителей проектной работы. Все расчёты осуществлены средствами языка *Python*.

Ключевые слова: графовая модель, граф знаний, онтология, проект, команда, исполнитель.

Цитирование: Асанов А.З., Мышкина И.Ю., Грудцына Л.Ю. Применение графовых моделей в проектном управлении // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №2(48). С.232-242. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-232-242.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Задачи управления кадрами организации по степени важности стоят в одном ряду с задачами производства и сбыта продукции. Всё больше компаний становятся проектно-ориентированными, выполняя работы в рамках проектов [1]. Успешность нового проекта в любой сфере деятельности напрямую зависит от компетентности выбранных исполнителей, от того, правильно ли распределены между членами команды отдельные задачи проекта [2]. В данной работе рассматривается задача распределения работ проекта между потенциальными исполнителями и исследуется возможность применения для её решения графовых моделей (ГМ). Использование ГМ позволяет построить структурную схему исследуемой предметной области (ПрО), наглядно и понятно представить то, как связаны и взаимодействуют её объекты. Использование современного математического аппарата при анализе ГМ позволяет устанавливать ранее не известные связи, зависимости и закономерности, отслеживать изменения различных характеристик. Особая ценность ГМ заключается в том, что они

предоставляют формальный аппарат для плохоформализуемых задач, требующих учёта как количественных, так и качественных параметров, в т.ч. в условиях неопределённости. В последнее время для решения прикладных задач используют такие ГМ, как байесовские сети, марковские цепи, когнитивные модели (карты), искусственные нейронные сети, графы знаний (ГЗ), онтологии и др. Вероятностные ГМ используются в компьютерном зрении, биоинформатике, принятии решений, робототехнике и др. [3]. Построение ГМ, как правило, осуществляется путём привлечения экспертов. В этом случае ГМ есть субъективное представление эксперта о ПрО в виде схемы взаимодействия её объектов. Кроме привлечения экспертов, ГМ могут выводиться из данных на основе методов машинного обучения (МО) [3].

В данной работе исследуется возможность применения ГМ и ГЗ к решению одной из задач проектного управления.

1 Онтологическая модель проекта

Далее приведены определения ГМ, используемые в работе.

Обобщённый граф или просто *граф* G состоит из непустого конечного множества $V(G)$ элементов, называемых вершинами, и конечного семейства $E(G)$ пар (не обязательно различных) элементов из $V(G)$, именуемых рёбрами; использование слова «семейство» допускает существование кратных рёбер. Если пары вершин семейства $E(G)$ не упорядочены, то граф называется неориентированным, если упорядочены – ориентированным графом (орграфом). В *простом графе* имеется не более одного ребра, соединяющего пару вершин, а также отсутствуют петли (рёбра, соединяющие вершину с самой собой) [4].

ГЗ – это орграф, который может содержать кратные рёбра и петли, каждое из рёбер относится к одному из возможных типов; каждому заданному типу ребра соответствует некоторое отношение между объектами ПрО, а вершинам – объекты ПрО.

Онтология – это формальная, явная спецификация общей концептуализации, состоящая из иерархии понятий ПрО, связей между ними и ограничений, которые действуют в рамках этой модели. Термин «онтология» связывают с термином «ГЗ», поскольку при наполнении онтологии экземплярами происходит её превращение в ГЗ [5].

Онтология есть кортеж $\langle L := L^C \cup L^P \cup L^A \cup L^{VA}, C, P, A, F, G, H^C, J, H^P, I \rangle$, где L – лексикон, т.е. множество терминов понятий (L^C), отношений (L^P), атрибутов (L^A), значений атрибутов (L^{VA}); C – множество понятий; $P = C \times C$ – множество отношений между понятиями; $A = C \times L^{VA}$ – множество атрибутов понятий; $F = L^C \rightarrow C$ – функция связи лексикона с понятиями; $G = L^P \rightarrow P$ – функция связи лексикона с отношениями; $J = L^A \rightarrow A$ – функция связи лексикона с атрибутами; $H^C = C \times C$ – таксономическая иерархия классов; $H^P = P \times P$ – иерархия отношений, I – множество экземпляров (понятий единичного объёма) [6].

Применение онтологического подхода позволяет [7, 8]: совместное использование пользователями знаний в рассматриваемой ПрО; установление общей терминологии, определение её смысла и причинно-следственных связей, получение семантического базиса в определении содержания информации, циркулирующей в системе; повторное использование знаний в ПрО; получение логической теории, на основе которой осуществляется вывод новых знаний, явно не заложенных в онтологии и расширяющих её функциональные возможности и класс решаемых задач.

ГМ используются в проектном управлении (например, [9]), в т.ч. в управлении человеческими ресурсами, управлении рисками проекта и т.д. Основная ценность применения онтологических моделей в проектном управлении заключается в том, что подобные модели могут стать основной частью базы знаний интеллектуальной системы поддержки принятия управленческих решений, а также основой системы управления знаниями проектной организации.

На основе результатов анализа работ, посвящённых онтологическому моделированию проектной работы [10-12], была разработана онтология проекта. Разработанный ГЗ реализован средствами редактора онтологий *Protégé*¹, фрагмент иерархии классов онтологии проекта представлен на рисунке 1.

Особенностями данного графа является включение в качестве класса ключевых слов для более подробного описания различных понятий ПрО (компетенций, результатов проекта, знаний, умений и владений работников и др.); указания конкретных составляющих понятий (конкретные методы, программы, методики и т.п.), что необходимо для уточнения критериев поиска исполнителя, более подробного описания средствами онтологий требований к работам проекта, автоматического определения связей между компетенциями, автоматического расширения набора ключевых слов компетенций.

Для определения групп оцениваемых компетенций использованы группы компетенций и компетенции инженеров, приведённые в работе [13].

При накоплении достаточного объёма данных о реализуемых проектах, частных работах, результатах научно-исследовательских проектов полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании значимости компетенций при подготовке специалистов в соответствующей области, при корректировке соответствующих образовательных программ [14]. Особенно это актуально для ВУЗов, функционирующих в моногородах и обеспечивающих кадрами градообразующие предприятия.

В таблице 1 приведены примеры отношений между некоторыми классами онтологии проекта.

Таблица 1 – Примеры отношений между классами онтологии проекта

Класс-субъект	Отношение	Класс-объект
РаботаПроекта	ТребуетКомпетенцию	Компетенция
Проект	ВключаетРаботу	РаботаПроекта
Работник	ВладеетКомпетенцией	Компетенция
РаботаПроекта	ВключаетРазработку	МатематическаяМодель, КомпьютернаяМодель
ЦельПроекта, МатематическаяМодель	ОписываетОбъект	Объект
Проект	ИмеетЦель	ЦельПроекта, МатематическаяМодель
Работник	ВыполняетРаботу	РаботаПроекта
Проект	ИмеетОбъект	Объект
Компетенция	ЯвляетсяРодителемДля	Компетенция

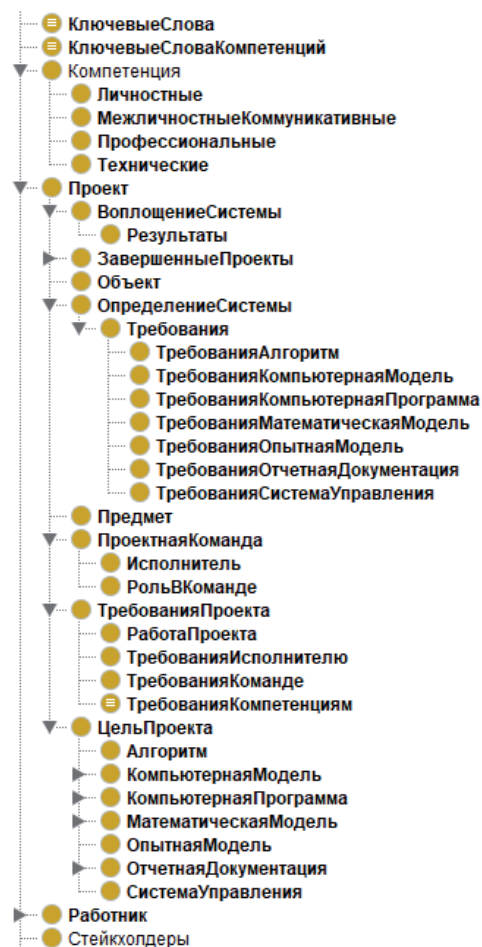


Рисунок 1 – Фрагмент иерархии классов онтологии проекта

¹ *Protégé* – A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. <https://protege.stanford.edu/>.

2 МО и анализ графов

Алгоритмы МО способны обучаться на наборах данных, описывающих исследуемые объекты или процессы и отражающие их свойства и закономерности [15, 16]. Для применения методов МО необходимо иметь векторные представления данных с действительными значениями, т.е. к ГМ можно применить существующие алгоритмы получения векторных представлений их вершин и отношений. Перечень некоторых задач, базирующихся на ГМ рассматриваемой ПрО, которые можно решить с применением методов МО [17], и некоторые возможные применения этих задач для проектного управления представлены ниже.

1) Предсказание связей:

- распределение работ (определение возможных исполнителей для работ нового проекта);
- определение новых связей между компетенциями и ключевыми словами;
- уточнение требований к профессиональной компетентности исполнителя нового проекта (определение новых связей между компетенциями и новой работой проекта).

2) Классификация вершин, сопоставление понятий:

- определение групп близких потенциальных исполнителей;
- формирование проектных групп, имеющих успешный опыт совместной работы;
- определение сходства (связей) между проектами и/или результатами проектов (разрабатываемыми моделями, алгоритмами, программами и др.);
- оценка соответствия компетенций потенциальных исполнителей проекта требованиям частных заданий.

Для построения векторных представлений вершин и отношений простого графа можно использовать такие алгоритмы, как *DeepWalk* [18], *Node2Vec* [19], нейросетевые алгоритмы и др. Существуют алгоритмы, которые позволяют каждой вершине и каждому отношению ГЗ ставить в соответствие уникальный вектор (*TransE*, *DistMult*, *RESCAL* и др.) [20]. Алгоритмы отличаются в т.ч. используемой функцией $f(x, r, y)$ оценки отношения r экземпляров x и y , которая позволяет оценить его правдоподобность; функцией потерь, значение которой минимизируется в процессе обучения модели. Некоторые алгоритмы имеют геометрическую интерпретацию (например, *TransE*), некоторые алгоритмы не позволяют работать с определёнными свойствами отношений (симметричность, антисимметричность и т.п.).

3 Анализ нового проекта с помощью ГМ и МО

3.1 Онтология и задача распределения работ

В качестве примера рассматривается задача определения возможных исполнителей работ по проекту, исходные данные, требования к исполнителям представлены в виде упрощённого оргграфа с типизированными рёбрами (рисунок 2). Данный граф является подграфом онтографа проекта (рисунок 1) и в качестве вершин включает экземпляры объектов ПрО (классов онтологии), а именно таких классов, как *Проект*, *Объект*, *МатематическаяМодель*, *Работник*, *РаботаПроекта*, *Компетенция*.

Граф включает завершённые проекты *Проект1* и *Проект2*. *Проект3* – это новый проект. Одной из целей *Проекта2* и *Проекта3* является построение некой модели одного и того же объекта *Объект1*.

На графе представлены требования к компетенциям исполнителя для каждой работы, преемственные связи между компетенциями. Имеется три потенциальных исполнителя для выполнения новой работы *Работа3*. Все возможные исполнители на высоком уровне владеют всеми компетенциями. *Работник3* не принимал участия ни в одном проекте.

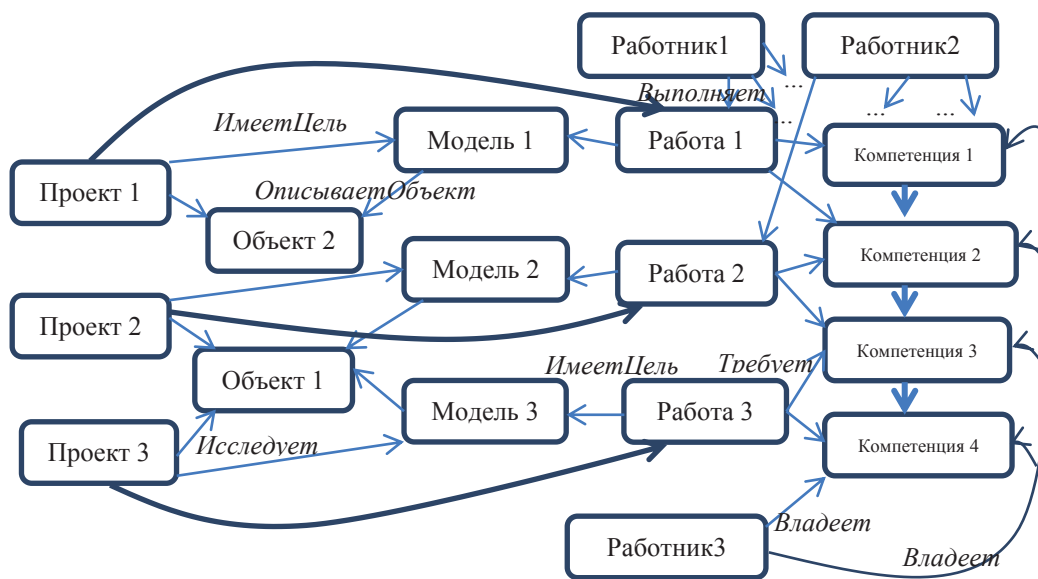


Рисунок 2 – Фрагмент упрощённого орграфа для задачи распределения работы проекта

3.2 Меры семантической близости в онтологии и задача распределения работ

Для оценки сходства пар объектов в онтологической модели разработаны и используются различные меры семантической близости ($S(x, y) \in [0, 1]$), которые позволяют использовать различные смысловые характеристики сравниваемых объектов (понятий, терминов), их свойства (атрибуты и отношения с другими объектами), анализ структуры и взаимное положение в онтологической иерархии [6].

Оценка соответствия работника требованиям к исполнителю работы проекта может быть определена через соотношение количества одинаковых свойств сравниваемых объектов ($A \cap B$, A и B – множества свойств этих объектов) к общему числу свойств этих объектов ($A \cup B$). В качестве сравниваемых объектов в рассматриваемой задаче могут быть выбраны уже выполненные работы (с известными исполнителями) и новая работа, цели этих работ (в примере это некие модели); ключевые слова (с учётом их преемственности), описывающие работы, модели, компетенции работников. Для поиска одинаковых и/или различных свойств можно построить *SPARQL*-запросы² и/или правила логического вывода *SWRL*³. Для автоматизации расчётов может быть использована библиотека *Python Owlready2*⁴ [21].

3.3 ГМ и задача распределения работ

Для применения алгоритмов получения векторных представлений для простых графов с однородными вершинами и однотипными отношениями необходимо сначала построить такой граф на основе онтологии. Общая схема построения графа и выбора проектной группы представлена на рисунке 3. Первым этапом является формирование неориентированного графа, вершинам которого соответствуют исполнители, а наличие связи между исполнителями означает их участие в одном и/или схожем уже реализованном проекте. Далее необходимо применить один из алгоритмов построения векторных представлений вершин простого графа. Полученные векторные представления потенциальных исполнителей затем могут быть использованы для формирования групп (кластеров) исполнителей с помощью извест-

² SPARQL 1.1 Query Language. <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>.

³ SWRL rules - Owlready2 documentation. <https://owlready2.readthedocs.io/en/latest/rule.html>.

⁴ Owlready2 documentation. <https://owlready2.readthedocs.io/en/latest/>.

ных алгоритмов кластеризации [16]. Далее осуществляется выбор кластера, исполнители в котором обладают всеми требуемыми компетенциями на достаточном уровне, для этого используются оценки компетенций исполнителей, а также их значимость (на рисунке 3: w_{ij} – оценка j -й компетенции i -го исполнителя, z_j – значимость j -й компетенции для проекта; $w_{ij}, z_j \in [0;1]$).

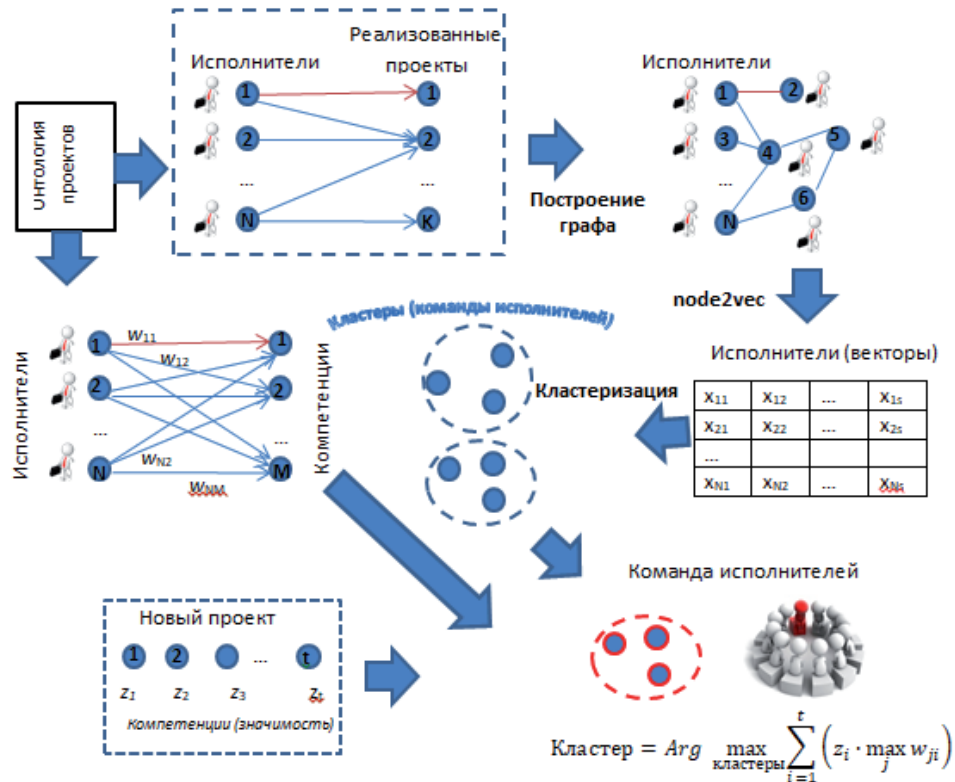


Рисунок 3 – Общая схема формирования графа исполнителей и выбора проектной группы

Описание содержания любого проекта на начальных этапах его жизненного цикла, как правило, всегда подразумевает описание множества работ, которые необходимо выполнить, взаимосвязей между работами и характеристик работ, в т.ч., набора компетенций исполнителей, необходимых для успешной реализации работ проекта. Набор компетенций работ проекта может быть определён на основе существующей модели компетенций сотрудников проектной организации, которая наряду с системами оценки и развития профессиональной компетентности персонала являются важной составляющей кадровой политики любой организации. Модель компетенций может быть построена по результатам экспертных опросов, анализа профессиональных стандартов, стандартов в области менеджмента проектной деятельности и т.п.

Ограничением рассмотренного подхода к формированию проектной группы является то, что новый исполнитель, возможно, самый компетентный, но не принявший участие ни в одном проекте, не будет иметь связей ни с кем.

Другой возможный подход состоит в том, что строится граф с вершинами, соответствующими потенциальным исполнителям и определяются связи между ними на основе анализа компетенций исполнителей и/или ключевых слов, которые описывают профессиональные знания, умения и навыки претендентов. В этом случае в кластеры попадут исполнители со

схожим уровнем профессиональной компетентности. Для получения векторных представлений вершин графа могут использоваться существующие функции языка *Python*⁵.

3.4 ГЗ и задача распределения работ

Пусть для заданного множества объектов ПрО E и множества отношений между этими объектами R построен ГЗ $K \subseteq E \times R \times E$, который содержит тройки $(h, r, t) \in K$; $h, t \in E$ представляют соответственно субъект («голова») и объект («хвост») отношения $r \in R$, которое описывает некоторое взаимодействие между объектами ПрО [20]. Задача предсказания связи определяется как предсказание субъекта или объекта для троек $(?, r, t)$ или $(h, r, ?)$ соответственно. Так, в примере на рисунке 2 определяется наиболее вероятный субъект в тройке $(?, \text{«ВыполняетРаботу»}, \text{«Работа3»})$.

Каждый алгоритм построения векторных представлений элементов графа использует некоторую функцию оценки отношения $f: E \times R \times E \rightarrow \mathbf{R}$, позволяющую оценить правдоподобность тройки $(h, r, t) \in K$. Эта оценка должна в идеале принимать максимальные значения для $(h, r, t) \in K$ и минимальные для $(h, r, t) \notin K$. Например, алгоритмы *RESCAL* и *DistMult*, основанные на факторизации разреженного тензора смежности ГЗ [17], моделируют объекты в виде векторов $h, t \in \mathbf{R}^d$, а отношения – в виде матриц $\mathbf{W}_r \in \mathbf{R}^{d \times d}$, в *DistMult* эти матрицы являются диагональными. Функция оценки отношения $(h, r, t) \in K$ задаётся формулой [20]:

$$f(h, r, t) = \mathbf{h}^T \mathbf{W}_r \mathbf{t} = \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^d w_{ij}^{(r)} h_i t_j.$$

Обучение модели, как правило, осуществляется путём минимизации некоторой функции потерь, так, в алгоритме *DistMult* функция потерь может иметь вид [22]:

$$L = \sum_{(h, r, t) \in K} \sum_{(h', r, t') \in K'} \max\{f(h', r, t') - f(h, r, t) + 1, 0\},$$

где K' – множество «негативных» троек:

$$K' = \{(h', r, t) \mid h' \in E, (h', r, t) \notin K\} \cup \{(h, r, t') \mid t' \in E, (h, r, t') \notin K\}.$$

В качестве оптимизатора модели может быть использован мини-пакетный стохастический градиентный спуск [22].

Для работы с ГЗ использовались готовые функции библиотеки *Python PyKEEN*⁶. После обучения модели (например, *DistMult*, *TransE*, *ConvE*, *RotatE*) получены оценки различных отношений $f(x, r, y)$ экземпляров x и y , чем выше оценка, тем больше вероятность того, что рассматриваемое отношение окажется верным. При этом минимальное значение оценки, чтобы отношение было определено как точно верное, отсутствует.

Были смоделированы различные требования к работам нового проекта и с помощью векторных представлений вершин графа получены оценки вероятности связи между вершиной, соответствующей новой работе, и вершинами, соответствующими потенциальным исполнителям. Для ситуации, представленной на рисунке 2, по результатам работы большинства алгоритмов лучшим исполнителем является работник *Работник2*. Это объясняется тем, что хотя все потенциальные исполнители владеют требуемыми компетенциями, но *Работник2* имеет опыт выполнения подобных работ, а именно опыт разработки некой модели объекта *Объект1*.

⁵ Python3 implementation of the node2vec algorithm. <https://github.com/eliore/node2vec>.

⁶ PyKEEN 1.10.0 documentation. <https://pykeen.readthedocs.io/en/stable/index.html>.

Заключение

В работе приведены возможные подходы к применению ГМ при решении задачи распределения работ проекта между потенциальными исполнителями. Рассмотрены онтологии, ГЗ и простые графы. Выделены возможные направления применения векторного представления ГЗ и простых графов в проектном управлении. Средствами редактора онтологий *Protégé* реализована онтология проекта. Представление элементов графа в виде числовых векторов позволяет применить к исследованию ПрО методы МО. На примере решения задачи формирования рабочей группы проекта осуществлён выбор исполнителя проектной работы. Все расчёты осуществлены средствами соответствующих функций библиотек *Owlready2* и *PyKEEN* языка *Python*. Полученные результаты не противоречат ожидаемым экспертным оценкам.

Список источников

- [1] **Царьков И.Н.** Математические модели управления проектами. Москва: ИНФРА-М, 2019. 514 с.
- [2] **Асанов А.З., Мышкина И.Ю.** Процедура формирования команды исполнителей проекта на основе когнитивных карт и генетических алгоритмов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI Международной конференции. Самара : Офорт, 2019. С. 354–358.
- [3] **Сукар Л.Э.** Вероятностные графовые модели. Принципы и приложения. Москва: ДМК Пресс, 2021. 338 с.
- [4] **Уилсон Робин.** Введение в теорию графов, 5-е изд. Санкт-Петербург: ООО "Диалектика", 2019. 240 с.
- [5] **Кудрявцев Д.В., Беглер А.М., Гаврилова Т.А., Лещева И.А., Кубельский М.В., Тушканова О.Н.** Метод коллективной визуальной разработки онтологического графа знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. №1. С. 27-38.
- [6] **Крюков К.В., Панкова Л.А., Пронина В.А., Суховеров В.С., Шипилина Л.Б.** Меры семантической близости в онтологии // Проблемы управления. 2010. №5. С.2-14.
- [7] **Цуканова Н.И.** Онтологическая модель представления и организации знаний. Москва: Горячая линия – Телеком, 2015. 272 с.
- [8] **Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. Санкт-Петербург: Питер, 2020. 384 с.
- [9] **Черняховская Л.Р., Малахова А.И.** Разработка моделей и методов интеллектуальной поддержки принятия решений на основе онтологии организационного управления программными проектами // Онтология проектирования. 2013. №4. С. 42-52.
- [10] **Левенчук А.** Системноинженерное мышление. TechInvestLab, 2 апреля 2015. 305 с. [systems_engineering_thinking_2015.pdf](https://techinvestlab.ru/systems_engineering_thinking_2015.pdf) (techinvestlab.ru).
- [11] **Zaoua Wiem, Arfa Rabai Latifa Ben, Alalyani Wafa Rashid.** Towards an Ontology Based-Approach for Human Resource Management // The 10th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT). April 29 – May 2, 2019. Leuven, Belgium. P.417-424.
- [12] **Podgorelec V., Grasic B.** Implementing Innovative IT Solutions with Semantic Web Technologies // Products and Services; from R&D to Final Solutions. Nov., 2010. DOI: 10.5772/10399.
- [13] **Макарова И.В., Хабибуллин Р.Г., Ушенин А.М., Михеева С.А., Карабцев В.С.** Компьютер в инженерном образовании: новые возможности в подготовке инженеров для креативной экономики // Инженерное образование. 2016. №20. С.72-79.
- [14] **Асанов А.З., Мышкина И.Ю., Грудцына Л.Ю.** Прогнозирование востребованности компетенций при рекрутировке программ обучения с помощью когнитивных моделей // Онтология проектирования. 2019. Т.9. №2 (32). С.203–213. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-203-213.
- [15] **Болотова Л.С.** Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях. Москва: Финансы и статистика, 2012. 664 с.
- [16] **Флах П.** Машинное обучение. Москва: ДМК, 2015. 400 с.
- [17] **KG Course 2021.** Курс по графам знаний (Knowledge Graphs) и как их готовить в 2021 году. На русском языке. <https://migalkin.github.io/kgcourse2021/>.
- [18] **Perozzi B., Al-Rfou R., Skiena S.** DeepWalk: Online learning of social representations // KDD '14: Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. August 2014. Pages 701–710. DOI: 10.1145/2623330.2623732.
- [19] **Grover Aditya, Leskovec Jure.** node2vec: Scalable Feature Learning for Networks // KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. August 2016. P.855–864. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939754>.

