

Ontology of Designing

ISSN 2223-9537 (P)

ISSN 2313-1039 (E)

ОНТОЛОГИЯ

Vol 13

2023

№4

Научный журнал -
Scientific journal

ПРОЕКТИРОВАНИЯ



50 выпуск
журнала

AI-2023



Передовые
инженерные
школы

Scientific journal

Volume 13

№ 4

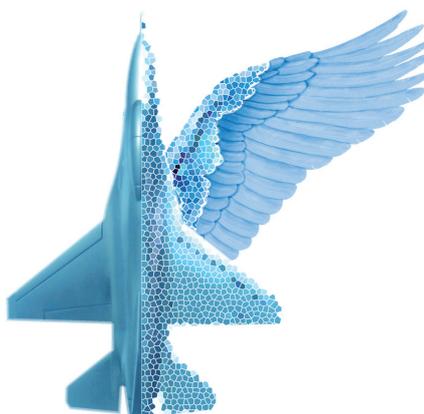
ОНТОЛОГИЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научный журнал

Том 13

№ 4



Editorial Board - Редакционная коллегия

Nikolay M. **Borgest***, Ph.D., Associate Professor, Samara University, Member of IAQA, AAAl. Samara, Russia
Stanislav N. **Vasiliev***, Doctor of Phys. and Math. Sciences, Professor, Academician of RAS, ICS RAS, Moscow, Russia
Tatiana A. **Gavrilova***, Doctor of Technical Sciences, Professor, GSOM SPbU, St.-Petersburg, Russia
Vladimir G. **Gainutdinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, KNITU-KAI, Kazan, Russia
Vladimir V. **Golenkov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, BSUIR, Minsk, Belarus
Vladimir I. **Gorodetsky***, Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC «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. **Kurechik***, 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 IAQA, Samara, Russia
Dzhavdet S. **Suleymanov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the AS of the RT, Kazan, Russia
Boris E. **Fedunov***, Doctor of Technical Sciences, Professor, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia
Altynbek **Sharipbay***, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Artificial Intelligence, Astana, Kazakhstan

Боргест Николай Михайлович*, к.т.н., доцент, Самарский университет, член IAQA, AAAl. Самара, Россия
Васильев Станислав Николаевич*, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИПУ РАН, Москва, Россия
Гаврилова Татьяна Альбертовна*, д.т.н., профессор, ВШМ СПбУ, Санкт-Петербург, Россия
Гайнутдинов Владимир Григорьевич, д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
Голенков Владимир Васильевич*, д.т.н., профессор, БГУИР, Минск, Беларусь
Городецкий Владимир Иванович*, д.т.н., профессор, АО «Эврика», Санкт-Петербург, Россия
Грибова Валерия Викторовна*, д.т.н., член-корреспондент РАН, г.н.с., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Россия
Загорюлько Юрий Алексеевич*, к.т.н., с.н.с., ИСИ СО РАН, Новосибирск, Россия
Комаров Валерий Андреевич, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
Креинович Владик, профессор, Техасский университет Эль Пасо, Эль Пасо, США
Кузьмичев Венедикт Степанович, д.т.н., профессор, Самарский университет, Самара, Россия
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 IAQA, Самара, Россия
Сулейманов Джавдет Шевкетович*, д.т.н., профессор, академик АН РТ, Казань, Россия
Федунов Борис Евгеньевич*, д.т.н., профессор, ГосНИИ авиационных систем, Москва, Россия
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 **1.280** (2015), **1.083** (2016), **0.993** (2017), **1.205** (2018), **0.835** (2019), **1.071** (2020), **0.989** (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 есть истина? 469-473
ИИ шагает по планете: краткий обзор инфраструктур и событий в сфере ИИ 474-478

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Е.Б. Скворцов, А.В. Бондарев, В.М. Коноплева, О.В. Сонин, М.Н. Чанов, А.С. Шелехова** 479-495
Особенности формализованной технологии концептуального проектирования в авиастроении
- Д.Ш. Сулейманов, Р.А. Гильмуллин, А.Р. Гатиатуллин, Н.А. Прокопьев** 496-506
Когнитивный потенциал естественных языков агглютинативного типа в интеллектуальных технологиях