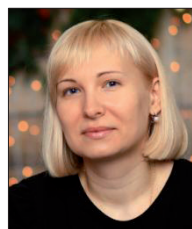
- [20] *Ali M., Berrendorf M., Hoyt C. T., Vermue L., Galkin M., Sharifzadeh S., Fischer A., Tresp V., Lehmann J.* Bringing Light Into the Dark: A Large-scale Evaluation of Knowledge Graph Embedding Models Under a Unified Framework. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2006.13365.
- [21] *Jean-Baptiste Lamy.* Ontologies with Python Programming OWL 2.0 Ontologies with Python and Owlready2. Apress, 2021. 270 p.
- [22] *Yang Bishan, Yih Wen-tau, He Xiaodong, Gao Jianfeng, Deng Li.* Embedding Entities and Relations for Learning and Inference in Knowledge Bases // ICLR'15: Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations. USA. May 7-9, 2015. <https://arxiv.org/abs/1412.6575>.

Сведения об авторах



Асанов Асхат Замилович, 1949 г. рождения. Окончил Казанский государственный университет в 1972 г., д.т.н. (2004), профессор. Профессор кафедры автоматических систем Института искусственного интеллекта МИРЭА–Российского технологического университета. В списке научных трудов более 250 работ в области системного анализа, управления и обработки информации. ORCID: 0000-0001-6724-0816; Author ID (РИНЦ): 263248; Author ID (Scopus): 7003438319. asanov@mirea.ru ✉.

Мышкина Ирина Юрьевна, 1980 г. рождения. Окончила Елабужский государственный педагогический институт в 2002 г., к.т.н.(2018). Доцент кафедры системного анализа и информатики Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета. В списке научных трудов более 30 работ в области управления в социальных и экономических системах. ORCID: 0000-0003-4309-3350; Author ID (РИНЦ): 603791; Author ID (Scopus): 57189268396; Researcher ID (WoS): M-4899-2015. mirinau@mail.ru.



Грудцына Лариса Юрьевна, 1980 г. рождения. Окончила Елабужский государственный педагогический институт в 2002 г. Старший преподаватель кафедры системного анализа и информатики Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета. В списке научных трудов более 20 работ в области управления в социальных и экономических системах. ORCID: 0000-0003-1307-6605; Author ID (РИНЦ): 804837; Author ID (Scopus): 57189270650; Researcher ID (WoS): M-6037-2015. larisa_u_g@mail.ru.

Поступила в редакцию 01.03.2023, после рецензирования 26.06.2023. Принята к публикации 28.06.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-232-242

Application of graph models in project management

© 2023, A.Z. Asanov¹✉, I.Yu. Myshkina², L.Yu. Grudtsyna²

¹ Institute of Cybernetics of MIREA, Russian Technological University, Moscow, Russia

² Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract

The possibility of using graph models in project management to solve the problem of forming a project team and distributing project work among potential performers is investigated. The possible areas of application of ontological modeling in project management are highlighted. The ontology of the project is implemented by means of the Protégé ontology editor. The possibility of constructing vector representations of elements of simple graphs and knowledge graphs in the problem of forming a project team is investigated. The main objectives of the research are: the construction of graph models of projects, a simple graph and a knowledge graph; the use of vector representations of vertices and rela-

tionships of graph models to solve the problem of distributing project work. The possibility of applying semantic proximity measures in ontology is analyzed. The novelty of the proposed approach lies in the use of data on participants in completed projects when forming a project team, which increases the chance of successful project implementation. The representation of graph elements in the form of numerical vectors makes it possible to apply machine learning methods to the study of the subject area. An example of solving the problem of forming a project working group is given, in which the executors of the project work are selected. All calculations were carried out using the Python language.

Keywords: *graph model, knowledge graph, ontology, project, team, performer.*

For citation: *Asanov AZ, Myshkina IY, Grudtsyna LYu.* Application of graph models in project management [In Russian]. *Ontology of designing.* 2023; 13(2): 232-242. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-232-242.

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

List of figures and table

Figure 1 - A fragment of the project ontology class hierarchy

Figure 2 - A fragment of a simplified digraph for the task of distributing project work

Figure 3 - The general scheme for forming the graph of performers and the selection of the project team

Table 1 - Examples of relations between project ontology classes

References

- [1] *Tsarkov IN.* Mathematical models of project management [In Russian]. Moscow: INFRA-M, 2019. 514 p.
- [2] *Asanov AZ, Myshkina IYu.* The procedure for forming a team of project performers based on cognitive maps and genetic algorithms [In Russian]. Problems of control and modeling in complex systems: Proceedings of the XXI International Conference. Samara: Ofort, 2019. P.354–358.
- [3] *Sucar LE.* Probabilistic graphical models. Principles and applications [In Russian]. Moscow: DMK Press, 2021. 338 p.
- [4] *Robin JW.* Introduction to GRAPH THEORY, fifth edition. Saint-Petersburg: LLC "Dialektika", 2019. 240 p.
- [5] *Kudryavtsev DV, Begler AM, Gavrilova TA, Leshcheva IA, Kubelskiy MV, Tushkanova ON.* Method for collaborative visual creation of a knowledge graph [In Russian]. *Artificial Intelligence and Decision Making.* 2019; 1: 27-38.
- [6] *Kryukov KV, Pankova LA, Pronina VA, Suhoverov VS, Shipilina LB.* Semantic similarity measures in ontology. Review and classification [In Russian]. *CONTROL SCIENCES.* 2010; 5: 2-14.
- [7] *Tsukanova NI.* Ontological model of knowledge representation and organization [In Russian]. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2015. 272 p.
- [8] *Gavrilova TA, Khoroshevsky VF.* Knowledge bases of intelligent systems [In Russian]. Saint-Petersburg: Piter, 2020. 384 p.
- [9] *Chernyakhovskaya LR, Malahova AI.* Development of intellectual decision support models and methods based on ontology of software projects organization management [In Russian]. *Ontology of designing.* 2013; 4: 42-52.
- [10] *Levenchuk A.* Systems engineering thinking. TechInvestLab, 02.04.2015. 305 p. [systems_engineering_thinking_2015.pdf](https://techinvestlab.ru/systems_engineering_thinking_2015.pdf) (techinvestlab.ru).
- [11] *Zaouga Wiem, Arfa Rabai Latifa Ben, Alalyani Wafa Rashid.* Towards an Ontology Based-Approach for Human Resource Management // The 10th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT). April 29 – May 2, 2019. Leuven, Belgium. P. 417-424.
- [12] *Podgorelec V, Grasic B.* Implementing Innovative IT Solutions with Semantic Web Technologies // Products and Services; from R&D to Final Solutions. Nov., 2010. DOI: 10.5772/10399.
- [13] *Makarova IV, Khabibullin RG, Ushenin AM, Mikheeva SA, Karabtsev VS.* Computer in engineering education: new opportunities in training engineers for the creative economy [In Russian]. *Engineering education.* 2016; 20: 72-79.
- [14] *Asanov AZ, Myshkina IYu, Grudtsyna LYu.* Forecasting the demand for competencies when adjusting training programs using cognitive models [In Russian]. *Ontology of designing.* 2019; 9(2): 203–213. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-203-213.
- [15] *Bolotova LS.* Artificial intelligence systems: knowledge-based models and technologies [In Russian]. Moscow: Finansy I Statistika, 2012. 664 p.
- [16] *Flach P.* Machine learning. Moscow: DMK, 2015. 400 p.
- [17] KG Course 2021. <https://migalkin.github.io/kgcourse2021/>.

- [18] **Perozzi B, Al-Rfou R, Skiena S.** DeepWalk: Online learning of social representations // KDD '14: Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. August 2014. Pages 701–710. DOI: 10.1145/2623330.2623732.
 - [19] **Grover Aditya, Leskovec Jure** node2vec: Scalable Feature Learning for Networks // KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. August 2016. Pages 855–864. DOI: 10.1145/2939672.2939754.
 - [20] **Ali M, Berrendorf M, Hoyt CT, Vermue L, Galkin M, Sharifzadeh S, Fischer A, Tresp V, Lehmann J.** Bringing light into the dark: A large-scale evaluation of knowledge graph embedding models under a unified framework. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2006.13365.
 - [21] **Jean-Baptiste Lamy.** Ontologies with Python Programming OWL 2.0 Ontologies with Python and Owlready2. Apress, 2021. 270 p.
 - [22] **Yang Bishan, Yih Wen-tau, He Xiaodong, Gao Jianfeng, Deng Li.** Embedding Entities and Relations for Learning and Inference in Knowledge Bases // ICLR'15: Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations. USA. May 7-9, 2015. <https://arxiv.org/abs/1412.6575>.
-

About the authors

Askhat Zamilovich Asanov (b. 1949) graduated from Kazan State University in 1972, D. Sc. Eng. (2004), Professor. He is a Professor of the Automatic Systems Department in the Institute of Artificial Intelligence of MIREA, Russian Technological University. He is the author and a co-author of more than 250 publications in the field of system analysis, control and information processing. ORCID: 0000-0001-6724-0816; Author ID (PIHII): 263248; Author ID (Scopus): 7003438319. asanov@mirea.ru. ✉.

Irina Yurievna Myshkina (b. 1980) graduated from the Elabuga State Pedagogical Institute in 2002, Ph.D. (2018). Associate Professor of the Department of Systems Analysis and Informatics of the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University. In the list of scientific papers there are more than 30 works in the field of management in social and economic systems. ORCID: 0000-0003-4309-3350; Author ID (PIHII): 603791; Author ID (Scopus): 57189268396; Researcher ID (WoS): M-4899-2015. mirinau@mail.ru.

Larisa Yurievna Grudtsyna (b. 1980) graduated from the Elabuga State Pedagogical Institute in 2002. Senior Lecturer at the Department of System Analysis and Informatics of the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University. In the list of scientific papers there are more than 20 works in the field of management in social and economic systems. ORCID: 0000-0003-1307-6605; Author ID (PIHII): 804837; Author ID (Scopus): 57189270650; Researcher ID (WoS): M-6037-2015. larisa_u_g@mail.ru.

Received March 01, 2023. Revised June 26, 2023. Accepted June 28, 2023.



Применение онтологического подхода в задаче генерации событийных данных с помощью имитационных моделей

© 2023, А.М. Наместников

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Аннотация

Описывается применение онтологического подхода к решению задачи генерации событийных данных, поступающих из журналов имитационных экспериментов. В настоящее время в рамках научного направления «Интеллектуальный анализ процессов» развиваются методы и алгоритмы, позволяющие решать задачи машинного обучения применительно к событийным данным. Имитационное моделирование в данном случае может играть важную роль для формирования обучающих выборок. Однако экспериментальные результаты имитации в виде журналов определённой структуры необходимо приводить к виду событийных журналов так, как они понимаются в интеллектуальном анализе процессов. В данной работе приводится постановка задачи формирования онтологического ресурса, позволяющего сформировать журнал событий по результатам имитационных экспериментов с дискретно-событийной моделью, в которой заявки на обработку представлены в виде агентов. Приводится формальное описание онтологии предметной области и алгоритм её доопределения на основе данных журналов имитационной модели. В качестве объекта имитации в работе предлагается рассматривать иерархическую систему принятия решений, в которую поступают задачи различной сложности. Уровень сложности задач является определяющим для выбора уровня иерархии, на котором данную задачу требуется решать. Приводится архитектура разработанной онтологической системы, а также структура понятий с соответствующими семантическими отношениями и наборами экземпляров.

Ключевые слова: онтология, интеллектуальный анализ процессов, событийные данные, имитационная модель, агент.

Цитирование: Наместников А.М. Применение онтологического подхода в задаче генерации событийных данных с помощью имитационных моделей // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №2(48). С.243-253. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-243-253.

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания №075-00233-20-05 по проекту «Исследование интеллектуального предиктивного мультимодального анализа больших данных и извлечения знаний из разных источников»

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Интеллектуальный анализ процессов (ИАП) является относительно новой областью исследования, которая находится на пересечении вычислительного интеллекта, интеллектуального анализа данных, моделирования и анализа процессов [1, 2]. Интеллектуальный анализ процессов предназначен для решения задач извлечения, мониторинга и усовершенствования реальных процессов. В последнее время растущий интерес исследователей к задачам ИАП привёл к созданию рабочей группы [2].

Журналы событий имитационных моделей (ИМ) сложных систем могут содержать важную информацию для последующего анализа их поведения. Результаты анализа событийных данных позволяют выполнять постоянный мониторинг отклонений в работе реальных систем, извлекая необходимую информацию из журналов событий ИМ и сравнивая её с модельным поведением.

Методы ИАП должны иметь доступ к последовательности событий, записанных в журнале. Каждое событие относится к определённому действию и является частью экземпляра процесса. Допускается, что журналы событий могут содержать дополнительную информацию о возникающих в системе событиях. Для этого используются дополнительные атрибуты событий, например, такие как ресурс или временная отметка.

Для систем имитационного моделирования особую важность приобретают следующие ракурсы ИАП.

- Ракурс потока управления нацелен на демонстрацию структуры выполнения действий и их порядок. Его цель заключается в получении описания и характеристик всех используемых путей выполнения процесса.
- Организационный ракурс применяется для представления информации об используемых ресурсах, зафиксированных в журнале событий (например, люди, системы, организационные структуры и то, как они взаимосвязаны друг с другом).
- Временной ракурс непосредственно связан с показателями времени и частоты событий. В том случае, когда у события имеются временные метки, записанные в журнале, появляется возможность анализировать «узкие места», эффективность использования ресурсов и прогнозировать оставшееся время обработки.

Имитационное моделирование является очевидным подходом для генерации событийных данных, однако его непосредственное применение для указанных задач является затруднительным. Основная сложность заключается в существенном отличии представления событийных данных в ИМ и в ИАП. Требуется выполнить трансформацию событийных данных из контекста имитационного моделирования (где используются понятия агента, сообщения, состояния, функционального блока модели) в контекст ИАП (включающего понятия экземпляра процесса, действия, события, ресурса и т.д.).

С точки зрения задач анализа ИМ прикладная онтология, как средство представления знаний, может найти применение для решения следующих задач [3, 4].

- Системный анализ предметной области (ПрО) функционирования сложных систем. Онтологические ресурсы предоставляют частично формализованный и структурированный базис для выполнения системного анализа ПрО.
- Интегрирование данных и знаний. В процессе семантического анализа журналов событий функциональных подсистем прикладная онтология способна устанавливать семантическую эквивалентность тождественных событий, действий и дополнительных атрибутов, которые, как правило, представляются с использованием различных терминов.

В работе рассмотрена формальная модель онтологии событийных данных и её применение для формирования журнала событий в иерархической системе обработки заявок различной сложности.

1 Онтологическая модель событийных данных

Онтология событийных данных, генерируемых ИМ, включает в себя следующие компоненты:

$$O_D = \langle C_D, R_D, F_D, I_D \rangle, \quad (1)$$

где C_D – множество понятий ПрО, R_D – множество семантических отношений онтологии, F_D – множество функций интерпретации, позволяющее формировать новые факты базы знаний, I_D – множество экземпляров (индивидов), относящиеся к понятиям онтологии.

Множество понятий C_D включает три компоненты знаний о терминологии ПрО моделирования и анализа иерархических систем:

$$C_D = \{C_D^{St}, C_D^{Ms}, C_D^{Im}, C_D^{Pm}\}, \quad (2)$$

где C_D^{St} – множество понятий диаграмм состояний ИМ; C_D^{Ms} – множество понятий, включаемых в процессы обмена сообщениями между агентами модели; C_D^{Im} – множество понятий, описывающих структурные элементы ИМ; C_D^{Pm} – множество понятий, представляющих структурные особенности журнала событий в контексте ИАП.

Аналогичным образом определяются множества семантических отношений $R_D = \{R_D^{St}, R_D^{Ms}, R_D^{Im}, R_D^{Pm}\}$ и множество функций интерпретации $F_D = \{F_D^{St}, F_D^{Ms}, F_D^{Im}, F_D^{Pm}\}$.

Место онтологии событийных данных представлено на рисунке 1. В контексте ИАП журнал событий формируется на основе трёх видов журналов имитационного моделирования: обмена сообщениями; состояний агентов; прохождения агентов по ИМ.

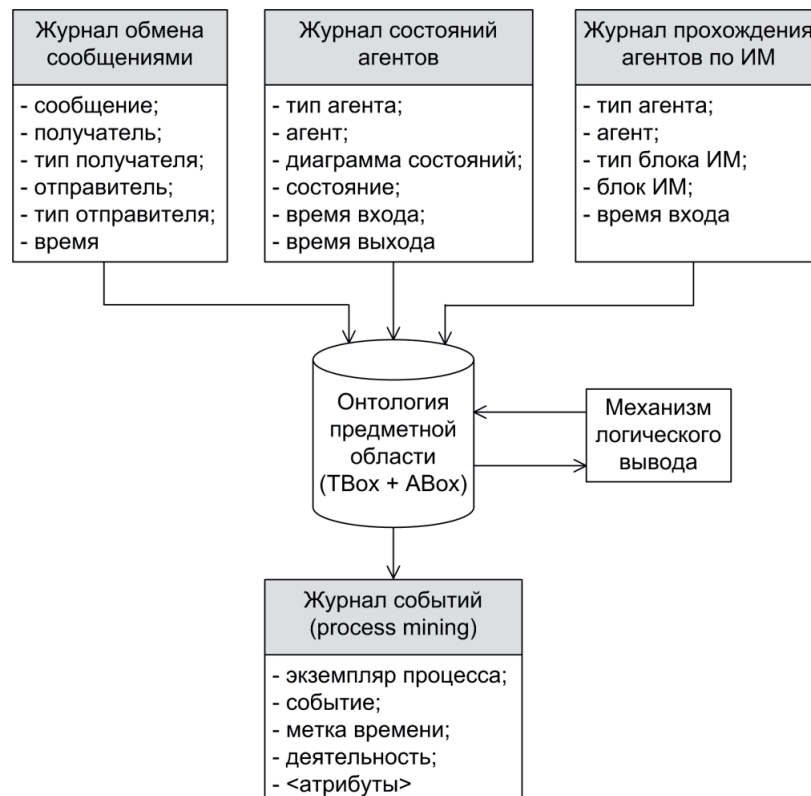


Рисунок 1 – Место онтологии событийных данных в процессе формирования журнала событий

Перечисленные виды журналов генерируются по результатам прогонов ИМ. Основной состав атрибутов каждого журнала представлен на рисунке 1. В журнале обмена сообщениями содержится информация о времени возникновения сообщений в модели и об агентах, которые отправляют и принимают различного вида сообщения. Журнал состояний агентов содержит информацию о динамике поведения агентов с привязкой к временным отметкам, которые представляют время вхождения агентов в определённое состояние и время выхода из состояния. Журнал прохождения агентов по ИМ содержит данные о том, какие агенты поступают в элементы ИМ с привязкой ко времени.

Таким образом, в рамках данной статьи рассматривается комбинированный подход к построению ИМ, который подразумевает использование принципов агентного моделирования и дискретно-событийного моделирования.

Онтология ПрО состоит из двух компонент: *TBox* и *ABox* (множества логических утверждений о терминах и множества фактов, соответственно). Механизм логического вывода позволяет генерировать новые факты, которые позволяют формировать журнал событий так, как он представляется в задачах ИАП. Состав журнала событий включает информацию об

экземпляре процесса. Под процессом понимается конкретная реализация процесса обработки задачи в иерархической системе. Идентификатор события определяет уникальный номер строки журнала событий. Метка времени является обязательной для процедуры упорядочивания событий. Деятельность представляет собой функцию преобразования данных в процессе обработки задачи. Дополнительно журнал событий может включать атрибуты, которые представляют информацию о субъектах деятельности, стоимости или других параметрах, которые относятся к конкретному событию.

На рисунке 2 представлена структура онтологии событийных данных, используемая для формирования журнала событий. Множество понятий включает в себя два подмножества:

$$C_D = C_D^{fix} \cup C_D^{gen},$$

где C_D^{fix} – множество понятий ПрО, которое формируется экспертным способом и является инвариантным относительно конкретной ИМ; C_D^{gen} – генерируемое множество понятий ПрО на основе содержимого событийных журналов конкретной ИМ.

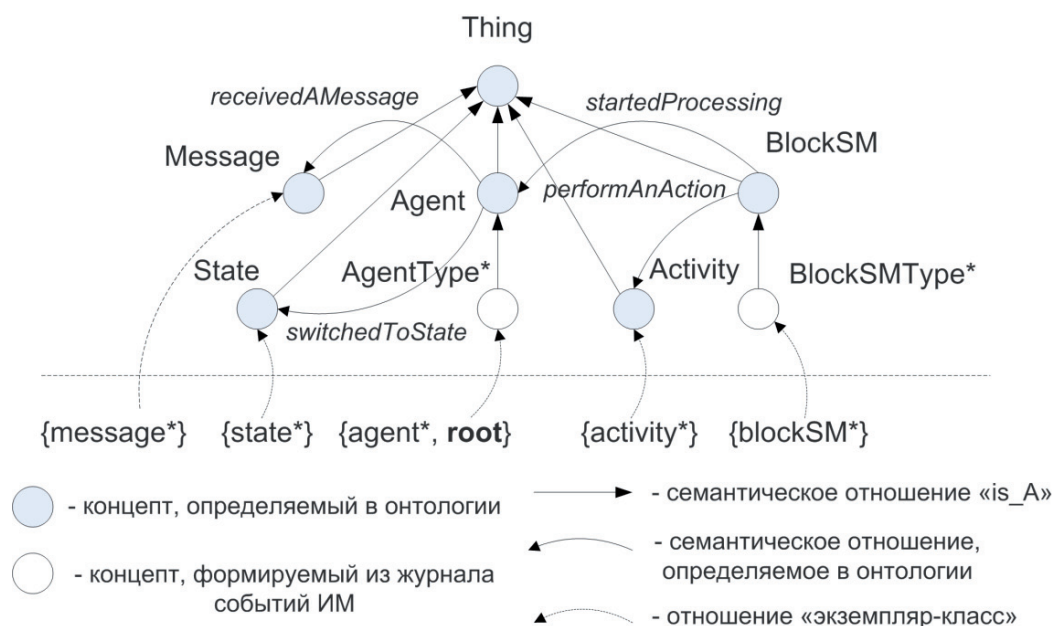


Рисунок 2 – Структура онтологии событийных данных

Обозначение класса с символом (*) поясняет факт наличия нескольких классов, количество которых заранее неизвестно. На рисунке 2 такими понятиями являются $AgentType^*$ и $BlockSMType^*$. Индивиды понятий онтологии ПрО на рисунке представлены с помощью множеств $\{message^*\}$, $\{state^*\}$, $\{agent^*, root\}$, $\{activity^*\}$ и $\{blockSM^*\}$. Здесь индивид $root$ выделен среди остальных индивидов как предопределённый (т.е. он присутствует в каждой ИМ в любом случае). Концепт «Агент» имеет вид:

$$Agent \equiv T \sqcap \exists receivedMessage.Message \sqcap \exists switchedToState.State,$$

где $receivedMessage$ и $switchedToState$ – наименование ролей «получено сообщение» и «перешёл в состояние», соответственно; $Message$ – домен типа «Сообщение», $State$ – домен типа «Состояние».

Концепт «Блок ИМ» имеет вид логического выражения онтологии:

$$BlockSM \equiv T \sqcap \exists startedProcessing.Agent \sqcap \exists performAnAction.Activity,$$

где $startedProcessing$ и $performAnAction$ – наименование ролей «начата обработка» и «выполнение действия», соответственно; $Agent$ – домен типа «Агент», $Activity$ – домен типа «Действие».

2 Алгоритм онтологического формирования журнала событий

Для генерации журнала событий необходимо выполнить логический вывод по онтологии. Существует несколько причин, по которым такая процедура должна иметь место.

- Все экземпляры процессов, которые подвергаются анализу, должны быть полностью завершёнными. Для этого определяется отдельный класс онтологии *CompleteAgent*, который является подклассом понятия *Agent* и содержит только те экземпляры (конкретные агенты, появляющиеся в ИМ), которые получили начальное и конечное сообщения:

$$\begin{aligned} \text{CompleteAgent} \equiv \\ \text{Agent} \sqcap \exists \text{receivedMessage}.\text{StartMessage} \sqcap \\ \exists \text{receivedMessage}.\text{FinalMessage}, \end{aligned}$$

где *StartMessage* – подкласс понятия *Message*, который содержит сообщения, инициирующие создание агента, *FinalMessage* – подкласс понятия *Message*, который содержит сообщения, относящиеся к моменту удаления агента из ИМ.

Рассматривая агентов с полным жизненным циклом, имеется возможность учитывать только те фрагменты журнала обмена сообщениями, которые описывают полные экземпляры процессов.

- Не все блоки ИМ (экземпляры класса *BlockSM*) имеют отношение к моделированию пользовательских действий по обработке заданий. Некоторые из блоков носят исключительно системный характер, и соответствующие действия модели не должны быть включены в процедуру анализа поведения системы. Для исключений действий системных блоков ИМ создан класс онтологии *SystemActivity*, который является подклассом понятия *Activity* и содержит только те действия, которые выполняют системную функцию в ИМ (которые в последующем анализе не включены в поведенческую модель процесса):

$$\text{SystemActivity} \equiv \text{Activity} \sqcap \forall \text{performedBy}.\text{SystemBlockSM},$$

где свойство *performedBy* является обратным свойством для *performAnAction*, концепт *SystemBlockSM* – подкласс концепта *BlockSM*. В данном случае используется универсальное ограничение на класс онтологии.

Алгоритм онтологического формирования журнала событий включает следующие шаги.

Шаг 1. Доопределение множества понятий онтологии (1) C_D^{fix} понятиями C_D^{gen} . Для этого необходимая информация извлекается из журнала обмена сообщениями, журнала состояний агентов и журнала прохождения агентов по ИМ.

Шаг 2. Доопределение онтологии фактической информацией. На данном шаге каждое событие из журналов, анализируемых на предыдущем шаге, преобразуется в факты вида:

$$\text{instance:Class} \text{ и } < \text{instance1}, \text{instance2} >:\text{Relation}.$$

Таким образом, множество понятий $C_D = C_D^{fix} \cup C_D^{gen}$ с соответствующими семантическими отношениями и функциями интерпретации, а также содержимое базы фактов *ABox*, сформированное на данном шаге, определяют то содержимое онтологии, которое необходимо для выполнения логического вывода.

Шаг 3. Выполнение логического вывода по базе знаний (*TBox* $\cup$ *ABox*) с целью формирования класса событий, которые являются инициаторами деятельности, входящих в состав событий, как экземпляров соответствующего журнала.

Шаг 4. Восстановление структуры $< \text{instance}, \text{event}, \text{timestamp}, \text{activity} >$ как кортежа журнала событий для последующего анализа.

3 Реализация системы генерации событийных данных

3.1 Архитектура системы

Архитектура системы генерации событийных данных приведена на рисунке 3 и включает подсистемы онтологического моделирования и генерации журнала событий.



Рисунок 3 – Архитектура системы генерации событийных данных

В основе подсистемы онтологического моделирования находятся: библиотека *OWLReady 2*, *RDF*-хранилище, реализованное с помощью *SQL*-базы данных *SQLite 3*, механизм логического вывода *HermiT*. Среда выполнения *OWLReady 2* позволяет оперировать классами (понятиями) онтологии, экземплярами (индивидами) и свойствами. Указанные структуры сохраняются в *RDF*-хранилище [5-7]. Реализация данной подсистемы позволяет выполнять сохранение онтологии в формате *RDF/XML* [8] с последующей загрузкой в редактор *Protege*. Выполнение логического вывода возможно как непосредственно в среде *OWLReady*, так и средствами онтологического редактора.

Задачей подсистемы онтологического моделирования является формирование семантической модели ПрО, которая определяет ограничения для генерации журнала событий.

Подсистема генерации журнала событий состоит из двух основных модулей: анализа ограничений и формирования событийной структуры.

Модуль анализа ограничений взаимодействует с онтологией ПрО с целью определения классов-ограничений. Их содержимое позволяет определить перечень агентов ИМ, который имеют полный жизненный цикл и, следовательно, могут использоваться в генерации журнала событий. Кроме того, формируются ограничения на действия, выполняемые в процессе прогона ИМ. Содержимое журналов ИМ позволяет выполнить доопределение онтологии ПрО необходимыми классами (понятиями) и экземплярами классов (индивидами).

Модуль анализа ограничений возвращает список агентов ИМ для передачи его в модуль формирования событийной структуры. Входами для данного модуля являются список агентов, список системных действий и журналы ИМ.

3.2 Иллюстративный пример задачи моделирования

В качестве примера системы, поведение которой представляется в виде журнала событий так, как он понимается в ИАП, рассмотрена иерархическая система обработки задач. Для каждой задачи определяется её сложность, которая влияет на то, на каком уровне иерархии системы она будет решаться. Чем сложнее задача, тем выше по иерархии располагается уровень её решения (рисунок 4). С фоновым заполнением обозначены те узлы иерархической системы, которые принимают участие в решении конкретной задачи. Утолщёнными рёбрами между узлами определён путь прохождения задачи.

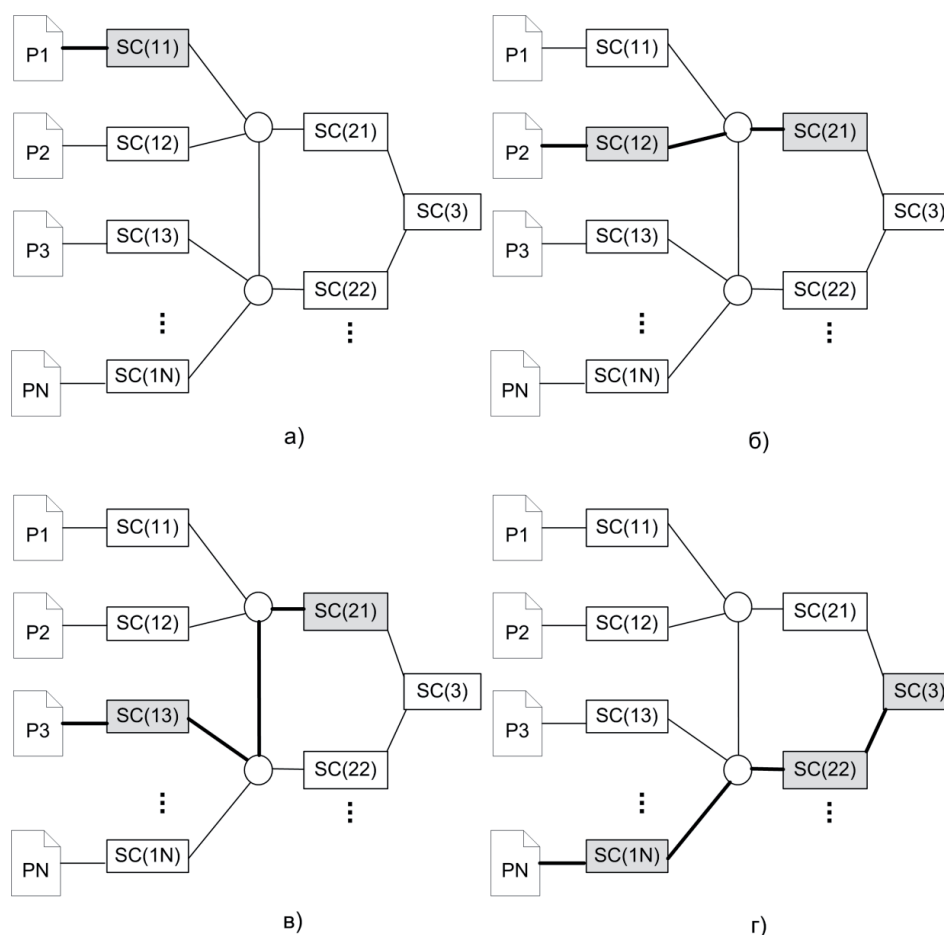


Рисунок 4 – Иллюстративный пример иерархической системы обработки задач

На рисунке 4а представлена самая простая ситуация, когда задача невысокой сложности (P1) решается на первом уровне принятия решения SC(11). Рисунок 4б соответствует ситуа-

ции с более сложной задачей (P2), для решения которой требуется прохождение узлов на первом уровне SC(12) и на втором уровне SC(21).

Построенная ИМ учитывает, что узлы иерархической системы могут находиться в нерабочем состоянии (в модели для этих целей используются стохастические параметры выхода из строя узлов системы). Рисунок 4в иллюстрирует такую ситуацию. Задача (P3) является сложной и требует своего решения на втором уровне. Узел SC(22) является недоступным и система моделирования передаёт задачу (P3) на узел SC(21). Наконец, на рисунке 4г представлен иллюстративный пример решения задачи повышенной сложности (PN), где задействованы все уровни принятия решения.

3.3 Реализация онтологии событийных данных

Онтология событийных данных формируется в два этапа: сначала создаётся «каркас» онтологии из понятий верхнего уровня, инвариантных относительно реализуемых ИМ; после имитации на основе журналов доопределяются остальные понятия и индивиды онтологии. На рисунке 5 представлен пример сформированной онтологии после её автоматического доопределения из журналов имитации иерархической системы решения задачи.

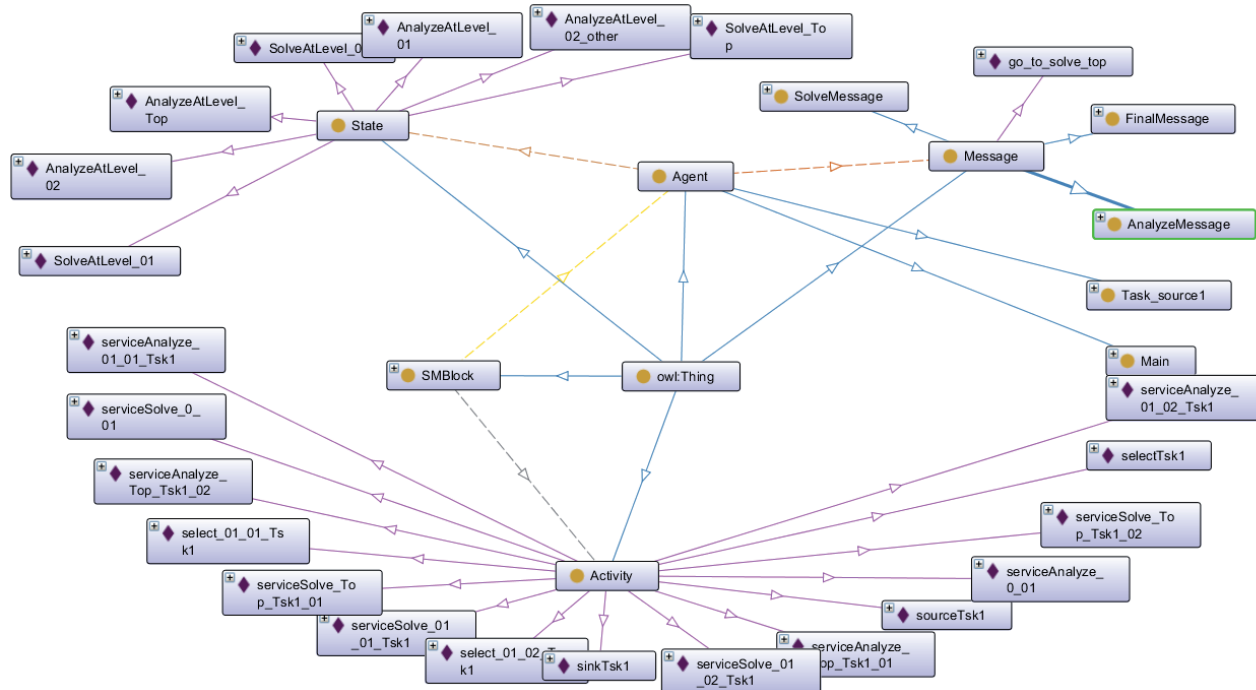


Рисунок 5 – Состояние онтологии событийных данных после её автоматического доопределения

3.4 Вычислительный эксперимент формирования журнала событий

Формирование журнала событий на основе журналов ИМ иерархической системы обработки задач иллюстрирует пример, который представлен на рисунке 4. Был выполнен прогон ИМ в среде *AnyLogic PLE*. Таблица 1 содержит подмножество строк журнала обмена сообщениями, соответствующее нескольким вариантам решения задачи. Каждая задача в ИМ представляется в виде агента (см. таблицы 2 и 3). В таблице 1 содержатся данные о получателе сообщений (*recipient*), который относится к определённому классу (*recipient_type*). Известно сообщение (*message*) и время, когда оно было получено агентом (*date*). Следует отметить, что идентификатор агента не изменяется в процессе нахождения решения задачи и является идентификатором экземпляра процесса.

Таблица 1 – Фрагмент журнала обмена сообщениями

Message	Recipient	Recipient Type	Sender	Date
back_to_level_01	<population>[7] : 3477	Task_source1	root	08.02.2023 0:05:37
finish_processing	<population>[7] : 3477	Task_source1	root	08.02.2023 0:07:30
next_level_02	<population>[7] : 3478	Task_source1	root	08.02.2023 0:14:29
back_to_level_02	<population>[7] : 3478	Task_source1	root	08.02.2023 0:21:26
next_level_02	<population>[8] : 3479	Task_source1	root	08.02.2023 0:21:56
back_to_level_01	<population>[9] : 3480	Task_source1	root	08.02.2023 0:24:30
back_to_level_01	<population>[7] : 3478	Task_source1	root	08.02.2023 0:26:02
finish_processing	<population>[9] : 3480	Task_source1	root	08.02.2023 0:26:12

Таблица 2 – Фрагмент журнала состояний агентов

Agent Type	Agent	State	Entry Date	Exit Date
Task_source1	<population>[10] : 3481	AnalyzeAtLevel_01	08.02.2023 0:25	08.02.2023 0:29
Task_source1	<population>[10] : 3481	AnalyzeAtLevel_02	08.02.2023 0:29	08.02.2023 3:15
Task_source1	<population>[10] : 3487	AnalyzeAtLevel_01	08.02.2023 1:07	08.02.2023 1:10
Task_source1	<population>[10] : 3487	AnalyzeAtLevel_02	08.02.2023 1:10	08.02.2023 1:19
Task_source1	<population>[10] : 3487	AnalyzeAtLevel_Top	08.02.2023 1:19	08.02.2023 1:24
Task_source1	<population>[10] : 3487	SolveAtLevel_Top	08.02.2023 1:24	08.02.2023 1:26

Таблица 3 – Фрагмент журнала прохождения агентов по ИМ

Agent Type	Agent	Block Type	Block	Entry Date
Task_source1	<population>[7] : 3477	Source	sourceTsk1	08.02.2023 0:01
Task_source1	<population>[7] : 3477	Service	serviceAnalyze_0_01	08.02.2023 0:01
Task_source1	<population>[7] : 3477	SelectOutput5	selectTsk1	08.02.2023 0:05
Task_source1	<population>[7] : 3477	Service	serviceSolve_0_01	08.02.2023 0:05
Task_source1	<population>[7] : 3477	Sink	sinkTsk1	08.02.2023 0:07

Фрагмент созданного журнала событий, сформированного из представленных журналов с учётом ограничений, которые зафиксированы в онтологии, приведён в таблице 4. Здесь атрибуты *Case_id*, *Activity*, *Timestamp* – обязательные компоненты журнала событий. Кроме того, могут присутствовать дополнительные атрибуты (*Difficulty_level*), характеризующие экземпляр в целом или отдельное действие.

Таблица 4 – Фрагмент созданного журнала событий

Case_id	Activity	Timestamp	Difficulty_level	...
<population>[10] : 3487	AnalyzeAtLevel_01	08.02.2023 1:07	0.85	
	AnalyzeAtLevel_02	08.02.2023 1:10	0.85	
	AnalyzeAtLevel_Top	08.02.2023 1:19	0.85	
	SolveAtLevel_Top	08.02.2023 1:24	0.85	

Заключение

Предложен онтологический подход к генерации событийных данных на основе имитационного моделирования так, как они представляются в ИАП. Новизна полученных результатов заключается в применении онтологического анализа в переходе от контекста ИМ к контексту ИАП.

Рассмотрен способ применения данного подхода в моделировании иерархической системы решения задач. Показана архитектура программной системы генерации событийных данных, содержимое онтологического ресурса и генерируемый фрагмент журнала событийных данных применительно к решаемой задаче.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] *W. van der Aalst*. Process Mining – Data Science in Action. Second Edition. Springer. 2016.
- [2] *Van der Aalst, W., Adriansyah, A., De Medeiros, A.K.A., Arcieri, F., Baier, T., Blickle, T., Bose, J.C., Van Den Brand, P., Brandtjen, R., Buijs, J.*, et al.: Process mining manifesto. In: International Conference on Business Process Management. Springer (2011). P.169-194.
- [3] *Загоруйко Н.Г., Налетов А.М., Соколова А.А., Чурикова В.А.* Формирование базы лексических функций и других отношений для онтологии предметной области // Труды международной конференции Диалог-2004. М.: Наука, 2004. С.202–204.
- [4] *Гуськов Г.Ю., Наместников А.М., Романов А.А., Филиппов А.А.* Формирование базы знаний для поддержки процесса архитектурного проектирования программных систем // Онтология проектирования. 2021. Т.11, №2(40). С.154-169. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-2-154-169.
- [5] *David Beckett*. The Design and Implementation of the Redland RDF Application Framework. In Proceedings of Semantic Web Workshop of the 10th International World Wide Web Conference, Hong-Kong, China, May 2001.
- [6] *Bertails A., Arenas M., Prud'hommeaux E., Sequeda J.*, Editors. A Direct Mapping of Relational Data to RDF – <http://www.w3.org/TR/rdb-direct-mapping/>
- [7] *D. Brickley and R.V. Guha*. Resource Description Framework (RDF) Schema Specification 1.0. Candidate recommendation, World Wide Web Consortium, March 2000. See <http://www.w3.org/TR/2000/CR-rdf-schema-20000327>.
- [8] *Patrick Hayes*. RDF Model Theory. Working draft, World Wide Web Consortium, September 2001. See <http://www.w3.org/TR/rdf-mt/>.

Сведения об авторе

Наместников Алексей Михайлович, 1974 г. рождения. Окончил Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ) в 1996 г., д.т.н. (2018). Профессор кафедры «Информационные системы» УлГТУ. В списке научных трудов более 100 работ в области САПР и прикладных систем искусственного интеллекта. Author ID (RSCI): 392690; Author ID (Scopus): 9277806100. am.namestnikov@gmail.com.



Поступила в редакцию 10.04.2023, после рецензирования 19.05.2023. Принята к публикации 25.05.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-243-253

Application of the ontological approach in the problem of event data generation using simulation models

© 2023, A.M. Namestnikov

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Abstract

The article describes an application of the ontological approach to solving the problem of generating event data coming from the logs of simulation experiments. Currently, as part of the scientific direction Intelligent analysis of processes, methods and algorithms are being developed that allow solving machine learning problems in relation to event data. Simulation modeling can play an important role in the formation of training samples. However the experimental results of simulation in the form of logs of a certain structure must be brought to the form of event logs as they are understood in the intellectual analysis of processes. This paper provides a statement of the problem for forming an ontological resource that makes it possible to generate an event log based on the results of simulation experiments with a discrete-event model in which requests for processing are presented in the form of agents. A formal description of the domain ontology and an algorithm for its redefinition based on the log data of the simulation model are given. As an object of simulation the paper proposes to consider a hierarchical decision-making system, which receives tasks of varying complexity. The level of complexity of tasks is used for choosing the level of hierarchy at which this task needs to be

solved. The architecture of the developed ontological system is given, as well as the structure of concepts with the corresponding semantic relations and sets of instances.

Keywords: *ontology, intellectual process analysis, process mining, event data, simulation model, agent.*

For citation: *Namestnikov AM.* Application of the ontological approach in the problem of event data generation using simulation models [In Russian]. *Ontology of designing.* 2023; 13(2): 243-253. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-243-253.

Financial Support: This work was supported Ministry of Education and Science of Russia in framework of project № 075-00233-20-05 from 03.11.2020 «Research of intelligent predictive multimodal analysis of big data, and the extraction of knowledge from different sources».

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

List of figures and tables

Figure 1 – The place of the event data ontology in the process of generating an event log

Figure 2 – The event data ontology structure

Figure 3 – The architecture for the event data generation system

Figure 4 – An illustrative example of a hierarchical task processing system

Figure 5 – The state of the event data ontology after its automatic redefinition

Table 1 – A messaging log fragment

Table 2 – An agent state log fragment

Table 3 – A Fragment of the log of passing agents through the simulation model

Table 4 – A Fragment of the generated event log

References

- [1] *W. van der Aalst.* Process Mining – Data Science in Action. Second Edition. Springer. 2016.
- [2] *Van der Aalst, W., Adriansyah A, De Medeiros AKA, Arcieri F, Baier T, Blickle T, Bose JC, Van Den Brand P, Brandtjen R, Buijs J,* et al.: Process mining manifesto. In: International Conference on Business Process Management. p.169-194. Springer (2011).
- [3] *Zagoroyko NG, Naletov AM, Sokolova AA, Churikova VA.* A Formation of the lexical functions base and other relations for the ontology of the subject area [In Russian]. Proceedings of the Conference “Dialog-2004”. M.: Science, 2004. 202–204 p.
- [4] *Guskov GY, Namestnikov AM, Romanov AA, Filippov AA.* Formation of a knowledge base to support the architecting process of software systems [In Russian]. *Ontology of designing.* 2021; 11(2): 154-169. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-2-154-169.
- [5] *David Beckett.* The Design and Implementation of the Redland RDF Application Framework. In Proceedings of Semantic Web Workshop of the 10th International World Wide Web Conference, Hong-Kong, China, May 2001.
- [6] *Bertails A, Arenas M, Prud'hommeaux E, Sequeda J.* Editors. A Direct Mapping of Relational Data to RDF – <http://www.w3.org/TR/rdb-direct-mapping/>
- [7] *Brickley D, Guha RV.* Resource Description Framework (RDF) Schema Specification 1.0. Candidate recommendation, World Wide Web Consortium, March 2000. See <http://www.w3.org/TR/2000/CR-rdf-schema-20000327>.
- [8] Patrick Hayes. RDF Model Theory. Working draft, World Wide Web Consortium, September 2001. See <http://www.w3.org/TR/rdf-mt/>.

About the author

Alexey Mikhailovich Namestnikov (b. 1974) graduated from the Ulyanovsk State Technical University (Ulyanovsk, Russian Federation) in 1996, Doctor of science (2018). He is a professor at the Department of Information systems. He is a co-author of about 100 scientific articles and abstracts in the field of CAD and applied AI. Author ID (RSCI): 392690; Author ID (Scopus): 9277806100. am.namestnikov@gmail.com. ✉.

Received April 10, 2023. Revised May 19, 2023. Accepted May 25, 2023.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 681.3

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-254-273



Методы и средства сопряжённого взаимодействия автономных интеллектуальных систем распределённого управления ресурсами предприятия

© 2023, В.Б. Ларюхин^{1,2}

¹ Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

² ООО «Научно-производственная компания «Мультиагентные технологии», Самара, Россия

Аннотация

Анализируется проблема многоуровневого управления ресурсами крупных предприятий и связанные с ней ограничения каскадного подхода, реализуемого в современных автоматизированных системах управления. Отмечается, что каскадный подход приводит к задержкам в процессах управления, росту сложности управления и значительным расхождениям между планами на разных уровнях управления, срывам сроков и выходу за бюджеты заказов. Предлагается распределённый подход, который предполагает создание автономных интеллектуальных систем управления ресурсами подразделений, формирующих стратегические планы и ведущих оперативное управление; сетевое сопряжённое взаимодействие указанных систем для согласования и синхронизации планов по событиям, поступающим в реальном времени. Разработан метод создания распределённых автономных систем управления ресурсами предприятий. Показана возможность реализации подхода в рамках цифровой экосистемы на базе сетецентрической платформы с вертикально-горизонтальными взаимодействиями указанных систем. Представлены результаты разработки и внедрения подхода на промышленных предприятиях по проектированию, производству и эксплуатации высокотехнологической продукции, требующей раздельного позаказного планирования и учёта. Обсуждаются перспективы развития подхода для формирования цифровых двойников отраслевых цепочек кооперации предприятий.

Ключевые слова: многоуровневые системы, распределённый подход, стратегическое планирование, оперативное управление, сетецентрическая платформа, автономные интеллектуальные системы, цифровые двойники, управление проектами, управление производством.

Цитирование: Ларюхин В.Б. Методы и средства сопряжённого взаимодействия автономных интеллектуальных систем распределённого управления ресурсами предприятия // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №2(48). С.254-273. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-254-273.

Благодарности: автор выражает благодарность Сергею Ивановичу Шляеву за помощь в разработке методологии управления проектами по гособоронзаказу и поддержку внедрения разработанной интеллектуальной системы управления проектами в МАК «Вымпел».

Финансирование: статья подготовлена при грантовой поддержке РФФИ по конкурсу «Аспирант», 20-37-90052 «Разработка моделей, методов и алгоритмов построения экосистем умных сервисов «дополненного интеллекта» для адаптивного планирования, оптимизации и контроля использования ресурсов производственных предприятий».

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Управление крупными предприятиями по разработке, производству и эксплуатации сложных высокотехнологических изделий (ВТИ), таких как локомотивы, самолёты или кос-

мические аппараты (КА) и их системы, встречается в последнее время ряд новых вызовов. Прежде всего, это растущая сложность, неопределённость и динамика изменений спроса и предложений, требующие оперативности и гибкости в реакции предприятий на изменения на рынке, в т.ч. обусловленные санкциями, стремлением к импортозамещению и т.д.

Традиционный ответ управленцев на сложность и неопределённость – это задержка в реакции на события, дополнительный приём на работу менеджеров и другие меры, которые повышают расходы и снижают эффективность, конкурентоспособность и устойчивость развития предприятий. При этом многие известные продукты таких компаний, как *SAP, IBM, Oracle, Microsoft*, 1С и ряд других, ориентированы в первую очередь на решение задач учёта и работу в стабильных условиях, а потому не имеют возможностей для поддержки принятия решений в новых условиях. Поэтому нужны принципиально новые решения.

Ранее было предложено создание интеллектуальных систем управления ресурсами (ИСУР) предприятий, позволяющих автоматизировать рутинную работу менеджеров в задачах управления, связанную с ежедневным распределением, планированием, оптимизацией, мониторингом и контролем ресурсов [1-5]. Развитие автономности ИСУР в принятии решений ведёт к формированию нового класса цифровых двойников (ЦД) предприятий, построенных как автономные интеллектуальные системы (АИС), сочетающие планирование ресурсов предприятия и его моделирование с мониторингом и контролем каждого сотрудника и каждой задачи или операции, что позволяет автоматически адаптивно перестраивать планы в реальном времени. Созданные ИСУР охватывают сравнительно малые масштабы применения, например, управление проектами в подразделения корпорации на 50 инженеров, парк грузовиков в 500 машин [6], один цех крупного предприятия на 150 рабочих [7], группировка из 15 малых КА [8] и т.д. Расширение ИСУР на больший масштаб (например, для конструкторского бюро с 20 научными центрами по 250 человек или для завода с 30 цехами по 300 рабочих, построения отраслевых ЦД в цепочках кооперации предприятий для целых отраслей промышленности) становится возможным путём перехода от одиночных ИСУР к распределённым АИС для управления ресурсами предприятий, построенным как цифровые экосистемы на базе сетцентрической платформы для поддержки взаимодействия между АИС подразделений крупного предприятия.

Предлагаемый подход должен позволять создавать как отдельные АИС подразделений одного предприятия (отдела, цеха или участка), так и АИС предприятий в целом, взаимодействующих между собой в рамках цепочек кооперации, с перспективой создания ЦД отраслей промышленности.

1 Задача управления ресурсами предприятий

Для выявления новых задач и требований к ИСУР предприятий был проведён ряд обследований предприятий, работающих на основных этапах жизненного цикла (ЖЦ) ВТИ (см. таблицу 1¹). На примере рассмотренных областей деятельности построена типовая структура предприятия, ведущего проекты по государственным контрактам и государственным оборонным заказам (ГКиГОЗ), где ключевые роли играют главные конструкторы (ГлК на рисунке 1).

Новые проекты НИОКР разбиваются на этапы и декомпозируются на отдельные задачи с заданными трудоёмкостями, которые распределяются между основными и обслуживающими подразделениями и доводятся до уровня работников. Возникающие конфликты разрешаются

¹ Принятые сокращения в таблице 1: НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы; РКК - ракетно-космическая корпорация; РКТ – ракетно-космическая техника; МАК - Межгосударственная акционерная корпорация; ПАО – публичное акционерное общество; «ИАЗ» - Иркутский авиационный завод; ИТ- информационные технологии.

путём переговоров и взаимных уступок, т.к. различные заказы конкурируют между собой в распределении ресурсов.