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- В.В. Антонов, Л.А. Кромина, Л.Е. Родионова, А.Р. Фахруллина, Л.И. Баймурзина** 507-519
Формирование модели интеллектуального программного аналитического комплекса в электроэнергетике
- П.А. Ломов** 520-530
Формирование лексического модуля прикладной онтологии для её обучения
- В.А. Семенова, С.В. Смирнов** 531-547
Модели и методы онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

- В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Д.В. Соколов, Г.С. Майоров** 548-561
Разработка онтологий для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем энергетики
- Е.А. Сидорова, И.Р. Ахмадеева, Ю.А. Загоруйко, И.С. Кононенко, А.С. Серый, П.М. Чагина, В.К. Шестаков** 562-579
Комплексный подход к анализу аргументативных отношений в текстах научной коммуникации

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

- В.П. Корнеев** 580-596
Метод косвенных предпочтений формирования весов критериев с многоуровневой структурой
- С.А. Пиявский** 597-614
Онтология направляемого развития научных способностей молодёжи. Часть 2: общая схема
- Д.И. Лобач** 615-624
О развитии подходов системной оценки безопасности при проектировании технических систем

Приложение к юбилейному выпуску:

Онтология онтологий проектирования 2011-2023

отдельный том
на 156 с.

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

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

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

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



Контакты учредителей

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

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

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

Отпечатано в ООО «Новая техника», г. Самара, пр. К. Маркса, 24-76. Дата выхода 5.12.2023. Тираж 200 экз. Свободная цена. (6+).

CONTENTS

EDITORIAL

- What is truth? 469-473
AI walks the planet: Brief overview of infrastructures and events in the field of AI 474-478

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

- E.B. Skvortsov, A.V. Bondarev, V.V. Konopleva, O.V. Sonin, M.N. Chanov, A.S. Shelekhova** 479-495
Formalized conceptual design technology in the aircraft industry
D.S. Suleymanov, R.A. Gilmullin, A.R. Gatiatullin, N.A. Prokopyev 496-506
Cognitive potential of agglutinative languages in intelligent technologies

APPLIED ONTOLOGIES OF DESIGNING

- V.V. Antonov, L.A. Kromina, L.E. Rodionova, A.R. Fakhrullina, L.I. Baimurzina** 507-519
Formation of the model of an intellectual software analytical complex in the electric power industry
P.A. Lomov 520-530
Formation of the lexical module of applied ontology for its learning
V.A. Semenova, S.V. Smirnov 531-547
Models and methods of ontological data analysis in the problem of structural analysis and synthesis of technical decisions

ONTOLOGY ENGINEERING

- V.A. Stennikov, E.A. Barakhtenko, D.V. Sokolov, G.S. Mayorov** 548-561
Development of ontologies for automating computational processes in the energy pipeline system design
E.A. Sidorova, I.R. Akhmadeeva, Yu.A. Zagorulko I.S. Kononenko, A.S. Sery, P.M. Chagina, V.K. Shestakov 562-579
An integrated approach to the analysis of argumentative relationships in scientific communication texts

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DECISION MAKING

- V.P. Korneenko** 580-596
Method of indirect preferences for forming criterion weights with a multi-level structure
S.A. Piyavsky 597-614
Ontology of guided development of scientific abilities of young people. Part2: General scheme
D.J. Lobach 615-624
On the development of approaches to system safety assessment in the design of technical systems

Supplement to the anniversary issue:

Anthology of Design Ontology 2011-2023

Separate volume, 156 p.

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

Что есть истина? What is truth?

«Надо знать, что с врагом можно бороться двумя способами: во-первых, законами, во-вторых, силой. Первый способ присущ человеку, второй — зверю; но так как первое часто недостаточно, то приходится прибегать и ко второму».

*Никколо Макиавелли, «Государь», Глава XVIII,
1513*

«...И лишь молчание понятно говорит».

*В.А. Жуковский, «Невыразимое»,
1829*

Дорогой наш читатель, уважаемые авторы и члены редакционной коллегии!

Делая попытки познать онтологию жизни, онтологии различных видов деятельности и онтологии их проектирования с целью возможной передачи добытых знаний нашему «железному коню» с кремниевой начинкой, невольно задаёшься вопросами: «А что есть истина? Насколько верны наши знания и наши представления о мире, его устройстве? Почему возникает многоголосье мнений на одни и те же процессы? Почему не кончается вавилонское столпотворение? Кто прав, и кто имеет право судить о правоте, и кто знает эту самую истину?»