Таблица 1 - Предприятия, выбранные для анализа процессов управления и применяемых СУР

Вид задачи управления	Выбранное предприятие	Особенности проводимой деятельности
Управление группой конструкторских подразделений при разработке сложных технических изделий (Управление ресурсами в НИОКР)	РКК «Энергия» (Королев) – создание и эксплуатация изделий РКТ МАК «Вымпел» (Москва) – создание специальных систем	Реализуются проекты НИОКР с высокой неопределённостью и сложностью, взаимозависимостью задач и их трудоёмкостью. В одном проекте участвует ряд подразделений, а также соисполнители. Необходимо маневрировать ресурсами, т.к. в одном подразделении одновременно выполняется большое число проектов
Управление группой цехов предприятия при выпуске сложных изделий	ПАО «ИАЗ» (Иркутск) – сборка самолетов МС-21	Процесс: поточная линия сборки из 5 цехов, включая сборку агрегатов и конечного изделия. Высокая зависимость от внешних факторов. Необходима синхронизация стратегических (годы), сквозных (кварталы) и оперативных (сутки) планов для гармонизации планов
Управление ИТ-инфраструктурой Центра управления полетами КА	ЦУП-ЦНИИМАШ – управление эксплуатацией КА	Каждый КА – сложное изделие, эксплуатация которого требует развитой ИТ-инфраструктуры. При этом целевое применение инфраструктуры (работы с КА на орбите) должно включать сервисное обслуживание
Управление техникой точного земледелия для производства пшеницы и других культур	Агрогруппа хозяйств «Рассвет», «Богородицкое» и «Кирова» (Ростовская область)	Техника точного земледелия – крайне дорогая в использовании, требуется её оперативное распределение между хозяйствами с учётом изменяющихся погодных условий
Управление группой производственных предприятий при реализации комплексных проектов	Предприятия электротехнической промышленности	Для реализации комплексных проектов предприятия объединяются в кооперационные цепочки. Планы имеют высокую степень неопределённости и динамики с учётом ситуации на предприятиях

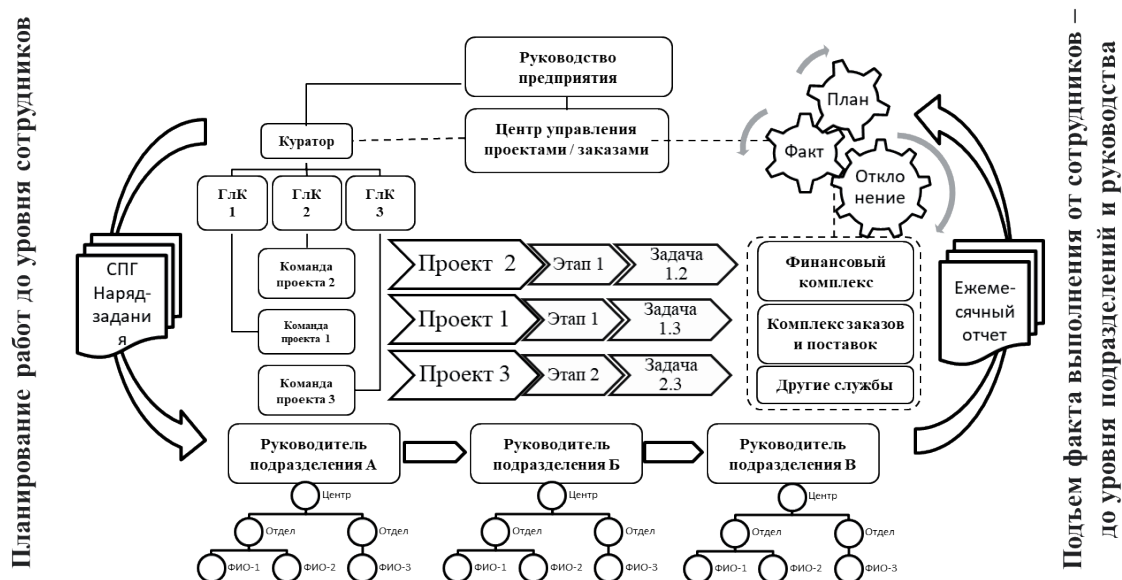


Рисунок 1 - Типовая структура и модель деятельности предприятия в проектах НИОКР ВТИ

Построенный в ходе таких переговоров и многократно перестроенный производственный план принимается руководством предприятия к действию. По итогу выполнения работ в

подразделении результаты докладываются раз в месяц руководителю проекта. Эти сведения используются для мониторинга и контроля, а также выявления и решения проблем на более высоком уровне управления. Невыработанные запланированные трудоёмкости свидетельствуют о возникновении проблем, которые требуют принятия решений по ресурсам: перераспределения задач между подразделениями, вовлечения большего числа или более компетентных работников для усиления команды проекта, пересогласования с заказчиком сроков сдачи проекта или изменения бюджета проекта и т.д.

Важнейшей особенностью планирования проектов НИОКР является увязка всех работ и ресурсов с составом ВТИ, что обычно не учитывается в существующих *ERP* и *MES* системах. В ходе проведённого исследования были разработаны формализованные схемы организации процессов управления ресурсами предприятий, ведущих работы по ГКиГОЗ. Фрагмент такой схемы для предконтрактной стадии проектного предприятия, выполняющего проекты НИОКР ВТИ, представлен на рисунке 2.

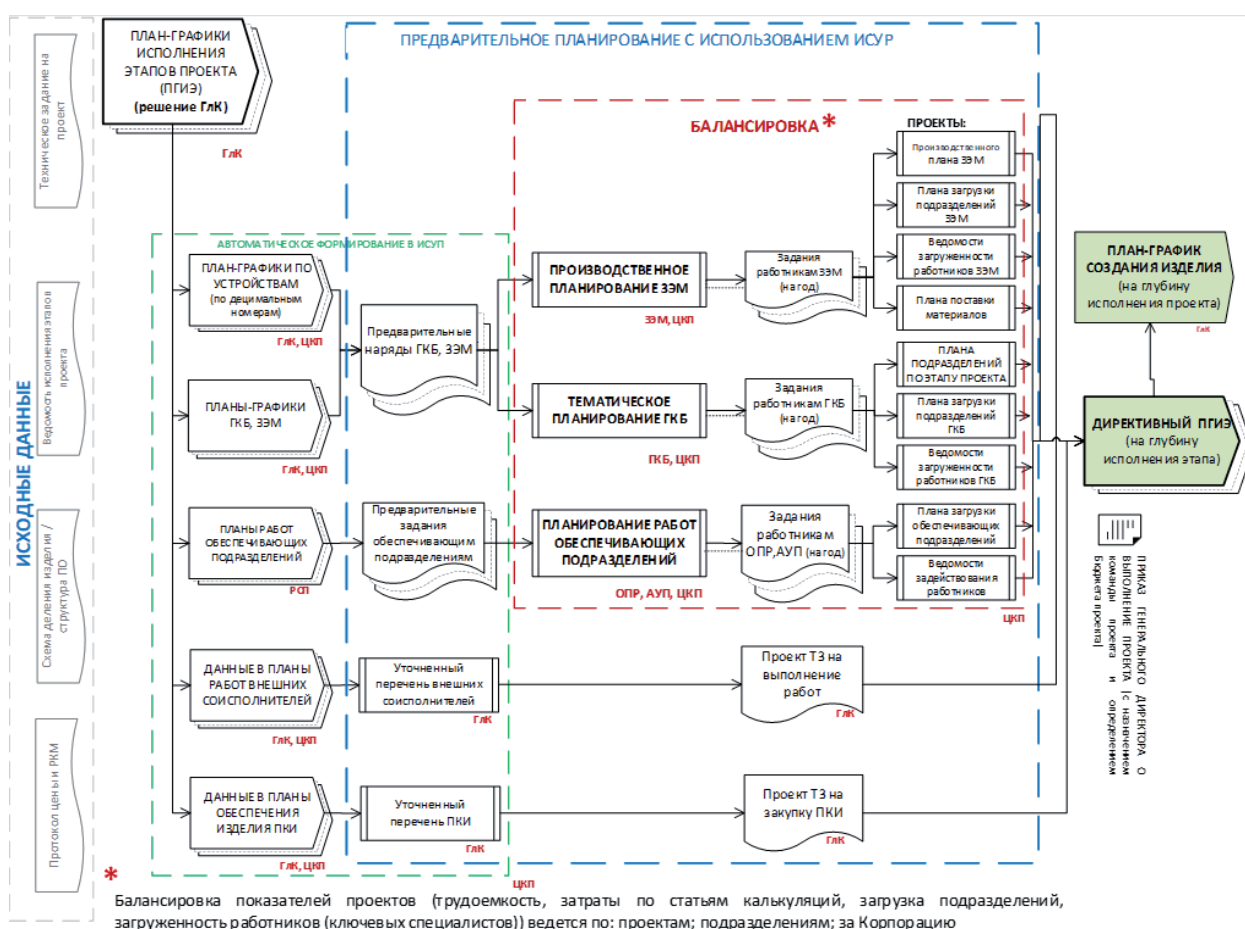


Рисунок 2 - Организация процессов планирования проектов НИОКР ВТИ

В ходе анализа процессов управления ресурсами крупных предприятий и применяемых автоматизированных систем было выявлено, что на практике указанные процессы строятся как многоуровневые и распределённые, в которых выделяются три основных уровня:

- сквозное стратегическое планирование (СП) заказов и ресурсов на значительный горизонт времени (2-3 года);
- тактическое управление на среднем горизонте (до года);
- оперативное управление (ОУ) подразделениями для выполнения стратегических планов в требуемые сроки и бюджеты на коротком горизонте (до 1-3 месяцев).

Имеющиеся на предприятиях автоматизированные СУР, как правило, предлагают каскадные модели и методы решения задач управления ресурсами, в которых взаимодействия между подразделениями для согласования планов реализуются в ручном режиме, что приводит к следующим негативным последствиям:

- сложность и трудоёмкость планирования;
- планы на разных уровнях расходятся по срокам и показателям, теряя актуальность;
- длительные задержки в принятии решений и согласовании планов;
- риски срыва сроков заказов и выхода за бюджеты.

Анализ процессов управления на указанных предприятиях показал, что цели, предпочтения и ограничения формулируются не только на верхнем уровне предприятия, но и на уровне каждого подразделения, что усиливает требование по переходу к построению распределённых ИСУР для поиска согласованных решений по управлению ресурсами.

2 Предлагаемый подход к решению задачи

В качестве альтернативы каскадному управлению предлагается распределённый подход, в котором для каждого уровня управления и каждого подразделения предприятия должна быть построена АИС, осуществляющая полный цикл управления ресурсами предприятия: распределение ресурсов, планирование и оптимизация заказов, мониторинг и контроль исполнения планов с автоматическим адаптивным перестроением планов в случае расхождения между ожидаемыми и фактическими результатами.

Ключевой проблемой распределённого управления предприятиями становится обеспечение автономности указанных АИС в сочетании с непрерывной выработкой согласованных решений по планам, бюджетам и срокам заказов. Получается, что общего детального плана предприятия в АИС на любой момент времени формально не существует, но он создаётся в ходе отработки запроса на его предъявление через запросы к АИС подразделений. Вместе с тем, план устаревает в момент своего создания: в каждой АИС подразделения в это время случаются события, которые нарушают соответствующие производственные планы и ведут к их адаптивному перестроению. Синхронизация планов при этом должна осуществляться в непрерывном режиме по выделенным в ходе анализа наиболее частым типам событий, включая появление и отзыв новых заказов, недоступность и возврат в работу ресурсов, а также по факту выполнения задач подразделениями, которые могут быть выполнены раньше или позже планового срока. Основные различия между существующей каскадной и предлагаемой распределённой моделями управления ресурсами предприятия представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 - Сопоставление каскадной (слева) и распределённой (справа) моделей управления ресурсами

В существующем каскадном подходе к управлению ресурсами предприятий имеется одна система и жёсткая иерархия уровней управления и соответствующих модулей: главный модуль даёт планы следующему уровню, а подчинённый в ответ даёт отчёты по исполнению. Обратное поступление факта или других событий вызывает полный пересчёт плана на верхнем уровне с последующим новым каскадированием «сверху вниз» и т.д.

В предлагаемом распределённом подходе имеется много АИС нового класса и строится гибкая сеть АИС с рыночными запросами по сетевому принципу взаимодействий (*p2p*, от англ. *Peer-To-Peer* – «каждый с каждым» как «равный с равным»). В этом случае каждому уровню управления и каждому подразделению ставится в соответствие собственная АИС, способная к автоматическому принятию решений по управлению ресурсами и взаимодействию для проведения переговоров по синхронизации планов при появлении любых событий, часть которых разрешается в соответствующих АИС. События, которые разрешить собственными ресурсами невозможно, инициируют пересогласование планов, чтобы обеспечить их актуальность на любой момент времени. Основные отличия каскадного и распределённого подходов к управлению ресурсами предприятий сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Основные отличия каскадного и распределённого подходов к управлению ресурсами предприятий

№ п/п	Каскадная автоматизированная система управления	Распределённая ИСУР
1	Автоматизированная система, состоящая из набора модулей различного уровня, ориентированная на учётные функции	Автономная интеллектуальная система из набора таких же автономных систем каждого уровня, ориентированных на планирование и контроль
2	Одна глобальная целевая функция (ЦФ) предприятия, интересы подразделений не принимаются во внимание	У каждого подразделения есть свои ЦФ, предпочтения и ограничения, позволяющие учесть интересы подразделений
3	Работает в заданном цикле: обычно 1 раз в месяц, реже - 1 раз в неделю, редко - 1 раз день	Работает по любым событиям, синхронизируя планы (может много раз в день)
4	Формируется один глобальный план на предприятие, детализируемый «сверху-вниз» на подразделения	Каждое подразделение строит свой собственный план в своей системе, которая самосинхронизируется с другими системами
5	Расчёты инициируются руководителями, экономистами и диспетчерами по необходимости	Расчёты инициируются самими системами любого уровня в случае поступления событий в любой момент времени
6	Планы передаются «сверху-вниз» на нижние подразделения без обратной связи	Планы формируются по запросам систем и взаимно влияют друг на друга «сверху-вниз» и «снизу-вверх», а также по горизонтали
7	Руководители подразделения или цеха доводят план под свои критерии, предпочтения или ограничения	Системы адаптивно перестраивают планы и координируют их между собой
8	Нет постоянной обратной связи и адаптации между уровнями для синхронизации планов	Есть постоянная обратная связь и адаптация между уровнями для синхронизации планов
9	Факт поднимается «наверх» с заданной частотой (месяц, неделя или день)	Факт немедленно передаётся «наверх» для синхронизации планов в реальном времени, в результате планы всегда актуальные и согласованные
10	Непредвиденные события требуют заново выполнять полный перерасчёт планов «сверху-вниз» с их новым каскадированием «вниз»	Непредвиденные события адаптивно перестраивают планы своих подразделений и передаются в вышестоящую структуру, когда не могут быть отработаны

Для создания ИСУР были предложены онтологии и мультиагентные технологии (МТ), которые обеспечивают возможность адаптивного перестроения планов по событиям [9]. Решение задачи планирования на любом уровне при этом строится в ходе сопряжённых взаимодействий программных агентов в ходе достижения «конкурентного равновесия» [10]. Это позволяет адаптивно перестраивать планы в случае возникновения непредвиденных событий.

Для случая, когда стратегический план строится на большой горизонт времени и мало подвержен изменениям по событиям, целесообразно применять гибридный подход, формируя план на основе традиционных методов и различных эвристик, например, на основе методов линейного и динамического программирования, программирования в ограничениях и др. методов [11]. В этом случае АИС могла бы дополнительно выполнять функцию координатора, помогающего АИС нижнего уровня договариваться между собой. Гибридный подход, применённый для одной системы, сочетает венгерский метод для начального решения транспортной задачи и МТ для дальнейшего адаптивного перестроения планов [12].

Если решение задачи не достижимо из-за роста размерности задачи и числа возможных вариантов, то могут быть использованы различные эвристические методы: жадные алгоритмы; генетические алгоритмы; нейросети и нечёткая логика; эвристические правила и др.

В рассматриваемом подходе возникает задача построения сети АИС, в которой каждая АИС может использовать свои собственные подходы к планированию или их комбинации. Указанная постановка задачи отличается от задачи разработки распределённых систем [13]. В ней рассматриваются задачи распределённой обработки и интеграции данных для ускорения процессов вычислений, но не процессы согласования решений. Более близким к настоящей работе является направление по созданию распределённых систем поддержки принятия решений [14], в которой решается задача иерархического принятия решений по уровням управления. Задача распределённого принятия решений в производстве остаётся в направлениях перспективных исследований [15, 16].

Таким образом, в предлагаемом подходе распределённого управления требуется перейти от одной пакетной системы, работающей в недельно-месячном цикле без обратной связи, к распределённой системе АИС, работающих в реальном времени, с постоянно действующей обратной связью, инициируемой поступающими событиями.

3 Формализация постановки задачи распределённого управления ресурсами

Анализ постановки задачи распределённого управления ресурсами крупных промышленных предприятий, работающих по основным стадиям ЖЦ ВТИ, показывает, что ЦФ может быть самоподобной, рекурсивно разворачиваясь и детализируясь на различных уровнях от предприятия в целом до конкретного подразделения и отдельного работника.

На уровне предприятия требуется выполнить все заказы в срок, с высоким качеством, с минимальными затратами, а также с минимальными рисками. На уровне подразделений к этим требованиям добавляется максимальная загрузка персонала, необходимость развития компетенций сотрудников, минимизация числа переналадок оборудования и т.д.

Таким образом, каждая АИС призвана решать многокритериальную задачу планирования и оптимизации ресурсов с определённой ситуативной составляющей, в рамках которой состав выбираемых критериев, предпочтений и ограничений, а также их важность, могут изменяться в ходе работы предприятия.

Исходными данными для работы АИС, которые могут задаваться и изменяться пользователями в ходе работы предприятия, могут быть множества:

- заказов предприятия $P = \{p_k\}, k = \overline{1..K}$, где K – количество заказов предприятия, образующих его производственную программу;
- работ заказа (операций) $W^k = \{w_i^k\}, i = \overline{1..I}$, где I – количество операций k -го заказа;
- ключевых событий заказа $E^k = \{e_l^k\}, l = \overline{1..L}$, где L – количество ключевых событий k -го заказа;
- исполнителей $D = \{d_j\}, j = \overline{1..J}$, где J – количество исполнителей, участвующих в выполнении производственной программы предприятия;
- трудовых ресурсов исполнителя (персонал предприятия) $EmpR^j = \{empR_m^j\}, m = \overline{1..M}$, где M – количество трудовых ресурсов j -го исполнителя;
- технических ресурсов исполнителя (специализированное оборудование, средства технологического оснащения и другие технические средства, применяемые при выполнении заказов) $TechR^j = \{techR_q^j\}, q = \overline{1..Q}$, где Q – количество технических ресурсов j -го исполнителя;
- компетенций (качеств) трудовых и технических ресурсов $C = \{c_g\}, g = \overline{1..G}$, где G – количество компетенций ресурсов.

Для каждого заказа p_k определён следующий набор параметров: $revenueP_k$ – максимальная сумма затрат на ресурсы; $minStartP_k$, $maxFinishP_k$ – директивные сроки начала и завершения заказа.

Для каждой работы w_i k -ого заказа определён следующий набор параметров:

- $amountW_i^k$ – объём работы (трудоемкость), необходимый для её выполнения;
- $startW_i^k$, $finishW_i^k$ – начало и завершение работы i -ой работы k -го заказа;
- $minDurationW_i^k$, $maxDurationW_i^k$ – минимальная и максимальная технологическая длительность выполнения работы;
- $minEmpCountW_i^k$, $maxEmpCountW_i^k$ – минимальное и максимальное количество исполнителей, которые могут быть привлечены для выполнения работы;
- $minTechCountW_i^k$, $maxTechCountW_i^k$ – минимальное и максимальное количество технических ресурсов, которые необходимы и возможны для выполнения работы;
- $RequiredCompetences \{requiredComp_{i,g}^k\}$, где $i = \overline{1..I}$, $g = \overline{1..G}$ – требуемый уровень компетенции g , которой должен обладать ресурс, для выполнения i -ой работы k -го заказа $requiredComp_{i,g}^k \in R$.

Каждый трудовой ресурс $empR_m^j$ исполнителя d_j характеризуется следующими параметрами:

- $rateEmp_m^j$, $rateEmp_m^j \in R$, $rateEmp_m^j > 0$ – стоимость за единицу времени использования ресурса $empR_m^j$ при выполнении работы;
- $idleRateEmp_m^j$ – стоимость за единицу времени простоя ресурса $empR_m^j$, $idleRateEmp_m^j \in R$, $idleRateEmp_m^j > 0$;
- $EmpCalendar_m^j = \{empCal_{m,h}^j\}$, где $m = \overline{1..M}$, $h = \overline{1..H}$. $empCal_{m,h}^j \in R$, $empCal_{m,h}^j > 0$ – доступность m -го трудового ресурса j -го исполнителя в единицах работы (например, часах) в заданный интервал времени h , данное множество определяет календарь работы трудового ресурса;

- $ProductivityEmp^j = \{prodEmp_{m,z}^j\}$, где $m = 1..M$, $z = 1..Z$, $prodEmp_{m,z}^j \in R$, $prodEmp_{m,z}^j > 0$ – производительность m -го трудового ресурса j -го исполнителя по виду работ z ;
- $CompEmp_m^j = \{compEmp_{m,g}^j\}$, где $m = 1..M$, $g = 1..G$, $compEmp_{m,g}^j \in R$, $compEmp_{m,g}^j > 0$ – уровень владения m -го трудового ресурса g -ой характеристикой.

Каждый технический ресурс $techR_q^j$ исполнителя d_j характеризуется следующими параметрами:

- $rateTech_m^j, rateTech_m^j \in R$, $rateTech_m^j > 0$ – стоимость за единицу времени использования ресурса $techR_m^j$ при выполнении работы;
- $TechCalendar_q^j = \{techCal_{q,h}^j\}$, где $q = 1..Q$, $h = 1..H$. $techCal_{q,h}^j \in R$, $techCal_{q,h}^j > 0$ – доступность q -го технического ресурса j -го исполнителя в единицах работы (например, часах) в заданный интервал времени h , данное множество определяет календарь работы технического ресурса;
- $CompTech_q^j = \{compTech_{q,g}^j\}$, где $q = 1..Q$, $g = 1..G$, $compTech_{q,g}^j \in R$, $compTech_{q,g}^j > 0$ – уровень владения q -го технического ресурса g -ой характеристикой.

Для каждой АИС требуется построить расписание выполнения всех работ w_i^k всех заказов ресурсами исполнителей на горизонте H , максимизирующее ЦФ системы F , заказов FP и подразделений FD : $(K_1 * F + K_2 * FP + K_3 * FD) / 3 \rightarrow \max$, где $\sum k_i = 1$ – коэффициенты важности каждой ЦФ (с возможностью рекурсивной развёртки на следующий уровень).

Требуется определить: в какие моменты t_h в каком объёме v задействованы трудовые ресурсы $empR^j$ и вовлечены технические ресурсы $techR^j$ исполнителя d_j для выполнения i -ой работы k -го заказа в каждом подразделении на каждом выбранном уровне предприятия.

Множество назначений ресурсов - $ResourcePlan = \{resourceP_a\}$, где $a = 1..A$, A – количество элементов расписания для ресурсов всех исполнителей. Каждый элемент $resourceP_a$ представляет кортеж:

$resourceP_a = \langle planStart, planFinish, v, empR_m^j, techR_q^j, w_i^k \rangle$, где: $planStart$ – запланированное время начала работ, $planStart \in H$; $planFinish$ – запланированное время завершения работ, $planFinish \in H$; v – запланированный объём работ, $v \in R$, $v \geq 0$.

Весь объём работ по заказам должен быть распределён между ресурсами.

Имеется и ряд других требований: должны учитываться приоритеты производственных заказов, должна быть обеспечена возможность введения в ЦФ специализированных критериев, предпочтений и ограничений (своевременность выплаты зарплаты, равномерность загрузки работников и т.п.), расписание выполнения заказов должно учитывать отношения порядка выполнения операций технологических процессов, календари доступности персонала и оборудования и т.д.

Таким образом, особенность постановки рассматриваемой задачи состоит в многоуровневой декомпозиции задач управления проектами или цехами производственных подразделений, рекурсивно разворачиваемых в ходе построения сети АИС от уровня СП на большой горизонт времени до уровня отдельных подразделений для исполнения подготовленных планов в заданные сроки и бюджеты.

4 Метод решения задачи распределённого управления ресурсами

Для решения задачи предлагается модифицированный метод сопряжённых взаимодействий в мультиагентной сети потребностей и возможностей (ПВ-сети), позволяющий многоуровневое взаимодействие отдельных АИС на основе разработанной сетцентрической платформы. В этих целях проведена модификация базовых классов агентов ПВ-сети, моделей и методов их функционирования, а также протоколов взаимодействия для поддержки многоуровневого вертикального и горизонтального *p2p* взаимодействия экземпляров АИС в реальном времени. Разработан метод СП ресурсов на основе метода ветвей и границ для построения долгосрочных планов, что позволяет дополнить МТ ОУ ресурсами в реальном времени.

Модифицированный метод включает следующую последовательность действий.

- 1) Создаётся онтология предметной области (ПрО) предприятия, расширяющая базовую онтологию управления ресурсами и позволяющая формализовать знания о структуре изделий, технологических процессах, классификаторах задач и ресурсов, компетенциях и других особенностях предприятия.
- 2) Для каждого предприятия отрасли на основе построенной онтологии создаётся свой ЦД – АИС, построенная с применением базы знаний и МТ или с помощью других методов планирования и оптимизации ресурсов.
- 3) База знаний каждого предприятия, построенная на основе единой общей онтологии, содержит экземпляры классов понятий и отношений ПрО конкретного предприятия.
- 4) Для создания АИС предприятия использован распределённый подход, построенный на принципах сетцентрического *p2p* взаимодействия, в рамках которого создаются АИС подразделений СП и ОУ, между которыми поддерживается автоматическое взаимодействие для согласования и синхронизации планов на основе протоколов вертикального и горизонтального взаимодействия.
- 5) Первоначально в АИС СП предприятия строится укрупнённый план на значительный горизонт времени, из которого выделяются планы подразделений на короткий горизонт тактического или оперативного уровня (от 1 до 6 месяцев).
- 6) Построенные в АИС СП тактические или оперативные планы подразделений рассматриваются как заказ на виртуальном рынке предприятия для АИС ОУ, при выполнении которого АИС ОУ соответствующих подразделений могут конкурировать или кооперироваться между собой, декомпозируя задачи на подзадачи и предлагая планы со своими расчётными показателями ЦФ.
- 7) Из полученных предложений АИС СП формирует тот набор, который максимально удовлетворяет её ЦФ.
- 8) Согласованные планы запускаются в работу через АИС подразделений, где доводятся до работников, которые в дальнейшем сообщают о ходе исполнения задач в согласованном режиме, фиксируя затраченные трудоёмкости работ и получаемые результаты.
- 9) Вновь приходящее сообщение о событии в АИС СП или АИС ОУ, включая информацию о факте исполнения любой задачи, вызывает адаптивное перестроение планов, направленное на выполнение работ к заданному сроку, с требуемым качеством, с минимальными затратами и рисками. Если отработать событие без нарушения сроков оказывается невозможным, то запускаются процессы пересогласования планов, регулируемые протоколами вертикально-горизонтальных взаимодействий АИС для согласования планов.
- 10) Указанный процесс применим не только для подразделений одного предприятия, но может включать субконтракторов предприятия по любой части работ, а также использоваться для формирования отраслевых цепочек кооперации предприятий.
- 11) Возможен режим моделирования, когда любая АИС подразделения или предприятия в целом может создавать копии своего ЦД, который поможет определить, как новый заказ

разместится в текущий план с учётом уже запланированных заказов, какова будет его себестоимость, сроки и т.д.

Разработанный метод может быть применим на любом уровне управления ресурсами предприятий, работающих на любой этапе ЖЦ ВТИ.

5 Архитектура цифровой экосистемы АИС

Для реализации разработанного метода предлагается архитектура цифровой экосистемы АИС, построенная на основе сетевцентрической $p2p$ платформы. Представленный на рисунке 4 пример описывает такую архитектуру для производственного предприятия, создающего ВТИ, для предприятий по управлению проектами ВТИ и обслуживанию ВТИ.

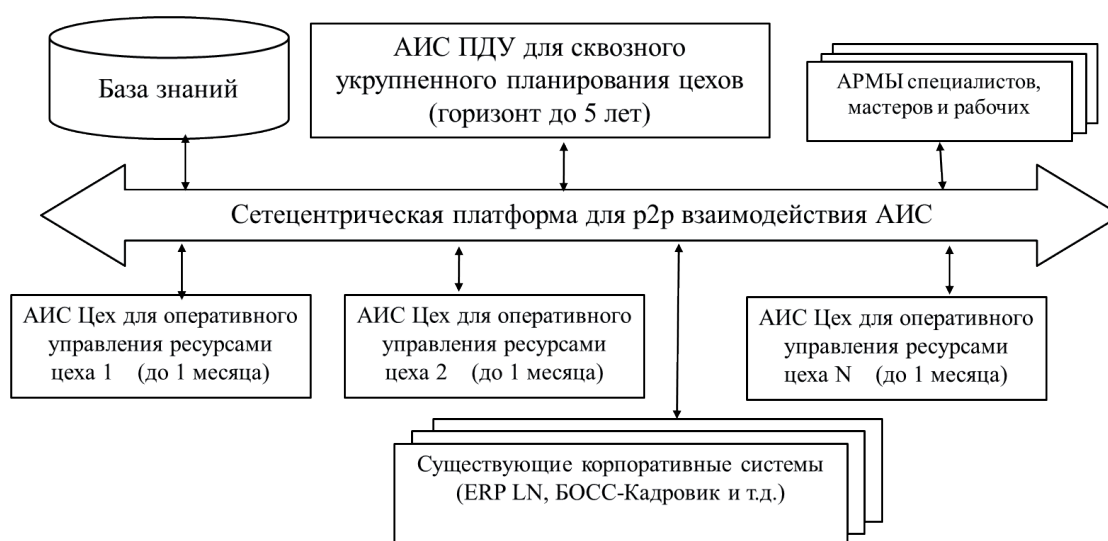


Рисунок 4 - Архитектура цифровой экосистемы АИС

Сетецентрическая платформа, основные системные и прикладные сервисы которой рассмотрены в [17], позволяет осуществить регистрацию и подключение экземпляров АИС, запуск и проведение сессий взаимодействий между АИС, сохранение данных, обеспечение безопасности и др. База знаний предприятия, построенная на основе онтологии ПрО деятельности предприятия, содержит дополнительно сведения о подразделениях, что помогает проводить сессии с АИС подразделений. Представленные АИС предприятия в целом и каждого из цехов работает автономно, но могут вести вертикальные и горизонтальные переговоры по $p2p$ принципам. Автоматизированные рабочие места специалистов и рабочих в цехах реализуют веб-интерфейсы, доступные через терминалы, Интернет-киоски или мобильные устройства. Разработанная платформа предусматривает сервисы для интеграции с существующими ИТ-системами предприятий.

6 Протоколы вертикально-горизонтальных взаимодействий АИС

Протоколы вертикальных и горизонтальных взаимодействий АИС СП и АИС ОУ подразделениями предприятия показаны на рисунках 5 и 6.

Содержание вертикальных протоколов АИС-СП - АИС-ОП включает следующие записи.

- ПВ1. *Запрос предложений*. Запрос на детализацию работ от АИС-СП в АИС-ОП - возвращается уточнённый план со сроками начала и завершения работ, ФИО работников и трудоёмкостью.

- ПВ2. *Выбор лучшего предложения.* Собираются ответы от подразделений, которые предлагают свои услуги по выполнению работ, выбирается наилучший вариант, фиксируется договор с выбранной АИС.
- ПВ3. *Запуск плана в работу, выдача первого наряд-задания и получение ответа за месяц.* Осуществляется запуск работ на основе согласованного плана и выдача первого наряда-задания в подразделение. В ответ через месяц получается отчёт о выполнении работы подразделением, который вызывает перестроение плана.
- ПВ4. *Инициация пересмотра согласованного плана снизу.* В случае расхождения плана и факта, которое не может быть устранено внутри подразделения, инициируется пересмотр плана в АИС-СП с созданием корректирующего плана.
- ПВ5. *Инициация пересмотра согласованного плана сверху.* Если подразделения не справляются, то план может быть пересмотрен по инициативе АИС-СП.
- ПВ6. *Завершение работы по этапу проекта.*



Рисунок 5 - Протоколы вертикальных взаимодействий АИС-СП и АИС-ОУ предприятия

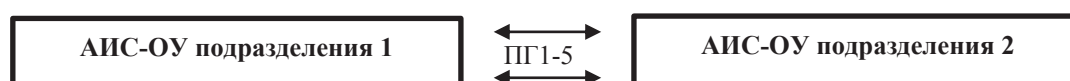


Рисунок 6 - Протоколы горизонтальных взаимодействий АИС-СП и АИС-ОУ подразделений предприятия

Содержание горизонтальных протоколов АИС-ОП1 - АИС-ОП2 включает следующие записи.

- ПГ1. *Согласование срока передачи результатов.* АИС-ОП1 первого подразделения передаёт АИС-ОП2 второго подразделения сведения, когда результаты работы будут переданы во второе подразделение, подтверждая данные от АИС-СП, в сквозном общем процессе, что запоминается в АИС-ОП2.
- ПГ2. *Информирование о задержке.* В случае возникновения угрозы задержки по передаче результата на стороне АИС-ОП1, эта система информирует АИС-ОП2 о возможной задержке, что вызывает адаптивную перестройку плана в АИС-ОП2 для его синхронизации. АИС-ОП2 должна передать сведения о задержке в АИС-ОП3 и далее.
- ПГ3. АИС-ОП2 - АИС-СП. *Эскалация проблемы.* Если задержка в АИС-ОП1 велика и не может быть компенсирована в АИС-ОП2, то АИС-ОП2 должна уведомить АИС-СП для корректировки сквозного плана или выделения дополнительных ресурсов в АИС-ОП1 или АИС-ОП2 для совместного формирования плана сокращения отставания от базовых сроков, например, путём введения сверхурочных работ.
- ПГ4. *Информирование о корректировке сроков.* Если АИС-ОП1 смогла сократить отставание от базовых сроков и срок передачи результатов скорректировался, то АИС-ОП2 уведомляется о событии, чтобы снова адаптивно перестроить свой план.
- ПГ5. *Завершение совместной работы.* По завершению работы АИС-ОП1 и передаче результата в АИС-ОП2 протоколы взаимодействия АИС завершаются.

Аналогичные протоколы разработаны для взаимодействия АИС на уровне предприятий в отраслевых цепочках кооперации [18].

7 Экспериментальные исследования разработанной экосистемы АИС

Для оценки качества и эффективности распределённого управления предприятиями на основе разработанной экосистемы АИС проведён ряд экспериментальных исследований.

Рассматривалась задача формирования комплексного производственного плана для агрегатно-сборочных цехов производственного предприятия по реализации товарной программы сборки сложных ВТИ на примере конструкции самолёта (рисунки 7 и 8).

Производство включает сеть цехов последовательно-параллельной агрегатной сборки частей самолёта в соответствии с заданным технологическим процессом. В технологическом процессе выделены более ста операций, которые связаны отношениями следования и имеют индивидуальные требования к трудовым и техническим ресурсам. Производственные мощности цехов включают более двухсот трудовых и около 50 технических ресурсов. Программа включает заказы на производство изделий с различными сроками отгрузки.

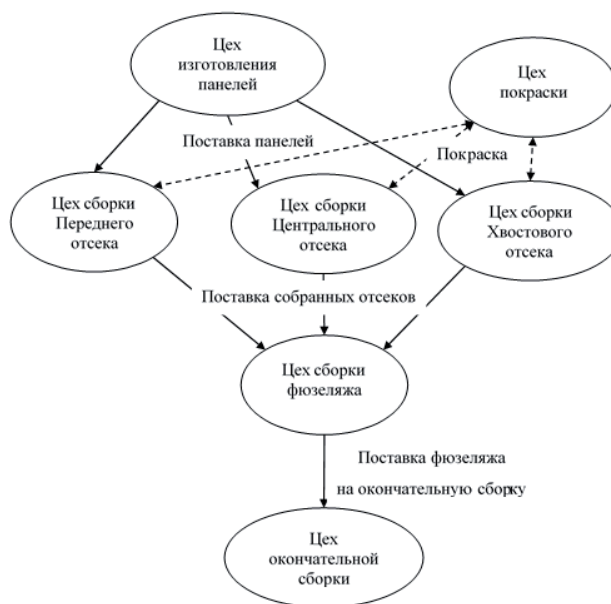


Рисунок 7 - Упрощённая схема взаимодействия производственных цехов для ВТИ «Самолёт»

Для СП ресурсов был выбран модифицированный метод удовлетворения ограничений. Для оперативного уровня использовался тот же метод для однородности результатов там, где адаптивность не требовалась.

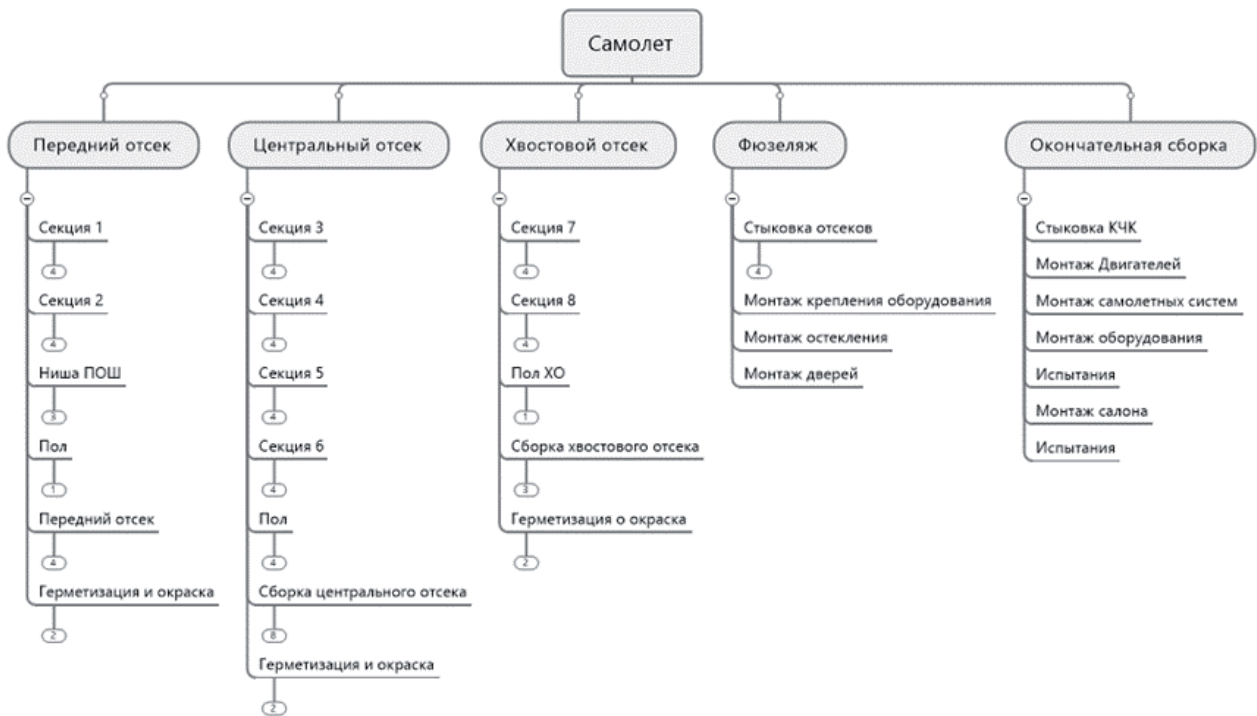


Рисунок 8 - Упрощённая схема сборки ВТИ «Самолёт»

Сравнивались результаты трёх экспериментов (рисунки 9 и 10):

- №1: Одна стратегическая «большая» АИС планирует работу сети цехов по изготовлению ВТИ;
- №2: Сеть «малых» АИС, отвечающих за каждый цех, планирует работу последовательно/параллельно по созданию частей ВТИ;
- №3: Стратегическая большая АИС рассчитывает начальный укрупнённый план, а малые оперативные АИС строят свои планы (параллельно).

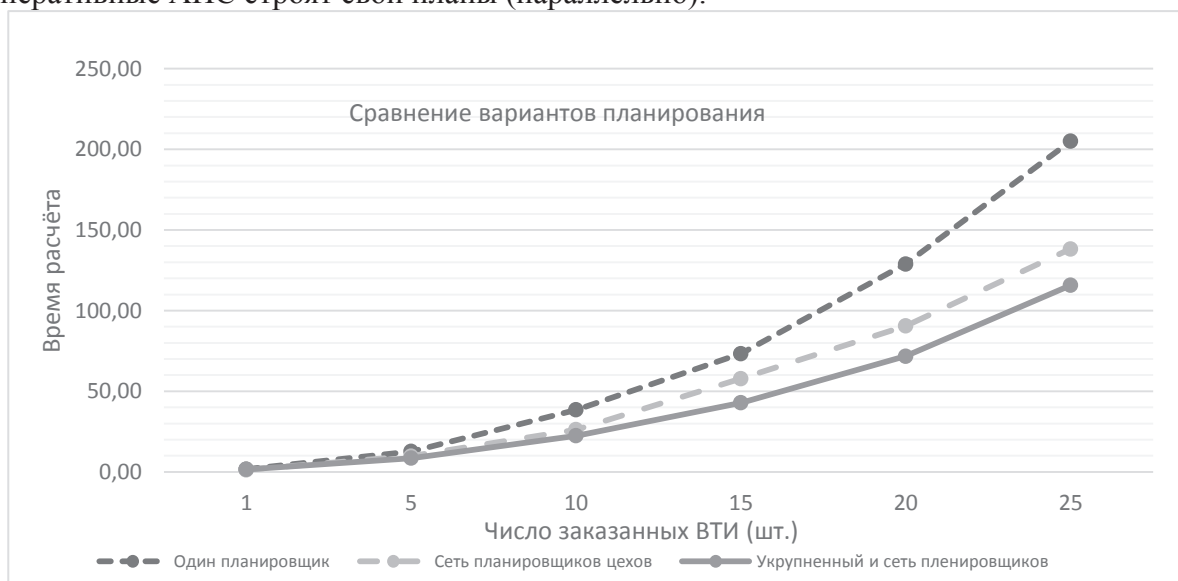


Рисунок 9 - Зависимость времени расчёта производственных планов от числа заказанных ВТИ

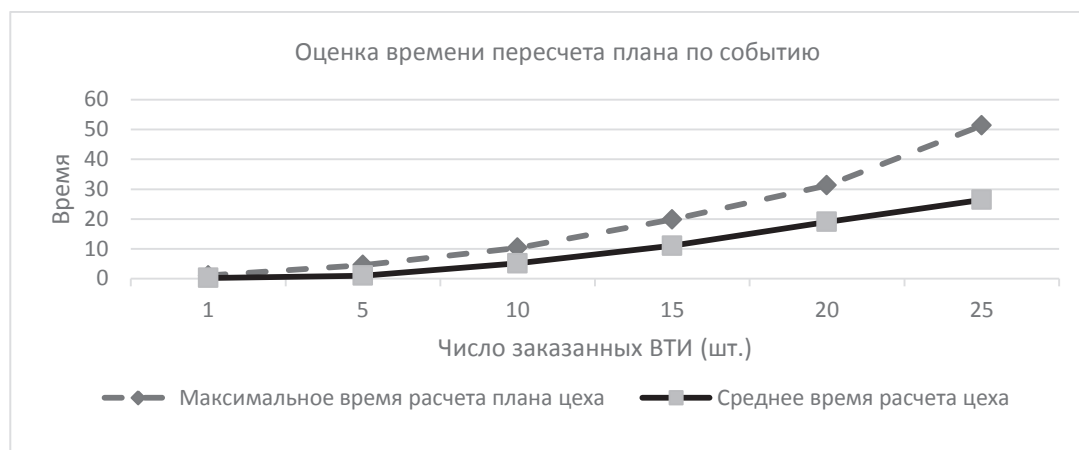


Рисунок 10 - Зависимость времени расчёта производственных планов для одного цеха

По результатам анализа данных экспериментов (см. рисунки 9 и 10) можно заключить, что время расчёта в эксперименте:

- №1 - для одной АИС растёт быстрее (по экспоненте), что ограничит возможности метода в централизованном варианте управления ресурсами;
- №2 - при сетевом подходе растёт медленнее и зависит от структуры производственной сети;
- №3 - рост не зависит от структуры производства.

Переход к распределённому режиму позволяет формировать комплексные планы за меньшее время (в среднем в 1,5 раза быстрее) без потери качества по ЦФ. Максимально локальная обработка событий происходит в рамках каждой АИС, а передача событий в другие системы осуществляется лишь в случае, когда локально обработать событие не получается. Это позволяет работать АИС предприятия в целом в режиме реального времени за счёт параллельных вычислений и постоянной синхронизации планов на всех уровнях.

8 Примеры применения

АИС для управления сборкой самолётов

Разработанная система реализует сопряжённое планирование сборки самолётов на поточной линии сборки, обеспечивая согласованное планирование на всех уровнях. Пример экрана АИС представлен на рисунке 11. К настоящему времени разработанная система проходит опытную эксплуатацию на производстве. В системе учитываются все рабочие и оборудование всей линии сборки конечных изделий.

Применение многоуровневого распределённого планирования позволяет сократить время разработки и согласования оперативных планов цехов на 75% по сравнению с планированием без учёта вышестоящих планов и сокращает количество ресурсных конфликтов, выявляемых в производственном планировании, в 3-5 раз.

АИС для управления проектами НИОКР

Разработанная АИС осуществляет сопряжённое согласованное планирование проектов НИОКР в конструкторском бюро на двух уровнях: укрупнённый и оперативный, включая работников подразделений. В АИС планируются проекты НИОКР (более 60) и около 50 тыс. связанных задач. АИС (см. рисунок 12) позволяет разрабатывать сетевые планы-графики, производить в автоматическом режиме балансировку загрузки подразделений, детализировать планы до уровня работников, формировать оперативные планы работ подразделений и задания для предприятий соисполнителей и обеспечивающих подразделений.

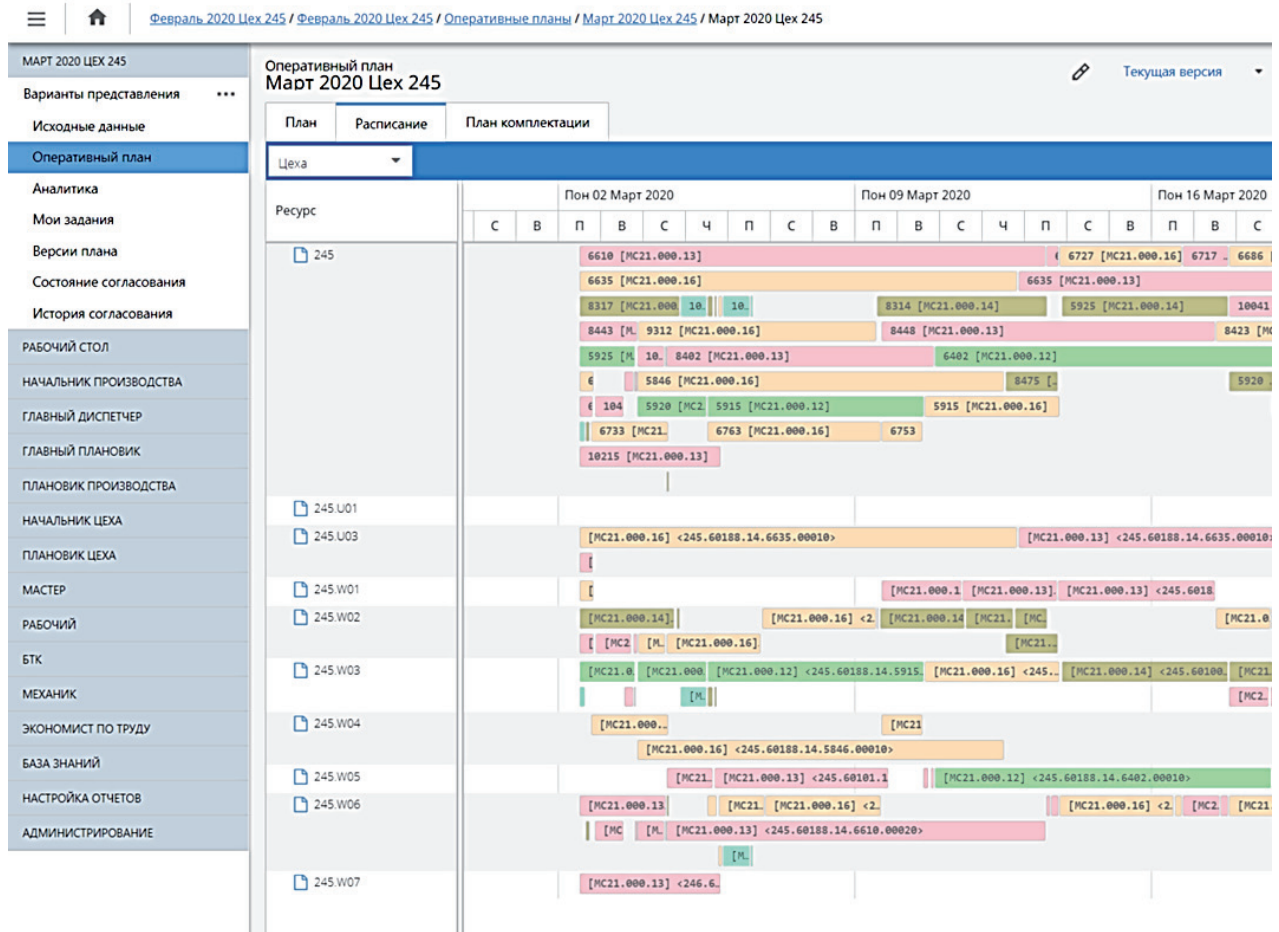


Рисунок 11 - Вид экрана АИС: диаграмма расписания работы производственных подразделений

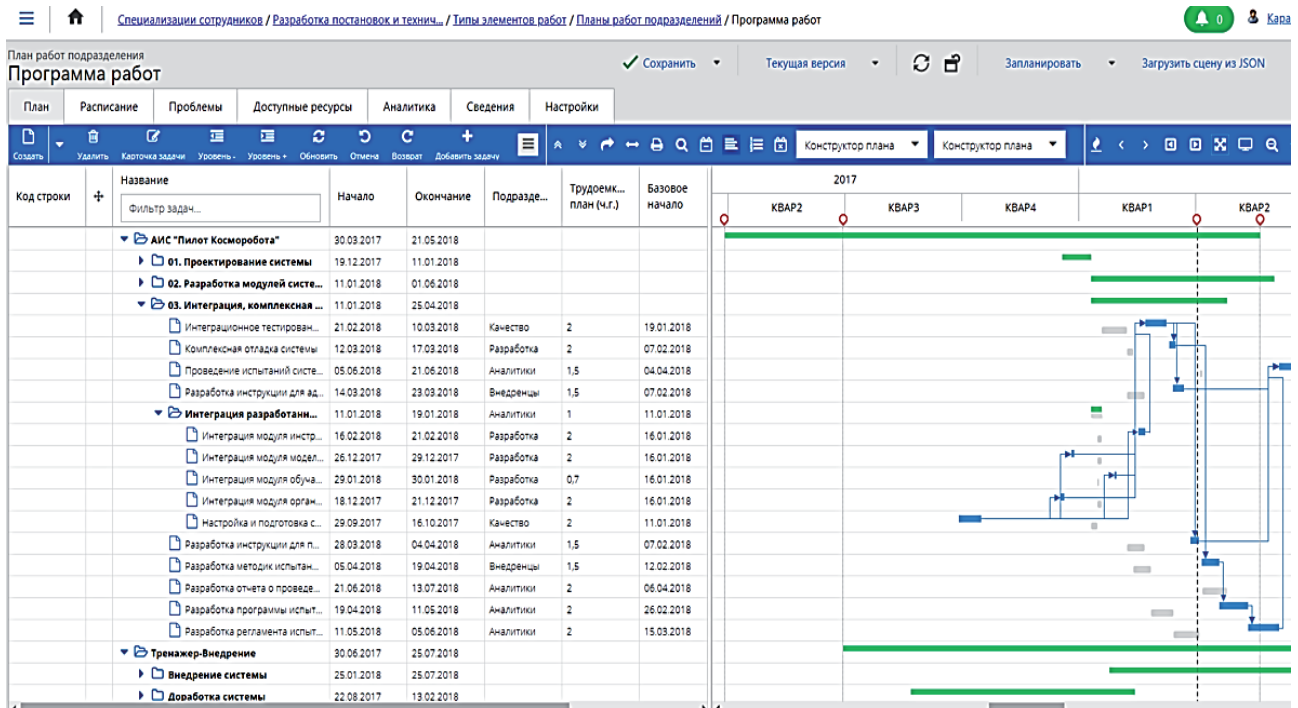


Рисунок 12 - Вид экрана АИС: планирование проектов НИОКР

Система формирует и корректирует по событиям два вида планов:

- долгосрочный план реализации программы НИОКР (до трёх лет) и все сетевые планы-графики трудовых ресурсов;
- оперативное планирование работы каждого подразделения до уровня конкретных работников по заданиям из разных проектов.

Планы синхронизируются между собой. Среднее время на формирование планов:

- долгосрочный план – 1,5 часа (180 проектов, на горизонте трёх лет);
- оперативного плана подразделения – 8 минут (150 конструкторов, 2 тыс. задач на горизонт – три месяца).

Результат: сокращение сложности и трудоёмкости планирования в два раза, повышение прозрачности и контролируемости процессов реализации проектов, уменьшение рисков срыва поставок продукции.

Заключение

Актуальной и значимой является задача перехода от традиционных каскадных систем управления ресурсами к распределённым сетевым системам, сочетающим СП и ОУ.