Никколо Макиавелли, теоретик и государственный деятель в своём трактате «Государь»¹ наряду с методологией захвата власти описал свои методы управления. Его трактовка с упором на законы, что характерно для людей, и на силу, что типично для животного мира (см. эпитафия), не в полной мере, косвенно коррелирует с известным принципом «кнута и пряника». В социологии появилось и используется такое понятие как Макиавеллианский (Макиавеллиевский) интеллект, включающий специфические интеллектуальные способности, обеспечивающие эффективное функционирование индивида в коллективе. В частности, это способности к формированию коалиций, совместных действий, разработки различных способов повышения своей репутации и социального статуса, предвидение реакций своего общественного окружения на основе оценки его намерений, знаний, образа мыслей и т.д.² Понятие социальный интеллект рассматривается как совокупность способностей, определяющая успешность социального взаимодействия, и включает в себя понимание поведения другого человека, своё собственное поведение и действовать сообразно ситуации³. Для совместного выживания человечеству предстоит найти это понимание и способность взаимодействовать, стремясь к консенсусу в критически важных сферах своей деятельности.

О силе, господствующей над законами, писал в своё время Плутарх⁴, а многочисленные подтверждения этому («Сила закон ломит») собрал Санкт-Петербургский педагог и писатель М.И. Михельсон⁵.

«Что есть истина?» - картина художника Николая Ге, которую современники посчитали «оскорблением чувств верующих», является фактически визуализацией известной басни мастера русской словесности Ивана Крылова «Волк и Ягнёнок», где автор точно подметил, что



«Что есть истина?»
Н.Н. Ге, 1890

¹ Макиавелли Н. Государь. М.: Планета, 1990. 80 с.

² Byrne R.W., Whiten A. Machiavellian intelligence. Oxford: Oxford University Press. 1988. 430 p.

³ Ушаков Д.В. Социальный интеллект как вид интеллекта // Социальный интеллект: Теория, измерение, исследования. Сер. Труды Института психологии РАН; под редакцией Д. В. Люпина, Д. В. Ушакова. Москва, 2004. С.11-28.

⁴ Plutarch. Vitae 11, Cancellus. 17, 3, 4.

⁵ Михельсон М.И. Русская мысль и речь. Своё и чужое. Опыт русской фразеологии. Сборник образных слов и иносказаний. Т. 1-2. Ходячие и меткие слова. Сборник русских и иностранных цитат, пословиц, поговорок, пословичных выражений и отдельных слов (иносказаний). СПб., тип. Ак. наук, 1896-1912. 2208 с. <https://gufo.me/dict/mikhelson>.

«у сильного всегда бессильный виноват»⁶. На этой картине Понтий Пилат, как представитель власти, олицетворяющий силу, указывает Иисусу Христу на правоту своих решений.



«Истина, выходящая
из колодца»
Э. Деба-Понсан, 1898

Не менее трагичен и сюжет картины французского художника Эдуарда Деба-Понсана, показавшего нелёгкую судьбу обнажённой (беззащитной) Истины, когда доверчивая Правда легко проигрывает Лжи, как это впоследствии точно и образно было представлено В. Высоцким в «Притче о Правде и Лжи».

Известный афоризм «Сила в Правде» даёт надежду на победу Добра над Злом, на торжество Истины. Но эта надежда и успокоение лишь тем, кто стремится к Правде, искренне желает и верит, что у них хватит тех внутренних ресурсов, которые необходимы, чтобы противостоять Лжи (неПравде). Переоценка собственных ресурсов, недооценка ресурсов противостоящей стороны, неучёт злонамеренных действий и «игры не по правилам» (внешне принимаемых, но не соблюдаемых и лишь декларируемых), которая характерна для тех, кто эти правила и пишет, - всё это делает процесс торжества Истины трудно осуществимым.

Поэтому ответ на вопрос об истине в первую очередь переадресуется к ответу на вопрос: «А что есть сила, которая влияет на определение истины, какова природа и каков вектор этой силы?».

При всей очевидной склонности большинства субъектов деятельности к ожиданию торжества Правды и внутреннего понимания того «что такое хорошо и что такое плохо» (см. у В.В. Маяковского), в каждом конкретном случае, в каждой предметной области (ПрО) атрибуты и вектор силы, а также критерии оценки сравниваемых альтернатив - *различны* и вполне *конкретны* в рассматриваемой ПрО и возникающей в ней проблемной ситуации. Здесь есть определённая аналогия с онтологией проектирования, где понятийный аппарат и базовые принципы инвариантны к ПрО, в то время как собственно проектирование, как деятельность, всегда предметно, всегда объектно-ориентировано.