Разрабатывается распределённый подход к управлению предприятиями, в котором создаются АИС СП и ОУ для каждого подразделения, в которых строится и контролируется собственный план подразделения, а общий план формируется временно по соответствующему запросу к указанным АИС системам. Подход предполагает построение многоуровневой АИС с непрерывной асинхронной параллельной работой систем и их *p2p* взаимодействием для согласования планов.

Разработана концепция цифровой экосистемы АИС, реализуемой на основе сетецентрической платформы, поддерживающей вертикальные и горизонтальные взаимодействия АИС. АИС могут выполнять функции умных ЦД процессов управления предприятиями от уровня управления участками и цехами до управления предприятиями и отраслевыми цепочками их кооперации.

Показана возможность создания цифровых экосистем АИС на основе сочетания известных методов планирования и оптимизации ресурсов для СП на большой горизонт времени и ОУ на основе онтологий и МТ для отработки событий в режиме реального времени.

Показаны примеры применения разработанных методов и средств для решения задач распределённого управления ресурсами предприятий проектного и производственного типа.

Список источников

- [1] **Grieves M., Vickers J.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*; Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., Alvesm, A., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; p.85–113.
- [2] **Barricelli B., Casiraghi E., Fogli D.** A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access* 2019, 7, 167653–167671.
- [3] **Shen Z., Wang L., Deng T.** Digital Twin: What It Is, Why Do It, Related Challenges and Research Opportunities for Operations Research. 2 February 2021, p.53. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3777695.
- [4] **Skobelev P.** Towards Autonomous AI Systems for Resource Management: Applications in Industry and Lessons Learned - Proceedings of the 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018), Toledo, Spain, 20-22 June, 2018. *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity*. LNAI 10978, Y. Demazeau et al. (Eds.). Springer, Switzerland. P.12-25. DOI: 10.1007/978-3-319-94580-4_2.
- [5] **Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., Laruchkin V., Novichkov D., Skobelev P., Zhilyaev A.** The Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of

- Tasks and Resources in Real Time - Mathematics, 2022, 10(10), 1662. – MDPI AG, Switzerland. – <https://doi.org/10.3390/math10101662>
- [6] **Лада А.Н.** Применение мультиагентных технологий в транспортной задаче с временными окнами и несколькими пунктами погрузки / П.О. Скобелев, В.В. Сазонов, А.Н. Лада, И.В. Майоров // Управление большими системами (электронный журнал). 2016. №64. – С. 65-80
- [7] **Zhilyaev A.** Ontology-based open multi-agent systems for adaptive resource management / P. Skobelev, A. Zhilyaev, V. Larukhin, S. Grachev, E. Simonova // Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. – 2020. – P. 127-135.
- [8] **Zhilyaev A.A.** Application of Multi-agent Technology in the Scheduling System of Swarm of Earth Remote Sensing Satellites / P.O. Skobelev, E.V. Simonova, A.A. Zhilyaev, V.S. Travin // Procedia Computer Science. 2017. Vol.103. P.396-402.
- [9] **Грачев С.П., Жилиев А.А., Ларюхин В.Б., Новичков Д.Е., Галузин В.А., Симонова Е.В., Майоров И.В., Скобелев П.О.** Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени. *Автоматика и телемеханика*, 2021, № 11, С. 30-67.
- [10] **Виттих В.А., Скобелев П.О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах. *Автоматика и телемеханика*, 2003, №1. С.177-185.
- [11] **Лазарев А.А., Гафаров Е.Р.** Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Изд-во МГУ, 2011.
- [12] **Lada A.** A Solution to the Subtask of Initial Distribution of Transport Resources in a Special Optimization FTL Transportation Problem in Real-time Using the Hungarian Algorithm / A. Lada & P. Skobelev // Indian Journal of Science and Technology. – Vol 9(12), March 2016. – pp.1-8.
- [13] **Coulouris G. F., Dollimore J., Kindberg T.** Distributed systems: concepts and design. – Pearson education, 2005.
- [14] **Schneeweiss C.** Distributed decision making. – Springer Science & Business Media, 2012.
- [15] **Ransikarbum K., Pitakaso R., Kim N.** A Decision-Support Model for Additive Manufacturing Scheduling Using an Integrative Analytic Hierarchy Process and Multi-Objective Optimization. *Appl. Sci.* 2020, 10, 5159. <https://doi.org/10.3390/app10155159>.
- [16] **Bendul J.C., Blunck H.** The design space of production planning and control for industry 4.0 - Computers in Industry - Volume 105, February 2019, Pages 260-272.
- [17] **Gorodetsky V., Laryukhin V., Skobelev P.** Conceptual Model of Digital Platform for Enterprises of Industry 5.0 // I. Kotenko et al. (Eds.): Proceedings of the 13th International Symposium on Intelligent Distributed Computing IDC 2019, 7-9 October 2019, Saint-Petersburg. Intelligent Distributed Computing XIII. IDC 2019. Studies in Computational Intelligence, vol 868. – Springer International Publishing, Switzerland, 2020. P.35-40. ISBN 978-3-030-32257-1. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32258-8_4. First Online - 02 October 2019.
- [18] **Ларюхин В.Б., Скобелев П.О.** Цифровая экосистема управления производственной кооперацией предприятий в реальном времени по организации поставок высокотехнологичной продукции // В сборнике: Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Москва, 21 апреля, 2021. С. 133-137.

Сведения об авторе



Ларюхин Владимир Борисович, 1988 г. рождения. Окончил с отличием факультет информационных систем и технологий Самарского государственного архитектурно-строительного университета в 2010 г. Основатель и генеральный директор ООО Научно-производственная компания «Мультиагентные технологии», аспирант Самарского государственного технического университета. В списке научных трудов более 60 работ в области ИИ, онтологий и мультиагентных технологий. Author ID (РИНЦ): 1129354 ; Author ID (Scopus): 55890520300. larukhin@gmail.com.

Поступила в редакцию 15.05.2023, после рецензирования 01.06.2023. Принята к публикации 08.06.2023.



Methods and tools of co-interaction of autonomous intelligent systems for distributed management of enterprise resources

© 2023, V.B. Larukhin^{1,2}

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

² LLC Multi-agent Technologies, Research and Production Company, Samara, Russia

Abstract

The article analyzes the problem of multi-level management of the resources of large enterprises and the associated limitations of the cascade approach in modern automated control systems. It is shown that the cascade approach leads to delays in management processes, an increase in management complexity and significant discrepancies between plans at different management levels, missed deadlines and exceeding order budgets. To solve the problem, a new distributed approach is proposed, which involves the design of autonomous intelligent systems for resource management of units that form strategic plans and run operational management; network interfaced interaction of these systems to coordinate and synchronize plans for events coming in real time. A method for designing distributed autonomous systems for managing enterprise resources has been developed. The possibility of implementing the approach within a digital ecosystem based on a network-centric platform with vertical and horizontal interactions of these systems is shown. The results of the development and implementation of the approach at industrial enterprises for the design, production and operation of high-tech products that require separate order planning and accounting are presented. The prospects for the approach development of the formation of digital twins of industry chains of enterprises cooperation are outlined.

Keywords: multilevel systems, distributed approach, strategic planning, operational management, network-centric platform, autonomous intelligent systems, digital twins, project management, production management.

For citation: Larukhin V.B. Methods and tools of co-interaction of autonomous intelligent systems for distributed management of enterprise resources [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 254-273. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-254-273.

Acknowledgment: The author expresses his gratitude to Sergey Shlyayev for his help in developing a methodology for managing projects for state defense orders and supporting the implementation of the developed intelligent project management system in the Vympel Corporation.

Financial Support: The article was prepared with the grant support of the Russian Foundation for Basic Research under the competition "Graduate student", 20-37-90052 "Development of models, methods and algorithms for building ecosystems of smart services of "augmented intelligence" for adaptive planning, optimization and control of the use of resources of manufacturing enterprises".

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

List of figures and tables

Figure 1 - Typical structure and model of enterprise activity in projects

Figure 2 - Organization of pre-project activities for high-tech products

Figure 3 - Comparing cascade and distributed approaches

Figure 4 - The architecture of digital ecosystem of autonomous intelligent system

Figure 5 - The protocols of vertical interactions for autonomous intelligent system

Figure 6 - The protocols of horizontal interactions for autonomous intelligent system

Figure 7 - A simplified diagram of the dependence of production departments for the high-tech products "Airplane"

Figure 8 - A simplified break-down scheme for the high-tech product "Airplane"

Figure 9 - Computational time on the selected scenario

Figure 10 - Computing time per workshop

Figure 11 - A screenshot of autonomous intelligent system: work schedule diagram of production units

Figure 12 - A screenshot of autonomous intelligent system: R&D project planning

Table 1 - Enterprises selected for the analysis of management processes and applied resource management systems

Table 2 - The main differences between the existing "cascade" and the proposed "distributed" approach to large-scale enterprise resource management

References

- [1] **Grieves M, Vickers J.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*; Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., Alvesm, A., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; P.85–113.
- [2] **Barricelli B, Casiraghi E, Fogli D.** A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access* 2019, 7, 167653–167671.
- [3] **Shen Z, Wang L, Deng T.** Digital Twin: what it is, why do it, related challenges and research opportunities for operations research. 2 February 2021, p. 53. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3777695.
- [4] **Skobelev P.** Towards Autonomous AI Systems for Resource Management: Applications in Industry and Lessons Learned - Proceedings of the 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018), Toledo, Spain, 20-22 June, 2018. – *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity*. LNAI 10978, Y. Demazeau et al. (Eds.). – Springer, Switzerland. P.12-25. ISBN 978-3-319-94579-8. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-94580-4_2.
- [5] **Galuzin V, Galitskaya A, Grachev S, Laruchkin V, Novichkov D, Skobelev S, Zhilyaev A.** The Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time - *Mathematics*, 2022, 10(10), 1662. – MDPI AG, Switzerland. – <https://doi.org/10.3390/math10101662>.
- [6] **Lada A, Skobelev S, etc.** Applying multiagent technology for solving transportation problem [In Russian]. *Management of big systems*. 2016; 64: 65-80.
- [7] **Skobelev P, Zhilyaev A, Laruchkin V, Grachev S, Simonova E.** Ontology-based open multi-agent systems for adaptive resource management. *Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. 2020. P.127-135.
- [8] **Skobelev PO, Simonova EV, Zhilyaev AA, Travin VS.** Application of multi-agent technology in the scheduling system of swarm of earth remote sensing satellites. *Procedia Computer Science*. 2017; 103: 396-402.
- [9] **Grachev S, etc.** Methods and Tools for designing smart systems for adaptive resource [In Russian]. *Automation and telemechanics*, 2021, № 11, C. 30-67.
- [10] **Vittikh V, Skobelev S.** Multi-agent models of demand-resource networks [In Russian]. *Automation and telemechanics*, 2003; 1: 177-185.
- [11] **Lazarev A, Gafarov E.** Theory of scheduling [In Russian]. Moscow University, 2011.
- [12] **Lada A, Skobelev P.** A Solution to the subtask of initial distribution of transport resources in a special optimization FTL transportation problem in real-time using the hungarian algorithm. *Indian Journal of Science and Technology*. March 2016; 9(12): 1-8.
- [13] **Coulouris GF, Dollimore J, Kindberg T.** Distributed systems: concepts and design. Pearson education, 2005.
- [14] **Schneeweiss C.** Distributed decision making. – Springer Science & Business Media, 2012.
- [15] **Ransikarbum K, Pitakaso R, Kim N.** A decision-support model for additive manufacturing scheduling using an integrative analytic hierarchy process and multi-objective optimization. *Appl. Sci.* 2020, 10, 5159. <https://doi.org/10.3390/app10155159>.
- [16] **Bendul JC, Blunck H.** The design space of production planning and control for industry 4.0 - *Computers in Industry* - Volume 105, February 2019, P.260-272.
- [17] **Gorodetsky V, Laryukhin V, Skobelev P.** Conceptual model of digital platform for enterprises of Industry 5.0 // I. Kotenko et al. (Eds.): *Proceedings of the 13th International Symposium on Intelligent Distributed Computing IDC 2019*, 7-9 October 2019, Saint-Petersburg. – *Intelligent Distributed Computing XIII. IDC 2019. Studies in Computational Intelligence*, vol 868. – Springer International Publishing, Switzerland, 2020. – P. 35-40. ISBN 978-3-030-32257-1. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32258-8_4. First Online - 02 October 2019.
- [18] **Laruchkin V, Skobelev P.** The digital ecosystem for cooperation of enterprises [In Russian]. *Proc. of IV Russian conf. on Product life cycle*, Moscow, 21 April, 2021. P.133-137.

About the author

Vladimir Laruchkin (b. 1988). Graduated with honors from the Faculty of Information Systems and Technologies of the Samara State University of Architecture and Civil Engineering in 2010. Founder and CEO of the Multiagent Technologies LLC, Scientific and Production Company, a postgraduate student of Samara State Technical University. The list of scientific papers includes more than 60 works in the field of AI, ontologies and multi-agent technologies. Author ID (RSCI): 1129354; Author ID (Scopus): 55890520300; laruchkin@gmail.com.

Received May 15, 2023. Revised June 1, 2023. Accepted June 8, 2023.



Improvement of the quality management system of industrial enterprises based on the use of corporate knowledge

© 2023, L.R. Chernyakhovskaya¹, R.I. Mukhametyanova¹✉, A.A. Sirotina²

¹Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

²Ind Timber LLC, Irkutsk region, Ust-Kut, Russia

Abstract

This article analyzes the procedures for improving quality management using the example of solving problems of compliance with product quality requirements at industrial enterprises. The quality of the products largely depends on the use of modern methods and tools of quality management, as well as on improving the competence of personnel in the field of quality systems. In this regard, it is proposed to apply the corporate knowledge of the enterprise, including models and algorithms of artificial intelligence. Corporate knowledge is formed on the basis of the formation and processing of documentation, interviewing qualified specialists and intellectual data analysis on the implementation of business processes. During the research, an ontology of quality management was developed, decision-making rules were created and the results of improving the quality management system using a neuro-fuzzy network were predicted. The use of these artificial intelligence tools will make it possible to form a unified terminology to ensure an unambiguous perception of information by all participants in the process and the use of a knowledge base to support decision-making. It is proposed to use quality management tools to improve the efficiency of decisions made by intelligent tools, i.e. production rules and neural networks.

Key words: decision support system, quality management, ontology, fuzzy inference system, neuro-fuzzy modeling.

For citation: Chernyakhovskaya LR, Mukhametyanova RI, Sirotina AA. Improvement of the quality management system of industrial enterprises based on the use of corporate knowledge. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 274-281. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-274-281.

Financial Support: This work was supported by grant from the Russian Foundation for Basic Research No. 19-08-00937 «Methods and models of intellectual support for decision-making in the management of software projects implemented in the environment of industrial enterprises».

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

Introduction

The procedures for managing quality assurance and improvement processes are part of the management system for the entire organization and are determined by the requirements of ISO international standards: the 9000 series in the field of quality management [1] and risk analysis [2], as well as the recommendations of the ISO 14000 series of standards, focused on improving the environmental performance of the enterprise [3]. The directions of the organization's development are determined by the policy in the field of occupational safety and health management, quality management, and HR (Human Resources) management. According to the general theory of systems, the elements of the quality management system, HR management system, occupational safety, and health management should interact with each other in order to achieve the goals of the organization [4].

The quality management problems sometimes turn out to be so complex that the problem of decision-making exceeds the psychophysiological capabilities of a person, and a need for intellectual support for decision-making arises [5]. It is also relevant to create a single informational space for exchanging views and experience between various actors - specialists in different subject areas involved in the management process. As a result of the work, collaboration with key departments of

the enterprise will be obtained, the correct organization of which has the most significant impact on the quality of the finished product.

1 Ontological analysis of the quality management system

The main goal of intelligent decision support is to improve the quality of decisions made through closer cooperation and knowledge exchange between managers of interacting business processes based on ontology. The use of decision support systems (DSS) increases the efficiency of decision-making, improves their quality through analytical methods for the formation and selection of alternatives and the use of formalized expert knowledge, as well as significantly reduces the risk of making erroneous decisions.

Ontology is the knowledge formally presented on the basis of conceptualization, under which a description of a set of objects and concepts, knowledge, and connections between them is assumed [6]. An important function of the ontology is also to increase the efficiency of information retrieval of relevant decisions in quality management systems on the example of the enterprise Timber LLC.

The structure of the ontology consists of the axioms of the hierarchy of classes (a set of T-axioms), axioms describing the relations of association, axioms imposed on properties (a set of A-axioms), Axioms of a conceptual scheme (a set of T-axioms), show descriptions of class taxonomies, generalization relations, representative examples of classes. Axioms explaining specific situations of the subject area and rules characterizing causal relations (a set of A-axioms), reproduce the rules formulated in ontology defining.

The ontology was developed using the Protégé editor and the Ontology Web Language (OWL). The ontology shows such subsystems of enterprise activity as organizational management, quality management, decision support, as well as methods and tools for product quality control.

One of the possible areas of ontology application is information search with using the following types of queries: implementation of queries for information retrieval in OWL based on the logical ontology model and implementation of queries in the SPARQL query language. Ontology creates a single information space in order to manage quality, the parties exchanging knowledge could currently understand each other. For a detailed look at the production system made use the ontological analysis, which formalizes the field of knowledge and the relationship between concepts. This allows to have a common understanding of the structure and provides the ability to reuse knowledge in the subject area. The main advantage of using ontologies in organizational management is a holistic approach to managed processes. At the same time, the following are achieved: consistency (ontology represents a holistic view of the subject area), uniformity (material presented in a single form is much better perceived), complexity (ontology construction allows you to restore the missing logical connections).

Decision support in strategic enterprise management based on knowledge engineering [7]. The results of ontological analysis are supposed to be used to describe problem situations containing signs of deviation from the required quality, find the best solutions for improving quality, and select corrective measures in order to reduce risk.

2 Neuro-fuzzy modeling

In improving quality management processes, it is necessary to take into account the uncertainty of the quality assessment, manifested in the deviation of the quality of the product from the specified parameters. The causes of general deviations are: moral wear, physical and moral aging of products (that is, the loss of the original properties of products during its operation and storage) [8].

For forecasting, an adaptive neuro-fuzzy network Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) is synthesized, which implements a forecasting method using experimental data. The fuzzy inference system is developed using the MATLAB software system.

The experimental study consisted in collecting, evaluating and analyzing the main factors of the internal environment during 2019, 2020 and 2021, which characterize the process of organizational management of a manufacturing enterprise. The factors characterizing the processes of quality management, risk management and personnel management are presented in figure 1, shows that, unlike the values of quality management and personnel management factors, the values of risk management factors decrease every year due to the identification of dangerous and harmful production factors and the corresponding risks associated with production processes. The scale was brought to the form 0-1, each value in this range, where 0 is a low value and 1 is a high value. The less risk management, the better, and the higher the quality indicator, the better. The data can be obtained by expert means, the expert obtains the knowledge of a certain value by evaluating the indicator.

The problem of assessing the generalized quality indicator of the manufactured sawn timber is solved using a fuzzy inference system (FIS) based on the Takagi-Sugeno-Kang fuzzy inference algorithm [9].

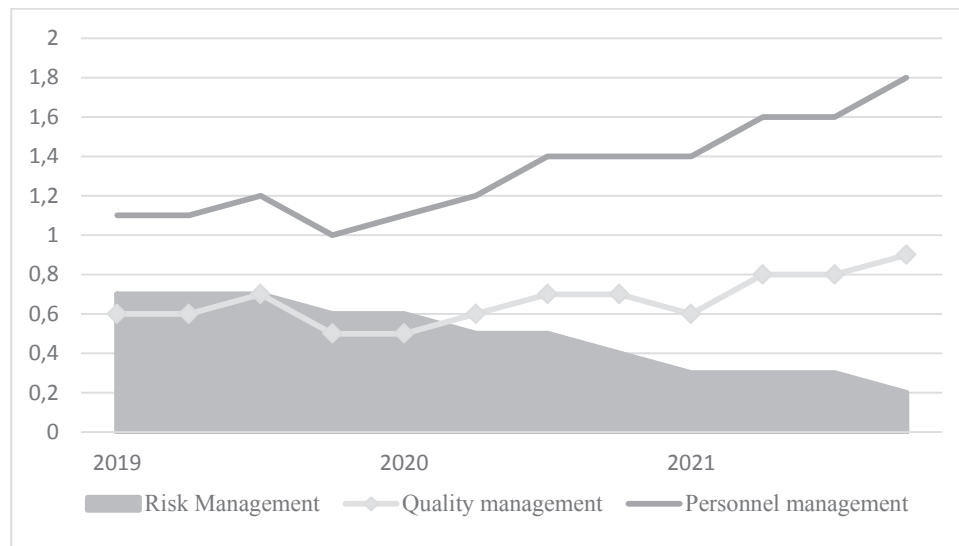


Figure 1 – Changes in the values of factors affecting quality management

The proposed assessment of the effectiveness of the functioning of the quality management system belongs to the class of forecasting problems, which are solved using methods of neuro-fuzzy modeling.

At the initial stage of creating a FIS, an analysis and selection of factors that have the greatest impact on the quality indicator of finished lumber were carried out. The choice of the most influential factors was carried out on the basis of the method of expert assessments [10, 11]. The FIS for assessing the generalized quality indicator of the manufactured sawn timber was proposed to be considered as a two-level hierarchical system, the lower level of which is represented by three fuzzy inference subsystems that solve the problems of HR management, quality management and occupational safety and health management, ecology, industrial and fire safety. The upper level of the created FIS directly solves the problem of assessing the generalized indicator of the quality of sawn timber based on the output data of the lower level subsystems, including quality indicators: X_1 – customer satisfaction in terms of quality indicators; X_2 – assessment of incoming raw materials; X_3 – the specific weight of rejected products; X_4 – the state of industrial injuries and occupational diseases; X_5 – financing of activities to improve labor conditions and safety; X_6 – delivery time management,

X_7 – professional level of the enterprise HR; X_8 – motivation, and remuneration; X_9 – the degree of information support for work with people.

At the top level of the hierarchical fuzzy inference system, three factors are presented to assess the effectiveness of the functioning of the quality management system: Quality Management (QM), Risk Management (RM), Personnel Management (PM); the output variable is Effectiveness (Effect).

On the basis of expert knowledge within the framework of the proposed hierarchical model of FIS, a base of fuzzy production rules in the form of conditional statements of the “IF-THEN” type, representing a fuzzy implication, was developed [12]:

IF PM is A_{i1} AND QM is A_{i2} AND RM is A_{i3} THEN Effect is B_i ,

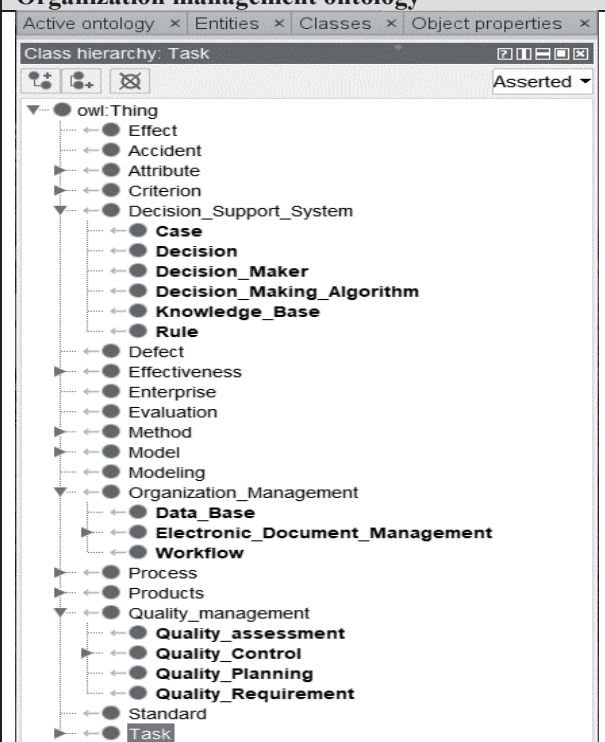
where A_{ij} , B_i are linguistic values identified using a fuzzy method through the corresponding membership functions $\mu A(x_i)$ и $\mu B(y)$ for variables.

Examples of rules for FIS can be presented in the table 1.

When developing point scales, the gradation of the scale is determined depending on the nature of the task, the quality of experts, the necessary accuracy of the results and the possibility of a verbal description of the characteristics of quality levels. The example shows the above scale with four quality levels. A group of experts was involved in the work, among the employees of the enterprise, which is involved in the organizational management of technological processes. Four qualitative values were used on the scale: low, medium, high and very high.

In Table 1, on the left, seems the ontology of organizational management, where in the decision support system class there is a subclass of the rule, and on the right side, the rules themselves are shown contained there.

Table 1 – Examples of rules for FIS

Organization management ontology	Rules
	If (PM is low) and (QM is low) and (RM is high) then Effect is low If (PM is middle) and (QM is middle) and (RM middle) then Effect is middle If (PM is high) and (QM is middle) and (RM is high) then Effect is high If (PM is very high) and (QM is high) and (RM is low) then Effect is high If (PM is middle) and (QM is high) and (RM is low) then Effect is high (PM is low) and (QM is middle) and (RM is high) then Effect is low (PM is low) and (QM is low) and (RM is high) then Effect is middle (PM is middle) and (QM is middle) and (RM middle) then Effect is middle

A model describing the impact of concepts on work efficiency enterprises was built through peer review. Values and the mutual influence of factors was assessed on an ordered scale with four linguistic meanings - from the value (influence) "very high" to the value (influence) "low ". The indicators are evaluated on a 100-point scale, and if a group of experts evaluates the level of the indicator

from 0 to 24, then the indicator is classified as a low value, if from 25 to 49, then the indicator is classified as an average value, if from 50 to 74, then as a high value and very high knowledge in the case of an indicator value of more than 75.

A FIS is a process of obtaining fuzzy conclusions about the required quality management based on fuzzy conditions or prerequisites, which present as information about the current state of the object [13]. The process of fuzzy inference itself is an algorithm for obtaining fuzzy conclusions based on fuzzy premises using the basic operations of fuzzy logic.

3 Results

Fuzzy neural set allows you to determine the quality using the theory of fuzzy sets. At the same time, neural networks are being trained.

Thus, as a result of the study, a model was proposed for the interaction of departments that have the greatest influence on the process of high-quality lumber production, implemented within the framework of a systematic approach and based on the use of triads. Within the framework of the considered task, the problem of predicting the effectiveness of the lumber production process in the aspect of the interconnected management «Personnel Management (PM)» - «Quality Management (QM)» - «Risk Management (RM)» is investigated. Figure 2 shows interaction PM and RM.

The prediction method was implemented using an ANFIS based on previous data.

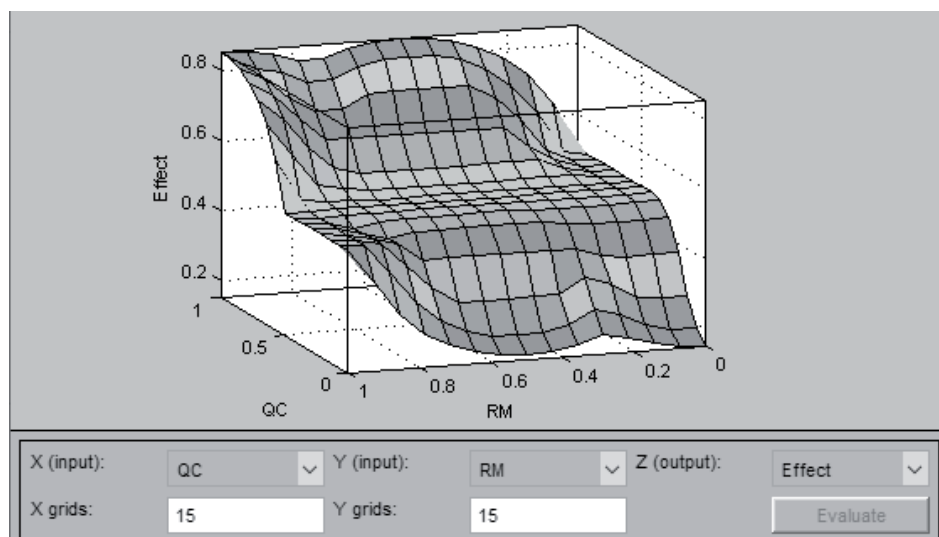


Figure 2 – Visualization of the fuzzy inference surface of the model under consideration for the PM and RM

And as a result of data analysis, there is rule-based forecasting, which indicates that risk reduction measures in production are closely related to the enterprise personnel and the overall effect of the enterprise, expressed in product development, gives a high value. Among the factors influencing the quality of products, there may be the following personnel management factors: professional selection of employees of certain professions, the degree of information and technical support for employees, the degree of team cohesion and the absence of internal conflicts, the style of work of enterprise managers with personnel, employee satisfaction with the existing system of corporate organization. In turn, this entails changes in product quality through customer satisfaction in terms of quality indicators and delivery times, assessment of incoming raw materials and materials, turnover of working capital, the proportion of defective products and profitability of sales.

As a result of the of the data analysis, forecasts of the rules for the effectiveness of quality improvement were made based on possible changes in risk management and personnel management.

Conclusion

In the context of the need to use modern quality management tools, new tools are offered. Thus, in the course of the research, an ontology of quality management was developed, decision-making rules were created and the forecasting of the results of improving the quality management system using was carried out. The use of these artificial intelligence tools will allow the use of a common terminology by all participants in the process to ensure unambiguous perception of information; apply precedents of problem situations to develop decision-making rules; create a knowledge base in the DSS. The use of such models and methods of artificial intelligence as ontological analysis and neuro-fuzzy modeling allows employees of the enterprise to carry out activities to improve product quality indicators using intelligent decision support. Recommendations should be concentrated in the analysis of several methods belonging to business processes to identify strengths on the example of production enterprises.

References

- [1] **ISO 9001:2015**. Quality management systems – Requirements. 29 p. <https://www.iso.org/standard/62085.html>.
- [2] **GOST R ISO 9000:2015**. Quality management systems. Fundamentals and vocabulary [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2015. 51 p.
- [3] **ISO 14001**. Environmental management systems – Requirements with guidance for use. <https://www.iso.org/standard/60857.html>.
- [4] **Luger JF**. Artificial Intelligence: Strategies and Methods for Solving Complex Problems, 4th edition. Transl. from English. Moscow: Publishing House “Williams”. 2003. 864 p.
- [5] **Fiorentini X, Rachuri S, Mani M, Fenves SJ, Sriram RD**. An Evolution of Description Logic for the Development of Product Models, NISTIR 7481, National Institute of Standards and Technology.
- [6] **Dobrov BV, Ivanov VV, Lukashevich NV, Soloviev VD**. Ontologies and thesauri: models, tools, applications [In Russian]. Moscow: Binom. Laboratory of Knowledge, 2009. 173 p.
- [7] **Bolotova LS**. Artificial intelligence systems: based on knowledge and technology models [In Russian]. Moscow: Finance and statistics, 2012. 664 p.
- [8] **Osovsky S**. Neural networks for information processing [In Russian]. Moscow: Finance and Statistics, 2002. 344 p.
- [9] **Chernyakhovskaya LR, Gvozdev VE, Mukhametianova RI**. Intelligent HR support for a growing industrial enterprise [In Russian]. *Information and mathematical technologies in science and management*. Institute of Energy Systems L.A. Melentiev SB RAS, Irkutsk, 2019, 30-37.
- [10] **Tepman LN**. Quality management [In Russian]. edited by V.A. Shvandar. Moscow: UNITY-DANA, 2007. 352 p.
- [11] **Santos R, Calado J, Abreu A**. An Approach based on Fuzzy Logic, to Improve of Quality Management on Research and development Centure. ICVIP 2019: 3rd International Conference on Vision, Image and Signal Processing, 2019, 3 p.
- [12] **Zadeh I**. Fuzzy logic, neural networks and soft computing. *Communication on ACM*-1994; 37(3): 77-84.
- [13] **Borisov VV, Kruglov VV, Fedulov AS**. Fuzzy models and networks [In Russian]. Moscow: Hotline – Telecom, 2007. 247 p.

About the authors

Liliya Rashitovna Chernyakhovskaya (b.1947) graduated from the Ufa Aviation Institute in 1970, PhD in 2004. She is a professor of Ufa University of Science and Technology (Technical cybernetics department), a co-author of about 150 publications in the field of system analysis, intellectual information systems and decision support systems. lrchern@yandex.ru.

Regina Ilfatovna Mukhametianova (b. 1990) graduated from the Ufa State Aviation Technical University in 2016. She is a lecturer at the Ufa University of Science and Technology (Technical cybernetics department), a co-author of about 15 scientific articles and abstracts in the field of system analysis, decision support systems and project management. lequel@mail.ru ✉.

Alena Alekseevna Sirotina (b. 1997) graduated from the Ufa State Aviation Technical University specialty quality management in 2021. She is the Deputy Head of the department of Labor Protection, Ecology, Industrial and Fire Safe-

ty at Ind Timber, LLC. The topic of research is the quality management system of a timber processing enterprise. si-rotinaalenushk@mail.ru.

Received September 8, 2022. Revised February 22, 2023. Accepted April 3, 2023.

УДК 004.8

Научная статья

DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-274-281



Улучшение системы менеджмента качества промышленных предприятий на основе использования корпоративных знаний

© 2023, Л.Р. Черняховская¹, Р.И. Мухаметьянова¹ ✉, А.А. Сиротина²

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

²ООО «Инд Тимбер», Иркутская область, Усть-Кут, Россия

Аннотация

Анализируются процедуры совершенствования управления качеством на примере решения проблем соблюдения требований к качеству продукции на промышленных предприятиях. Качество выпускаемой продукции во многом зависит от использования современных методов и инструментов управления качеством, а также повышения компетентности персонала в области систем качества. Предлагается применять корпоративные знания предприятия, в том числе модели и алгоритмы искусственного интеллекта. Корпоративные знания формируются на основе формирования и обработки документации, опроса квалифицированных специалистов и интеллектуального анализа данных о реализации бизнес-процессов. Разработана онтология управления качеством, созданы правила принятия решений и спрогнозированы результаты совершенствования системы управления качеством с использованием нейро-нечёткой сети. Использование этих инструментов искусственного интеллекта позволит сформировать единую терминологию для обеспечения однозначного восприятия информации всеми участниками процесса и использования базы знаний для поддержки принятия решений. Предлагается использование инструментов управления качеством для повышения эффективности принимаемых решений – продукционных правил и нейронных сетей.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, управление качеством, онтология, система нечёткого вывода, нейро-нечёткое моделирование.

Цитирование: Черняховская Л.Р., Мухаметьянова Р.И., Сиротина А.А. Улучшение системы менеджмента качества промышленных предприятий с помощью использования корпоративных знаний // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №2(48). С.274-281. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-8-274-281.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00937 «Методы и модели интеллектуальной поддержки принятия решений в управлении программными проектами, реализуемыми в среде промышленных предприятий».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рисунки и таблицы

Рисунок 1 – Изменения значений факторов, влияющих на управление качеством

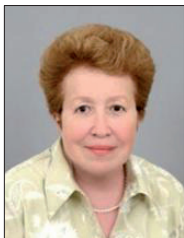
Рисунок 2 – Визуализация нечёткой поверхности вывода рассматриваемой модели для управления рисками и управления персоналом

Таблица 1 – Примеры правил для системы нечёткого вывода

Список источников

- [1] **ИСО 9001:2015.** Система менеджмента качества. <https://www.iso.org/standard/62085.html>.
- [2] **ГОСТ Р ИСО 9000:2015** Система менеджмента качества. Основные принципы и лексика. М.: Стандартинформ, 2015. 51 с.
- [3] **ИСО 14001.** Системы экологического менеджмента. Требования с руководством по использованию. <https://www.iso.org/standard/60857.html>.
- [4] **Люгер Д.Ф.** Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. 4-е издание. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс». 2003. 864 с.
- [5] **Fiorentini X., Rachuri S., Mani M., Fenves S.J., Sriram R.D.** An Evolution of Description Logic for the Development of Product Models, NISTIR 7481, National Institute of Standards and Technology. 2008, 24 p.
- [6] **Доброва Б.В., Иванов В.В., Лукашевич Н.В., Соловьев В.Д.** Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 173 p.
- [7] **Болотова Л.С.** Системы искусственного интеллекта: на основе моделей знаний и технологий. М.: Финансы и статистика, 2012. 664 с.
- [8] **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
- [9] **Черняховская Л.Р., Гвоздев В.Е., Мухаметьянова Р.И.** Интеллектуальное кадровое обеспечение растущего промышленного предприятия. Информационно-математические технологии в науке и управлении. Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, 2019. С.30-37.
- [10] **Тепман Л.Н.** Управление качеством / ред. В.А. Швандар. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2015. 352 с.
- [11] **Santos R., Calado J., Abreu A.** An Approach based on Fuzzy Logic, to Improve of Quality Management on Research and development Centure. ICVISP 2019: 3rd International Conference on Vision, Image and Signal Processing, 3 p.
- [12] **Zadeh I.** Fuzzy logic, neural networks and soft computing. *Communication on ACM*-1994; 37(3): 77-84.
- [13] **Борисов В.В., Круглов В.В., Федюлов А.С.** Нечёткие модели и сети. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 247 с.

Сведения об авторах



Черняховская Лилия Рашитовна, 1947 г. рождения. Окончила Уфимский авиационный институт в 1970 г., д.т.н. (2004). Профессор кафедры технической кибернетики Уфимского университета науки и технологии. В списке научных трудов около 150 работ в области системного анализа, интеллектуальных информационных систем и систем поддержки принятия решений. lrchern@yandex.ru.

Мухаметьянова Регина Ильфатовна, 1990 г. рождения. В 2016 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет. Преподаёт в Уфимском университете науки и технологии (кафедра технической кибернетики). Соавтор около 15 научных статей и тезисов в области системного анализа, систем поддержки принятия решений и управления проектами. lequel@mail.ru. ✉



Сиротина Алена Алексеевна, 1997 г. рождения. В 2021 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности управление качеством. Заместитель начальника отдела охраны труда, экологии, промышленной и пожарной безопасности ООО «Инд Тимбер». Тема исследования – система менеджмента качества лесоперерабатывающего предприятия. sirotinaalenushk@mail.ru.

Поступила в редакцию 08.09.2022, после рецензирования 22.02.2023. Принята к публикации 3.04.2023.

Метод извлечения знаний и навыков/компетенций из текстов требований вакансий

© 2023, И.Е. Николаев

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация

Анализ требований вакансий на рынке труда показывает, что они представляют собой многоуровневые языковые конструкции из нескольких слов со сложными семантическими связями. Целью исследования является разработка метода извлечения коротких текстов знаний и навыков/компетенций из текстов требований, имеющих сложную организационную структуру. Метод состоит в дополнении структуры сложных предложений новыми связями посредством дообученной на текстах онлайн-вакансий нейросетевой модели *BERT* и перехода от сложного текста к набору простых комбинаций слов. Показан процесс дообучения нейросетевых моделей *BERT* от лаборатории по искусственному интеллекту Сбербанка на текстах онлайн-вакансий. Реализованы два механизма добавления новых связей между словами требований с учётом знаний из предметной области: линейный и через дополнение дерева синтаксического разбора. Проведён сравнительный анализ для нескольких комбинаций инструментов. Наилучший результат показала комбинация: дообученная модель *BERT* плюс *deeppavlov_syntax_parser* плюс линейный способ дополнения связей. Применимость метода проверена на текстовом корпусе требований онлайн-вакансий. Предложенный метод показал более высокую эффективность, чем подход, основанный на правилах, который предполагает использование формальных правил и правил грамматики для анализа естественного языка. Использование метода позволяет оперативно определять ключевые изменения потребностей рынка труда на уровне текстов требований отдельных знаний и навыков/компетенций.

Ключевые слова: нейросетевые модели, дообучение языковых моделей, синтаксический анализатор, синтаксические деревья, рынка труда, компетенции, вакансии.

Цитирование: Николаев И.Е. Метод извлечения знаний и навыков/компетенций из текстов требований вакансий // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №2(48). С.282-293. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-282-293.

Введение

Динамичное развитие многих отраслей экономики, изменение форм занятости и переход многих сфер деятельности на удалённый формат работы, замена живого общения на взаимодействие с цифровыми устройствами, а также изменения, происходящие в сфере образования и подготовки кадров, существенно изменяют структуру глобального рынка труда.

Эти изменения приводят к тому, что особую значимость приобретают исследования, направленные на создание инструментов оперативного мониторинга рынка труда на уровне отдельных знаний, навыков и компетенций на основе анализа открытых данных систем поиска и подбора работников с помощью Интернет-ресурсов, и в первую очередь текстовой информации из описаний вакансий.

Разработка и внедрение таких инструментов позволит оперативно определять ключевые изменения потребностей рынка труда, повысить эффективность управленческих решений по созданию образовательных программ подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров, помогут всем участникам рынка точнее оценивать существующие и зарождающиеся тенденции на рынке труда.

В контексте требований к вакансиям можно использовать термин «сущность» для обозначения того, что является наиболее важным аспектом требований к кандидатам. Как правило, требования вакансии представляют собой набор таких сущностей, которые можно разделить на *знания, навыки и компетенции*, необходимые для выполнения задач профессиональной деятельности.

Знание – это сущность, которая представляет собой наличие у человека информации об определённой области знаний. Знание может быть абстрактным и теоретическим, в отличие, например, от навыков. Примером знания может служить «знание программирования на языке *Java*», которое может не применяться на практике, но при этом является важным фактором при найме на должность разработчика программного обеспечения.

Навыки – это сущность, которая описывает уровень умения человека выполнять определённые действия в рамках определённой области знаний. Навыки могут быть связаны с конкретными технологиями или инструментами, их наличие свидетельствует о том, что кандидат способен выполнить задачу. Например, «навыки программирования на языке *Java*» являются конкретным умением разрабатывать программное обеспечение на этом языке.

Компетенции – это сущность, которая описывает способность человека применять знания и навыки в профессиональной деятельности. Компетенции включают в себя комплекс навыков, без которых невозможно эффективное выполнение работы. Компетенции могут включать коммуникационные навыки, умение работать в команде, аналитические навыки, способность к принятию взвешенных решений в сложных ситуациях и др. [1].

Разработка методов выделения сущностей *знаний, навыков и компетенций* из текстов требований вакансий играет ключевую роль при переходе от статистического анализа рынка труда к анализу на уровне отдельных сущностей. В статье отсутствует разделение между сущностями *навыки* и *компетенции*, т.к. на уровне коротких текстов данные категории практически неразличимы.

Для выделения и анализа сущностей, связанных с требованиями к кандидатам в вакансиях, можно использовать таксономии и онтологии. Таксономия — это иерархия понятий, которые логически связаны между собой. Онтология — это модель знаний, которая описывает концептуальные отношения между объектами в предметной области (ПрО).

Существующие методы извлечения сущностей способны её обнаружить, если искомая сущность представлена в исходном тексте в виде подряд идущих слов. Данное обстоятельство снижает эффективность использования таких методов на текстах требований рынка труда, т.к. в большинстве случаев такие тексты представляют собой сложно организованные конструкции [2].

В настоящее время перспективным направлением анализа текстов на естественном языке являются нейросетевые модели, построенные на трансформерах с использованием механизма внимания, за счёт которого такие модели получили способность выявлять взаимосвязи между частями текста [5]. Первой такой моделью стала языковая модель *BERT* (англ. *Bidirectional Encoder Representations from Transformers*) [6]. *BERT* предназначена для предобучения языковых представлений с целью их последующего применения в различных задачах обработки естественного языка. Особенность *BERT* заключается в том, что эта модель учитывает контекст для всех слов и способна успешно работать с долгосрочными зависимостями в тексте и долго удерживать информацию о контексте для каждого слова [7].

В настоящее время *BERT* и её производные (*RoBERTa* [8], *GPT* [9], *T5* [10], *XLNet* [11]) показывают наилучший результат на большинстве задач обработки и анализа текстов на естественных языках и превосходит нейросетевые модели предыдущих поколений (*word2vec*, *LSTM* и др.). Модели на трансформерах универсальны и способны извлекать из текста признаки, полезные для решения множества задач текстового анализа. К недостаткам таких мо-

делей можно отнести требовательность к ресурсам и длительный процесс обучения. Их эффективность может быть улучшена путём дообучения существующих моделей на текстах определённой ПрО. В работах [12] показано, что дообучение моделей существенно повышает качество анализа текстов для соответствующих ПрО.

Помимо нейросетевых моделей для извлечения структурированной информации из текстов на естественном языке также используются синтаксические анализаторы и анализаторы на основе контекстно-свободных грамматик.

На конференции по компьютерной лингвистике были проведены соревнования по полной грамматической разметке текстов на русском языке [15]. По результатам анализа соревнования можно сделать вывод, что наибольший интерес для практического применения представляет синтаксический парсер от исследовательской группы *DeepPavlov* [16]. Данная модель не чувствительна к пунктуации, производит выходные данные в формате *CONLL-U* и обучалась на корпусах *Universal Dependency* [17].

Инструментами, позволяющими извлекать структурированную информацию из текстов на естественном языке, являются анализаторы контекстно-свободных грамматик, среди которых для русского языка можно выделить [18, 19].

Перечисленные инструментальные средства зарекомендовали себя при решении задач обработки и анализа текстов на естественных языках, но имеют ряд ограничений. Например, при построении синтаксических деревьев не всегда способны находить все смысловые связи между токенами предложения, а разработка и постоянная актуализация правил на контекстно-свободных грамматиках требует больших человеческих ресурсов.

В данной работе предлагается метод извлечения знаний и навыков/компетенций из текстов требований онлайн-вакансий путём объединения потенциала перечисленных подходов и технологий.

1 Алгоритм извлечения знаний и навыков/компетенций из текстов требований вакансий

Метод состоит в переходе от сложных предложений к набору простых комбинаций слов путём добавления дополнительных связей между словами. Рассматриваются два подхода: на основе линейной комбинации слов; путём расширения дерева синтаксического разбора сложного предложения новыми связями. Схема алгоритма предлагаемого метода приведена на рисунке 1.

Этап 1. Блоки 1.1-1.3. Подготовка корпуса текстов примеров знаний и навыков/компетенций и правил для извлечения этих категорий сущностей на основе контекстно-свободных грамматик.

Этап 2. Блок 2.1. Сбор текстов требований к вакансиям с сайта *headhunter.ru* из категории «Информационные технологии, Интернет, телеком», на основе *html* разметки.

Этап 3. Блоки 3.1-3.2. Предполагается, что распространение информации в тексте, как правило, происходит слева направо, поэтому получение новых комбинаций токенов в предложении можно представить в виде комбинации токенов, где каждый следующий токен должен иметь порядковый номер строго больше предыдущего (см. рисунок 2). Каждый текст требования разбивается на отдельные токены, которые нумеруются в порядке следования, а далее в блоке 3.2 происходит получение линейных комбинаций токенов.

Этап 4. Блоки 4.1-4.5. Дополнение дерева синтаксического разбора рёбрами между токенами, которые согласно дообученной на текстах вакансий модели могут иметь высокую вероятность совместного использования в ПрО.

В блоке 4.1 происходит дообучение языковой модели на текстах вакансий; в этом блоке модель учится понимать особенности текстов ПрО.

В блоке 4.2 происходит построение дерева синтаксического разбора для текстов требований вакансий. Два примера дополненных деревьев синтаксического разбора представлены на рисунке 3 для текста требования «Описание, моделирование (желательно Bizagi¹) и/или оптимизация бизнес-процессов» (см. только прямые рёбра; а) - *spacy_syntax_parser*, б) - *deeppavlov_syntax_parser*).

В блоке 4.3 на основе дообученной модели *BERT* и инструмента заполнения маски происходит добавление новых рёбер в дерево синтаксического разбора, полученное в блоке 4.2. Заполнение маски представляет собой инструмент автозаполнения пропущенных токенов в предложении. В этой задаче токен в предложении заменяется специальной маской «[MASK]», и модель должна предсказать наиболее вероятный токен, которым можно заменить маску «[MASK]», основываясь на контексте предложения, заданном другими словами в предложении. Инструмент заполнения маски используется в качестве основного в процессе дообучения модели, а также при эмпирической оценке качества полученных моделей.



Рисунок 1 - Схема алгоритма извлечения знаний и навыков/компетенций из текстов требований вакансий

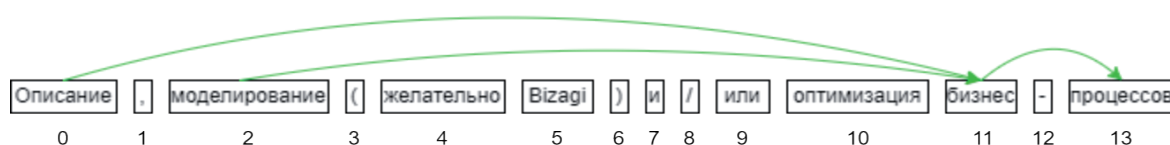
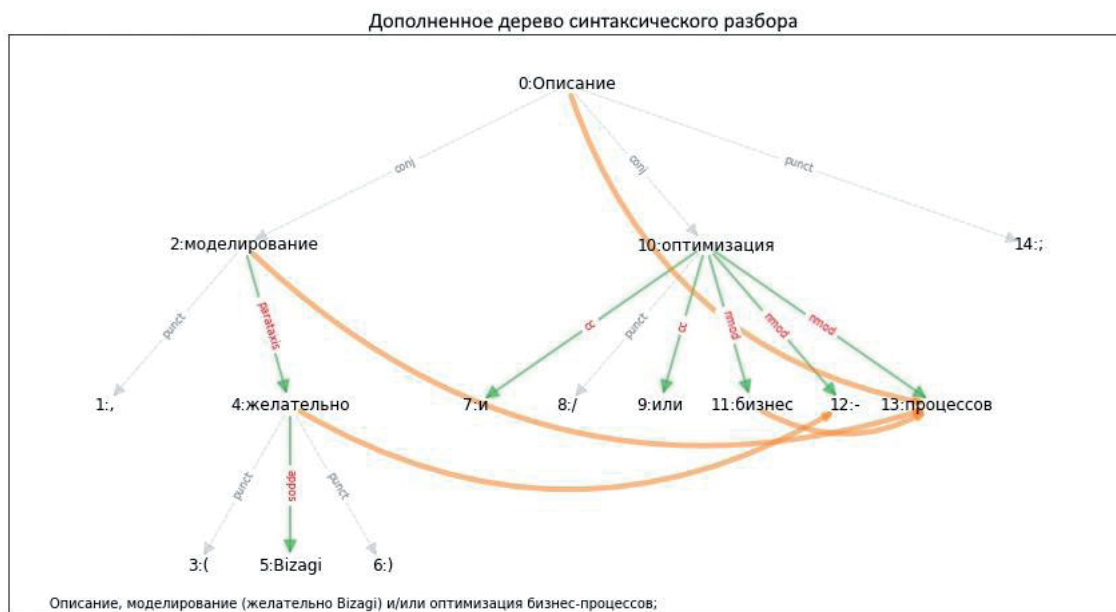


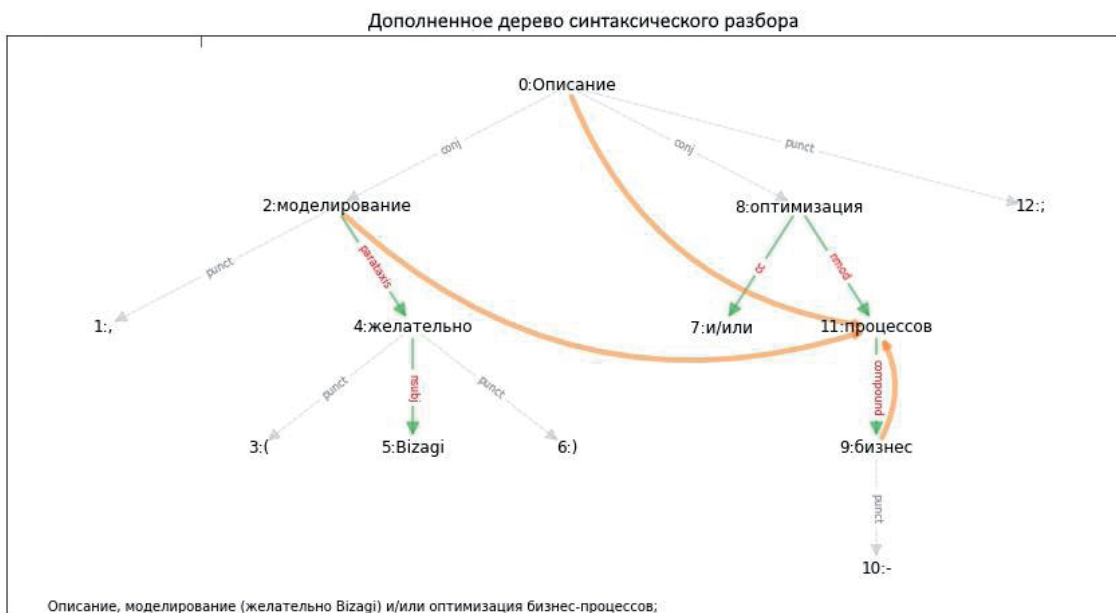
Рисунок 2 – Схема получения линейных комбинаций токенов

Для добавления в дерево новых рёбер попарно рассматриваются узлы дерева, не соединённые ребром. Формируются пары таких узлов. Далее поочерёдно маской закрываются узел 1 и узел 2 в паре, и если оба варианта считаются дообученной моделью с ненулевой вероятностью, то можно считать связь между двумя этими узлами *устойчивой* и добавить новое ребро между парой соответствующих узлов. Иллюстрация работы блока представлена на рисунке 3 (см. изогнутые рёбра). На рисунках 3а и 3б видно, как дообученная модель добавляет новые рёбра в деревья синтаксического разбора.