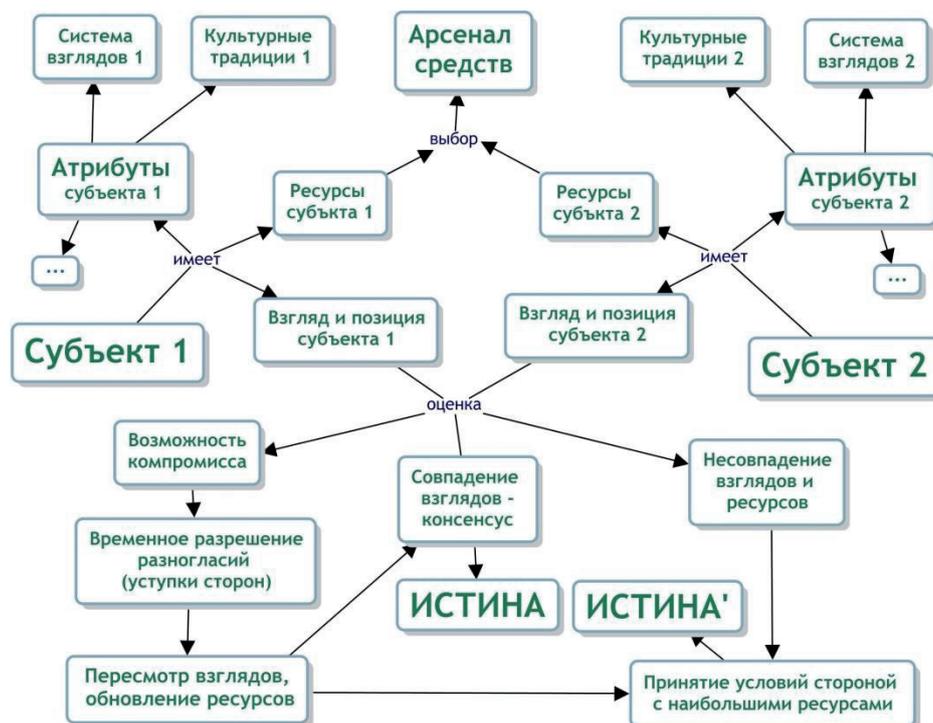
Силы у противостоящих сторон, решающие те или иные спорные (научные, бытовые, семейные ...) вопросы, бывают разные. Каждая сторона, с учётом имеющихся у неё ресурсов, может выбрать и использовать те средства, которые по её мнению дадут приемлемый для неё результат. Арсенал средств может включать силу убеждений и аргументации, соблюдение правил и принятых договорённостей, командно-административное воздействие, угрозу физического насилия и др. Ньютоновская формула силы, как произведение массы и ускорения, здесь вполне уместна, где масса – это совокупность ресурсов, имеющихся у сторон, а ускорение – это возможность использования этих ресурсов в текущий момент времени возникшей проблемной ситуации. При равенстве сил сторон проблема не разрешается, каждый остаётся при своём мнении, и конфликт или спорная ситуация на время «замораживается», до тех пор, пока одна из сторон не найдёт возможность изменить статус-кво в свою пользу.

Граф знаний «Истина», в котором делается попытка отразить противопоставление добра и зла, правды и лжи, как способ представления основных компонент этих понятий, во многом схож с рассмотренной ранее онтологией войны и мира⁷. Здесь субъекты (или стороны), обладающие своим набором ресурсов, выбирают доступные им средства, участвуют (очно или заочно, реально или виртуально) в оценке и сопоставлении своих взглядов и позиций. Идеальным в поиске истины, устраивающей все стороны, является достижение согласия (консенсуса) сторон, независимо от «массы» (или «веса») их ресурсов. Наличие возможности

⁶ Крылов И.А. Басни Ивана Крылова. Санкт-Петербург. 1809.

⁷ От редакции. Война и мир: онтологические основания. Онтология проектирования, №1, том 12, 2022. С.5-10.

компромисса и временных уступок можно оценить позитивно и в том смысле, что пересмотр собственных взглядов, поиск дополнительных аргументов в т.ч. в защиту своих позиций, благоприятно скажется на «объективизации» истины. Несовпадение взглядов и имеющихся ресурсов у сторон неминуемо приведёт к принятию за истину того, что соответствует представлениям «сильной» стороны. Злоупотребление (употребление во ЗЛО, а не во благо) имеющимися у стороны ресурсами, не отвечающими интересам тех, кто эти ресурсы предоставил или делегировал, приводит к разрушительным последствиям, т.к. отдаляет всех от объективной Истины, указывая ложные цели («Истина'»), противодействует прогрессу, принося существенный ущерб и неоправданные жертвы⁸.



Медитация как способ постижения или ухода от Истины

Хорошо известно и многократно описано в различных энциклопедиях⁹, многочисленных книгах¹⁰ и статьях о способах ухода и отстранения от проблем, фокусировки на различных идеях, образах, на их визуализации и растворении с целью постижения истины.

Медитация (лат. *meditatio* – размышление, подготовка) - процесс достижения состояния углублённой сосредоточенности с целью интеллектуально-духовной интериоризации¹¹ некоторого объекта (идеи, истины, образа, символа). В психологическом аспекте медитация предполагает устранение крайних эмоциональных проявлений и понижение реактивности и рассматривается как вид созерцания, сопровождающийся различными упражнениями. Углубляясь в свой внутренний мир, человек отрешается от реальности, он присутствует, но не ощущает себя в ней, отстраняясь и «атомизируясь».

⁸ От редакции. Уподобимся Сократу или апология онтологии проектирования. Онтология проектирования, №1, 2011. С.5-7.

⁹ Шохин В.К. Медитация (Большая российская энциклопедия в 35 т. / гл. ред. Ю. С. Осипов; 2004-2017, т. 19). Обновление 11 апреля 2023 г. <https://bigenc.ru/c/meditatsiia-db187e>; Медитация. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Медитация>.

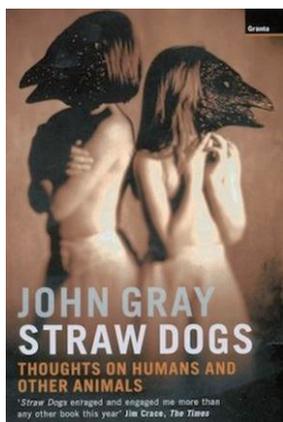
¹⁰ Исцеляющая сила медитации: ведущие эксперты в области буддизма, медицины и психологии исследуют пользу созерцательной практики для здоровья. М.: Ганга, 2017. 368 с.

¹¹ Интериоризация (от лат. *interior* – внутренний) - переход извне внутрь, формирование внутреннего мира человека под воздействием объективных и интерсубъективных структур, процесс формирования основных функций человеческой психики на основе опыта взаимодействия с внешним миром в процессе взросления.

Многие из нас уже смогли достигнуть этого высокого уровня самопогружения, в котором зависимость от информации стала намного сильнее других наших слабостей. Возможно, что цифровой детокс (англ. *Digital detox*) вернёт нас в реальную жизнь.

Обращаясь к заключительной фразе стихотворения В.А. Жуковского «Невыразимое», приведённой в эпиграфе к данному обращению, в который раз убеждаешься в действенности фразы «молчание золото», ибо оно «понятно говорит».

Надежда на здравый смысл



Обложка книги Грея
«Соломенные псы»

«Люди не могут жить без иллюзий ... иррациональная вера в прогресс может быть единственным противоядием от нигилизма. Без надежды на то, что будущее будет лучше прошлого, невозможно жить дальше».

Джон Грей, 2007

В статье про миф о прогрессе человека¹² Э. Риттенберри делится своими мыслями о книге философа Джона Грея «Соломенные псы: размышления о людях и других животных»¹³, считая её одной из лучших философских книг, написанных в 21-ом веке. Обложка книги Джона Грея, где люди изображены с головами (и интеллектом) животных, напоминает сюжет картин о голой Правде.

«Соломенные псы» - это атака на бездумные убеждения думающих людей. Грей обвиняет гуманизм (его центральное представление о человечестве) в разрушении природного мира и рассматривает технологию как инструмент, с помощью которого люди будут продолжать уничтожать планету и друг друга. Тема провокационной философии Грея заключается в том, что попытки управлять окружающим миром тщетны и являются причиной многочисленных бед. Грей пишет: «Наука никогда не будет использоваться главным образом для поиска истины или улучшения человеческой жизни. Применение знаний всегда будет таким же изменчивым и нечестным, как и сами люди».