¹ Bizagi – одна из наиболее популярных автоматизированных систем управления бизнес-процессами. <https://www.bizagi.com>.



а)



б)

Рисунок 3 – Примеры дополненных деревьев синтаксического разбора новыми связями (рёбрами) на основе дообученной модели *BERT* на текстах вакансий: а) *spacy_syntax_parser*, б) *deeppavlov_syntax_parser*

Блок 4.4. Случайным блужданием отбираются пути на графе длиной от 1 до 5 токенов, и на их основе формируются комбинации токенов.

Этап 5. Блок 5. Комбинации токенов от блоков 3 и 4.1 проходят через подготовленный парсер на основе контекстно свободных грамматик, который на основе правил извлекает тексты *знаний* и *навыков/компетенций*. В дальнейшем вместо парсера на основе контекстно свободных грамматик может использоваться модель *BERT*, дообученная на задаче извлечения именованных сущностей *знаний* и *навыков/компетенций*.

2 Подготовка правил для *yargy*-парсера

2.1 Подготовка корпуса текстов *знаний* и *навыков/компетенций*

В процессе подготовки размеченного корпуса текстов *знаний* и *навыков/компетенций* были и отобраны два основных ресурса: база *ESCO* (разметка на *знания* и *навыки/компетенции* уже присутствует по умолчанию, см. рисунок 1); база ключевых знаний и навыков из параметра *key_skills* вакансий *headhunter.ru* (таблица 1). Во втором корпусе текстов отсутствовала разметка текстов на *знания* и *навыки/компетенции*, что потребовало дополнительной разметки этих данных экспертом (в таблице помечены *). Примеры текстов *знаний* и *навыков/компетенций* из двух корпусов текстов представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Структура корпуса текстов *знаний* и *навыков/компетенций*

Ресурс	Количество уникальных текстов	Количество текстов знаний	Количество текстов навыков/компетенций
<i>ESCO</i>	9936	2411	7525
<i>key_skills hh.ru</i>	9635	4401 *	5234 *
Итого	19531	6812	12759

Таблица 2 – Примеры текстов *знаний* и *навыков/компетенций*

Тип	Текст	Ресурс
знание	<i>ASP.NET 2.0</i>	<i>ESCO</i>
знание	<i>Adobe Illustrator CC</i>	<i>ESCO</i>
знание	яндекс.Директ	<i>hh.ru key_skills</i>
знание	<i>numPy</i>	<i>hh.ru key_skills</i>
знание	1С-Битрикс	<i>hh.ru key_skills</i>
навык/компетенция	анализировать бизнес-требования	<i>ESCO</i>
навык/компетенция	диагностика потребностей клиента	<i>ESCO</i>
навык/компетенция	документировать разработку	<i>hh.ru key_skills</i>
навык/компетенция	разработка распределенных систем	<i>hh.ru key_skills</i>
навык/компетенция	написание кода	<i>hh.ru key_skills</i>

2.2 Разработка правил для *yargy*-парсера

Были подготовлены правила извлечения текстов *знаний* и *навыков/компетенций*. Правило для определения *знаний* может быть самостоятельным правилом и опциональным элементом, встраиваемым в правило определения *навыков/компетенций*. Структура правил для извлечения *навыков/компетенций* представлена на рисунке 4.

3 Дообучение модели *BERT* на текстах онлайн-вакансий

Для дообучения модели *BERT* собраны тексты вакансий с сайта *headhunter.ru* из отрасли «Информационные технологии» за последние 10 лет (1,8 миллиона). Тексты вакансий очищены от дублей, от английских текстов и от *html*-разметки. Для процесса дообучения языковых моделей на текстах онлайн-вакансий случайным образом отобраны 300 тысяч текстов. Были отобраны две языковые модели от проектной группы *Sberbank-AI*: *sberbank-ai/ruBert-base* (178 миллионов параметров), *sberbank-ai/ruBert-large* (427 миллионов параметров).

В качестве основного метода обучения выбран метод моделирование маскированного языка (*MLM*, *Masked-Language Modeling*). В рамках этого метода маскировалось 15% токенов исходного текста, которые модель училась предсказывать.

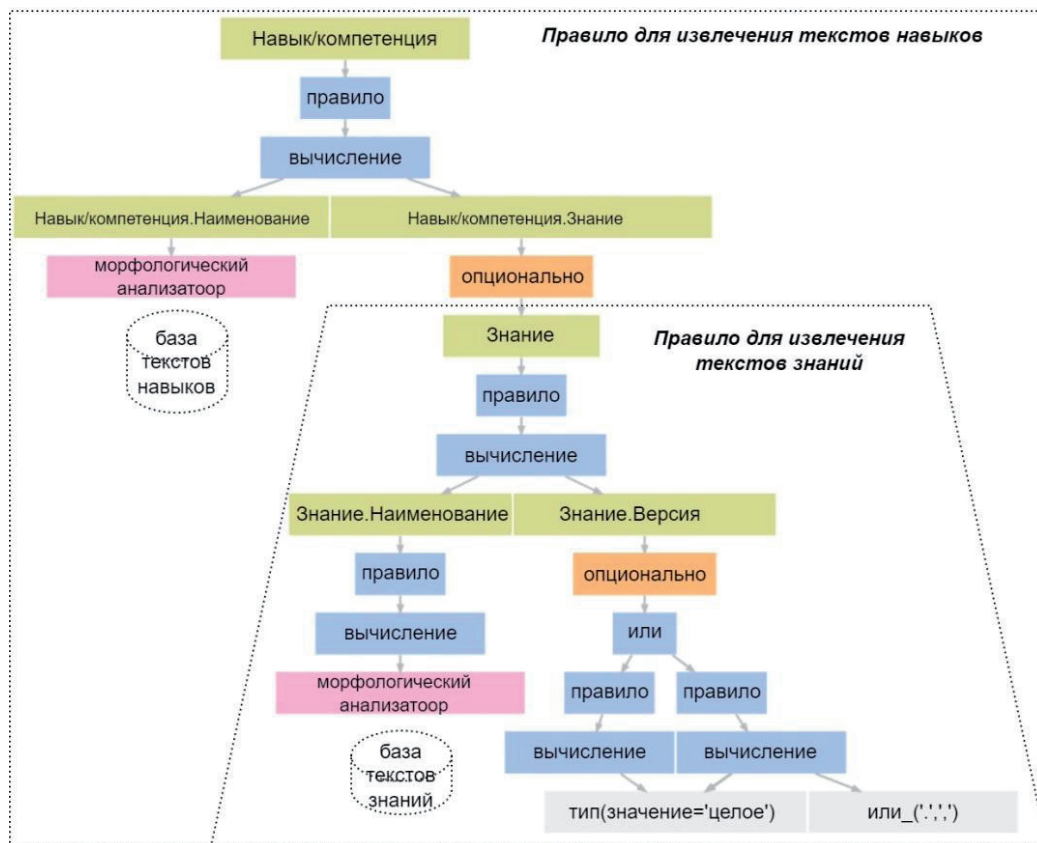


Рисунок 4 – Структура правила *yargy*-парсера для извлечения текстов *навыков/компетенций* (опционально включает в себя правило для извлечения *знаний*)²

В качестве основной метрики оценки качества языковых моделей использовалась перплексия [20]. Эта метрика - одна из наиболее распространённых метрик для оценки языковых моделей, определяется как экспоненциальное среднее отрицательное логарифмическое правдоподобие последовательности. Если есть токенизированная последовательность $(x_0, x_1, \dots, x_t)$, то перплексия для X определяется по формуле

$$PPL(X) = \exp \left\{ -\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \log p_{\theta}(x_i | x_{<i}) \right\}, \quad (1)$$

где $\log p_{\theta}(x_i | x_{<i})$ - логарифмическая вероятность i -го токена, обусловленная предыдущими токенами $x_{<i}$. Интуитивно это можно рассматривать как оценку способности модели равномерно прогнозировать среди набора заданных токенов в корпусе.

Дообучение моделей производилось по методу *MLM* в течение пяти эпох (1 эпоха – 30000 шагов, см. рисунок 5). Далее процесс дообучения моделей был расширен до 7 эпох (шаги 150000-210000 на рисунке 5), но это не привело к существенному улучшению показателя перплексии.

Для оценки качества обучения модели использовался инструмент заполнения маски. В таблице 3 приведены результаты заполнения маски базовой модели и модели, которая прошла процесс дообучения на текстах вакансий. Из таблицы 3 видно, что модель, не прошедшая процесс дообучения, справляется с задачей заполнения маски с использованием специфической для данной Про лексики хуже, чем дообученная модель. Дообученная модель даёт более релевантные ответы с учётом контекста текстов вакансий. В дальнейших экспериментах использовалась только базовая дообученная модель *sberbank-ai-base*.

² Рисунок подготовлен автоматическими средствами библиотеки *natasha.yargy* [19].

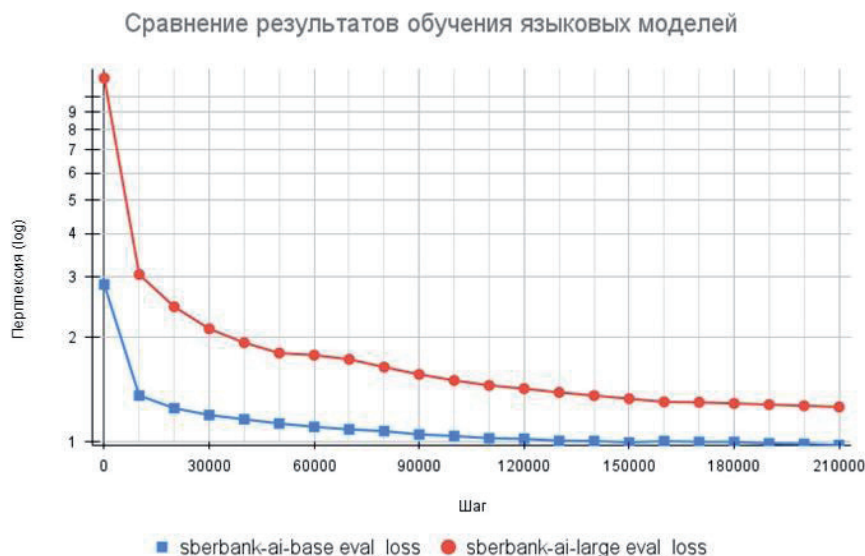


Рисунок 5 – Изменение перплексии в процессе обучения моделей на текстах вакансий

Таблица 3 – Результаты оценки моделей с помощью инструмента заполнения маски на примерах

Пример 1: «сетевой [MASK]»		Пример 2: «выявлять [MASK]»	
Базовая модель без дообучения	Модель после дообучения	Базовая модель без дообучения	Модель после дообучения
сетевой.	сетевой трафик	выявлять.	выявлять неисправность
сетевой!	сетевой мониторинг	выявлять!	выявлять ошибки
сетевой "	сетевой Интернет	выявлять?	выявлять неисправности
сетевой)	сетевой контроль	выявлять ...	выявлять неполадки
сетевой »	сетевой безопасности	выявляться	выявлять закономерности
сетевой интернет	сетевой пакет	выявлять :	выявлять уязвимости
сетевой?	сетевой интернет	выявлять и	выявлять информацию
сетевой суд	сетевой опыт	выявлять »	выявлять их
сетевой фронт	сетевой рост	выявлять "	выявлять проблемы
сетевой анализ	сетевой инженер	выявлять,	выявлять ответственных

4 Описание эксперимента

Этапы проведения эксперимента соответствуют этапам алгоритма из раздела 1.

Этап 1. Для проведения эксперимента из текстов вакансий были отобраны 2000 текстов требований длиной от 8 до 15 токенов, т.к. в текстах с большим количеством токенов, как правило, присутствует большое количество скрытых связей между токенами, что затрудняет извлечение коротких сущностей *знаний* и *навыков/компетенций* из таких текстов.

Этап 2. Тексты требований с помощью синтаксических анализаторов представляются в виде набора токенов и связей между ними (как показано на рисунках 2 и 3). В этом же блоке для каждого текста требований строятся деревья синтаксического разбора.

- *spacy_syntax_parser* - токенизатор и синтаксический анализатор *spacy* на модели для русского языка *ru_core_news_lg*.
- *deeppavlov_syntax_parser* - токенизатор и синтаксический анализатор *deeppavlov* на модели для русского языка *syntax_ru_syntagrus_bert*.

Этап 3. Добавление новых связей между токенами.

В блоке 3.1 на рисунке 1 добавляются все возможные связи между парами токенов, где номер первого токена в связи строго меньше номера второго токена.

В блоке 4.3 на рисунке 1 для каждой пары токенов, несоединённых в дереве синтаксического разбора, с помощью языковой модели и инструмента заполнения маски проверяется необходимость добавления связи между этими токенами. Для соединённых пар токенов проверяется устойчивость связи и её направление.

Проверка происходит следующим образом. Выбирается пара токенов, сначала маской закрывается первый из них и проверяется вероятность использования данного токена в данной паре с помощью языковой модели. На выходе получается вероятность встречаемости данного токена в этой паре на этом месте; если она не нулевая, то добавляется связь от первого токена ко второму. Далее то же повторяется со вторым токеном в паре.

Этап 4. С учётом всех добавленных связей и их направлений между токенами получают комбинации от 1 до 5 токенов - простые предложения.

Этап 5. С помощью правил, описанных для *yargy-парсера*, в получившихся комбинациях токенов отыскиваются полные совпадения сущностей *знаний* и *навыков/компетенций*. *Yargy-парсер* способен, имея в базе всего один вариант некоторой сущности, находить все её возможные словоформы, в отличие, например, от регулярных выражений.

5 Оценка метода и результаты

Для оценки метода для каждого текста требований экспертом были размечены сущности *знаний* и *навыков/компетенций*, которые содержатся в этом требовании. Для каждого текста требований экспертом размечался полный набор содержащихся в этом тексте сущностей *знаний* и *навыков/компетенций*. Примеры такой разметки приводятся в таблице 4.

Таблица 4 – Пример экспертной разметки текста

Текст требования	Сущности	Категория
Описание, моделирование (желательно <i>Bizagi</i>) и/или оптимизация бизнес-процессов;	Описание бизнес-процессов	навык/компетенция
	Описание процессов	навык/компетенция
	Моделирование бизнес-процессов	навык/компетенция
	Моделирование процессов	навык/компетенция
	Оптимизация бизнес-процессов	навык/компетенция
	Оптимизация процессов	навык/компетенция
	<i>Bizagi</i>	знания
Чувство вкуса и стиля	Чувство вкуса	навык/компетенция
	Чувство стиля	навык/компетенция
Разработка <i>web</i> -ориентированных, распределённых приложений на языке <i>Java</i> с применением технологии <i>Adobe Flex</i> на стороне клиента.	Разработка <i>web</i> -ориентированных приложений	навык/компетенция
	Разработка <i>web</i> -приложений	навык/компетенция
	Разработка распределённых приложений	навык/компетенция
	<i>Adobe Flex</i>	знания
	Разработка приложений на <i>Java</i>	навык/компетенция
	<i>Java</i>	знания

При проведении эксперимента были подготовлены восемь комбинаций моделей, инструментов и методов (см. таблицу 5 с результатами). На заключительном этапе по метрике *f1* сравнивалось количество извлечённых сущностей *знаний* и *навыков/компетенций* по предложенному методу с экспертной разметкой. Из таблицы 5 видно, что все проанализированные инструменты превзошли базовый вариант извлечения с помощью правил *yargy-парсера*, а наилучший результат получен для комбинации: дообученная *BERT* модель + *deeppavlov_syntax_parser* + линейный способ дополнения связей, которая показала 83% извлечения по метрике *f1* и превзошла базовый вариант на основе правил на 52%.

Таблица 5 – Результаты сравнения различных комбинаций инструментов в извлечении знаний и навыков /компетенций

Токенизатор и синтаксический парсер	Схема получения комбинаций токенов	Модель	f1
		<i>yargy-napcep (baseline)</i>	0.31
<i>spacy_syntax_parser</i>	линейная комбинация		0.65
<i>spacy_syntax_parser</i>	дополнение дерева	<i>sberbank-ai-base</i>	0.33
<i>deeppavlov_syntax_parser</i>	линейная комбинация		0.58
<i>deeppavlov_syntax_parser</i>	дополнение дерева	<i>sberbank-ai-base</i>	0.35
<i>spacy_syntax_parser</i>	линейная комбинация		0.81
<i>spacy_syntax_parser</i>	дополнение дерева	<i>sberbank-ai-base-finetune</i>	0.69
<i>deeppavlov_syntax_parser</i>	линейная комбинация		0.83
<i>deeppavlov_syntax_parser</i>	дополнение дерева	<i>sberbank-ai-base-finetune</i>	0.71

Заключение

Предложен и экспериментально проверен метод извлечения коротких текстов знаний и навыков из текстов требований онлайн-вакансий путём перехода от сложных предложений к набору простых комбинаций токенов через дополнение структуры сложных предложений новыми связями дообученной на текстах онлайн-вакансий нейросетевой моделью *BERT*. Применимость метода показана на текстовом корпусе требований вакансий.

Список источников

- [1] ESCO — многоязычная классификация европейских навыков, компетенций и профессий. <https://esco.ec.europa.eu/en>.
- [2] *Burtsev M., Anh Le.* A Deep Neural Network Model for the Task of Named Entity Recognition. International Journal of Machine Learning and Computing. 2019.
- [3] *Маслова М.А., Дмитриев А.С., Холкин Д.О.* Методы распознавание именованных сущностей в русском языке: Инженерный вестник Дона, 2021. № 7(79).
- [4] *Хакимова Е.М.* Сложные предложения в современном русском языке: ортологический аспект. Вестник ЮУрГУ. Серия: Лингвистика. 2013.
- [5] *Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A., Polosukhin I.* Attention is all you need. In: Advances in neural information processing systems. 2017. 5998-6008.
- [6] *Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K.* Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805.
- [7] *Ezen-Can A.* A Comparison of LSTM and BERT for Small Corpus. 2020. arXiv preprint arXiv:2009.05451.
- [8] *Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Stoyanov V.* Roberta: A robustly optimized bert pretraining approach. 2019. arXiv preprint arXiv:1907.11692.
- [9] *Brown T., Mann B., Ryder N., Subbiah M., Kaplan J.D., Dhariwal P., Amodei D.* Language models are few-shot learners. Advances in neural information processing systems, 2020, 33, 1877-1901.
- [10] *Raffel C., Shazeer N., Roberts A., Lee K., Narang S., Matena M., Liu P.J.* Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer. The Journal of Machine Learning Research, 2020, 21(1), 5485-5551.
- [11] *Lample G., Conneau A.* Cross-lingual language model pretraining. 2019. arXiv preprint arXiv:1901.07291.
- [12] *Lee J., Yoon W., Kim S., Kim D., Kim S., So C.H., Kang J.* BioBERT: a pre-trained biomedical language representation model for biomedical text mining. Bioinformatics, 2020, 36(4), 1234-1240.
- [13] *Chalkidis I., Fergadiotis M., Malakasiotis P., Aletras N., Androutsopoulos I.* LEGAL-BERT: The muppets straight out of law school. 2020. arXiv preprint arXiv:2010.02559.
- [14] *Beltagy I., Lo K., Cohan A.* SciBERT: A pretrained language model for scientific text. 2019. arXiv preprint arXiv:1903.10676.
- [15] *Ляшевская О.Н., Шаврина Т.О., Трофимов И.В., Власова Н.А.* GramEval 2020 Дорожка по автоматическому морфологическому и синтаксическому анализу русских текстов. Международная конференция Dialogue. 2020, 553-569.
- [16] Синтаксический парсер *DeepPavlov*. <http://docs.deeppavlov.ai/en/master/features/models/syntaxparser.html>

- [17] **Zeman D.** Universal Dependencies 2.5, LINDAT/CLARIN digital library at the Institute of Formal and Applied Linguistics (ÚFAL), Faculty of Mathematics and Physics, Charles University. 2019.
- [18] Томита-парсер. Технологии Яндекса. <https://yandex.ru/dev/tomita/>.
- [19] Natasha/yargy: Извлечение фактов на основе правил для русского языка. <https://github.com/natasha/yargy>.
- [20] **Meister C., Cotterell R.** Language model evaluation beyond perplexity. 2021. arXiv preprint arXiv:2106.00085.

Сведения об авторе

Николаев Иван Евгеньевич, 1986 г. рождения. Окончил Южно-Уральский государственный университет в 2008 г. Старший преподаватель кафедры информационных технологий и экономической информатики Института информационных технологий Челябинского государственного университета. ORCID: 0000-0002-9686-2435. ivan_nilolaev@csu.ru.



Поступила в редакцию 03.05.2023, после рецензирования 12.06.2023. Принята к публикации 19.06.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-282-293

Knowledge and skills extraction from the job requirements texts

© 2023, I.E. Nikolaev

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract

The analysis of the requirements for vacancies in the labor market shows that they are multi-level language constructions of several words with complex semantic relationships. The aim of the research is to develop a method for extracting short texts of knowledge and skills from texts of job requirements that have a complex organizational structure. The method consists in supplementing the structure of complex sentences with new relationships by means of a BERT neural network model trained on the texts of online vacancies and moving from a complex text to a set of simple word combinations. The process of additional training (finetuning) of BERT neural network models from the Sberbank AI laboratory on the texts of online vacancies is shown. Two mechanisms for adding new links between requirements words, taking into account knowledge from the subject area, are implemented: linear and through the addition of the parsing tree. In the course of the experiment, a comparative analysis was carried out for several combinations of the listed tools. The combination that showed the best result was 'the BERT + deeppavlov_syntax_parser model + a linear method of adding links'. The applicability of the method was demonstrated on the text corpus of online job requirements. The proposed method has shown higher efficiency than the rule-based approach, which involves the use of formal rules and grammar rules for natural language analysis. Using the method will allow you to quickly identify the key changes in the needs of the labor market at the level of requirements texts of individual knowledge and skills.

Key words: neural network models, additional training of language models, parser, syntax trees, labor market, skills, vacancies.

For citation: Nikolaev I.E. Knowledge and skills extraction from the job requirements texts [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(2): 282-293. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-282-293.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Scheme of the algorithm for extracting knowledge and skills/competences from the job requirements texts

Figure 2 – Scheme for obtaining linear combinations of tokens

Figure 3 – Examples of augmented parsing trees with new connections (edges) based on the retrained BERT model on job vacancies texts: a) spacy_syntax_parser, b) deeppavlov_syntax_parser

Figure 4 – The structure of the yargy-parser rule for extracting skills/competence texts (optionally includes a rule for extracting knowledge)

Figure 5 – Perplexity change in the process of training models on job vacancy texts

Table 1 – The structure of the text corpus of knowledge and skills/competencies

Table 2 – Examples of knowledge and skills/competence texts

Table 3 – Model evaluation results with the mask fill tool by example

Table 4 – An example of expert text markup

Table 5 – Results of comparing different combinations of tools in extracting knowledge and skills/competences

References

- [1] ESCO is a multilingual classification of European skills, competencies and occupations. <https://esco.ec.europa.eu/en>.
- [2] **Burtsev M, Ahn L.** Deep neural network model for the problem of named objects recognition. *International Journal of Machine Learning and Computing*. 2019.
- [3] **Maslova MA, Dmitriev AS, Kholkin DO.** Named Entity Recognition Methods in Russian language: Don Engineering Bulletin, 2021. No. 7(79).
- [4] **Khakimova EM.** Compound sentences in modern Russian language: the orthological aspect. *Bulletin of SUSU. Series: Linguistics*. 2013.
- [5] **Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, Uszkoreit J, Jones L, Gomez A, Polosukhin I.** Attention is all you need. In: *Advances in neural information processing systems*. 2017. 5998-6008.
- [6] **Devlin J, Chang MW, Lee K, Toutanova K.** Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *arXiv preprint arXiv:1810.04805*.
- [7] **Ezen-Can A.** A Comparison of LSTM and BERT for Small Corpus. 2020. *arXiv preprint arXiv:2009.05451*.
- [8] **Liu Y, Ott M, Goyal N, Du J, Joshi M, Chen D, Stoyanov V.** Roberta: A robustly optimized bert pretraining approach. 2019. *arXiv preprint arXiv:1907.11692*.
- [9] **Brown T, Mann B, Ryder N, Subbiah M, Kaplan JD, Dhariwal P, Amodei D.** Language models are few-shot learners. *Advances in neural information processing systems*, 2020, 33, 1877-1901.
- [10] **Raffel C, Shazeer N, Roberts A, Lee K, Narang S, Matena M, Liu PJ.** Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer. *The Journal of Machine Learning Research*, 2020, 21(1), 5485-5551.
- [11] **Lample G, Conneau A.** Cross-lingual language model pretraining. 2019. *arXiv preprint arXiv:1901.07291*.
- [12] **Lee J, Yoon W, Kim S, Kim D, Kim S, So CH, Kang J.** BioBERT: a pre-trained biomedical language representation model for biomedical text mining. *Bioinformatics*, 2020, 36(4), 1234-1240.
- [13] **Chalkidis I, Fergadiotis M, Malakasiotis P, Aletras N, Androutsopoulos I.** LEGAL-BERT: The muppets straight out of law school. 2020. *arXiv preprint arXiv:2010.02559*.
- [14] **Beltagy I, Lo K, Cohan A.** SciBERT: A pretrained language model for scientific text. 2019. *arXiv preprint arXiv:1903.10676*.
- [15] **Lyashevskaya ON, Shavrina TO, Trofimov IV, Vlasova NA.** GramEval 2020 shared task: Russian full morphology and universal dependencies parsing. In *Proc. of the International Conference Dialogue*. 2020, 553-569.
- [16] Syntactic parsing DeepPavlov documentation. <http://docs.deeppavlov.ai/en/master/features/models/syntaxparser.html>
- [17] **Zeman D.** Universal Dependencies 2.5, LINDAT/CLARIN digital library at the Institute of Formal and Applied Linguistics (ÚFAL), Faculty of Mathematics and Physics, Charles University. 2019.
- [18] Tomita-parser. Yandex Technologies. <https://yandex.ru/dev/tomita/>
- [19] Natasha/yargy: Rule-based facts extraction for Russian language. <https://github.com/natasha/yargy>
- [20] **Meister C, Cotterell R.** Language model evaluation beyond perplexity. 2021. *arXiv preprint arXiv:2106.00085*.

About the author

Ivan Evgenievich Nikolaev (b. 1986). Graduated from the South Ural State University in 2008, Senior Lecturer at the Department of Information Technology and Economic Informatics of the Institute of Information Technology Chelyabinsk State University). ORCID: 0000-0002-9686-2435. ivan_nilolaev@csu.ru.

Received May 3, 2023. Revised June 12, 2023. Accepted June 19, 2023.

**“ ONTOLOGISTS
AND DESIGNERS
OF ALL COUNTRIES
AND SUBJECT AREAS,
JOIN US!**