Сегодня либеральный гуманизм обладает всепроникающей силой, которой когда-то обладала религия. Рациональный взгляд на мир у гуманистов сводится к вере в прогресс, но это суеверие, более далекое от истины, чем любая из религий. Вне науки прогресс - это просто миф. Наука увеличивает человеческую власть и недостатки человеческой природы. Наука даёт возможность жить дольше и иметь более высокий уровень жизни, при этом позволяет сеять разрушения в большем, чем ранее, масштабе.

Если надежда на прогресс - иллюзия, то что делать, как быть, что есть Истина?

Для Платона созерцание было высшей формой человеческой деятельности. Похожий взгляд существовал в Древней Индии. Целью жизни было не изменить мир, а *жить в нём*.

Известная фраза Маркса: «Философы лишь различным образом объясняли мир. Но дело заключается в том, чтобы изменить его», высказанная им в работе «Тезисы о Фейербахе», стала оправданием технологического прогресса.

In vino veritas

Полная фраза: «*In vino veritas, in aqua sanitas*» (Истина - в вине, здоровье - в воде), приписывается Плинию Старшему (23-79 г. н.э.), который употребил её в своей «Естественной истории»¹⁴. Этот «простой способ» поиска Истины в быту доступен каждому и в разумных

¹² Erik Rittenberry. The Myth of Human Progress. May 3, 2023. <https://medium.com/@erikrittenberry/the-myth-of-human-progress-2022d817d3a2>.

¹³ John Gray. Straw Dogs: Thoughts on Humans and Other Animals. Publisher Granta Books. 2007. 264 p.

¹⁴ «Естественная история» (лат. *Naturalis historia*) - энциклопедия природных и искусственных предметов и явлений, составленная в 77 году н. э. Плинием Старшим и посвящённая римскому императору Титу, послужила прообразом всех последующих европейских энциклопедий. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Естественная_история_\(Плиний\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Естественная_история_(Плиний)).

пределах порой позволяет найти консенсус и понимание у людей здравомыслящих, стремящихся и способных разобраться в аргументации иных взглядов (идей и суждений), сверить и сопоставить их, предложить и обсудить свои трактовки. Сократовское «в диалоге рождается истина» предполагает обмен мнениями, совместный анализ аргументов сторон и их сопоставление, которые позволят выстроить путь к Истине.

Бозон Хиггса - «частица Бога»

Бозон Хиггса настолько важен для понимания тонкой структуры микромира, что его прозвали «частицей Бога». Его нестабильность, случайность, непредсказуемость во многом характерны и определяют эволюцию. Также обстоит дело и с Истиной, которая всегда субъектна, контекстна и зависит от арсенала средств и ресурсов сторон (см. рисунок на 471 с.).

Не все наши коллеги верили в возможность реализуемости эмерджентного проекта под названием научный журнал «Онтология проектирования», хотя искренне желали ему успеха. Сомнения были связаны с наличием у инициаторов средств и ресурсов, которые определяют реализуемость проекта. Однако мотивационный ресурс участников и синергия малых сил сделали своё дело. И вот перед Вами, дорогие авторы и читатели, 50-ый номер журнала!

В юбилейном номере

В разделе «*Общие вопросы формализации проектирования: онтологические аспекты и когнитивное моделирование*» обсуждаются особенности формализации концептуального проектирования самолёта (ЦАГИ, Москва) и когнитивный потенциал естественных языков агглютинативного типа (Академия наук Республики Татарстан, Казань) для информационных систем.

В разделе «*Прикладные онтологии проектирования*»: в ПрО, связанной с электроэнергетикой, рассматривается формирование модели интеллектуального программного аналитического комплекса (Уфимский университет науки и технологий, Уфа); для обучения онтологии, построенной на естественно-языковых текстах, предлагается лексический модуль прикладной онтологии (Кольский научный центр РАН, Апатиты); для задач структурного анализа и синтеза технических решений предлагаются модели и методы онтологического анализа данных (ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, Самара).

В разделе «*Инжиниринг онтологий*»: для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем энергетики предлагаются соответствующие онтологии (ИСЭМ СО РАН, Иркутск); автоматический анализ аргументации рассмотрен для текстов научной коммуникации (Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, Новосибирск).

В разделе «*Методы и технологии принятия решений*» рассматриваются методы и приложения для оценки и принятия решений в различных ПрО: для решения задачи многокритериального оценивания самолётов предлагается метод косвенных предпочтений формирования весов критериев с многоуровневой структурой (ИПУ РАН, Москва); описана общая схема направляемого развития молодого исследователя в рамках его учебно-исследовательской деятельности (Самарский филиал МГПУ, Самара); развитие подходов системной оценки вопросов безопасности при проектировании технических систем на примерах атомной промышленности (МЧС Республики Беларусь, Минск).

Несмотря на различные, в т.ч. пессимистические, оценки будущего, на санкции и контр-санкции, на различие взглядов и позиций, наш журнал верит и надеется на светлое будущее и продолжает объединять онтологов и проектантов в научном поиске **Истины**.

Dum spiro, spero!

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

ИИ шагает по планете:

краткий обзор инфраструктур и событий в сфере ИИ¹

AI walks the planet:

Brief overview of infrastructures and events in the field of AI

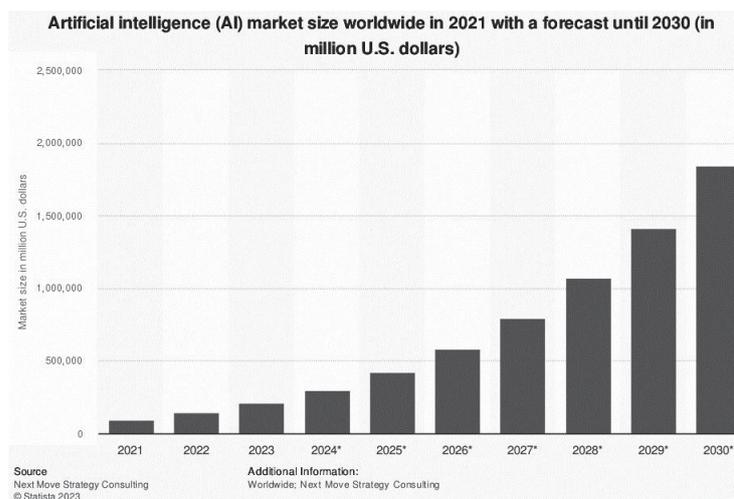
Всемирный экономический форум организует *Альянс по управлению искусственным интеллектом* (ИИ), объединяющий лидеров отрасли, правительства, академические институты и организации гражданского общества для продвижения ответственного глобального проектирования и выпуска прозрачных и инклюзивных систем ИИ².

13–15 ноября 2023 года в Сан-Франциско прошёл Саммит Всемирного экономического форума по управлению ИИ³, на котором обсуждались актуальные вопросы управления ИИ для государственного и частного секторов. Саммит продолжил ряд международных инициатив и соглашений по управлению ИИ и безопасности (Саммит по безопасности ИИ в Великобритании, Закон об ИИ в ЕС, Руководящие принципы и Кодекс поведения G7, Консультативный орган по ИИ ООН и др.). Вопросы этики ИИ рассматривались в контексте создания ответственных приложений, а также дискуссий о безопасных системах и технологиях.

«*Расцвет искусственного интеллекта*» - такие заголовки можно встретить на сайте форума. По прогнозам рынок ИИ вырастет почти на 800% и составит около 1,8 трлн. долларов к 2030 году⁴ (см. рисунок). Рынок ИИ охватывает огромное количество отраслей, начиная с цепочек поставок, маркетинга, производства продукции, исследований, анализа и др. Это области, которые внедряют ИИ в свои бизнес-процессы. Чат-боты, генерирующие изображения ИИ, мобильные приложения - всё это входит в число основных тенденций, которые будут улучшены в ближайшие годы благодаря ИИ.

У генеративного ИИ (*GenAI*) - растущий рынок. Выпуск трансформера *ChatGPT* привёл к новым возможностям, которые стимулировали выпуск обновлённых версий чат-ботов и программ генеративного ИИ.

Аббревиатура «**AI**» стала символом и словом года по версии словаря Коллинза 2023⁵. По версии Коллинза ИИ - термин, описывающий «моделирование психических функций человека с помощью компьютерных программ», характеризует следующую быстро развивающуюся технологическую революцию, и о нём много говорили в 2023 году. События конца 2023 года можно смело назвать предвестником массового внедрения ИИ в нашу жизнь, которую он изменит уже в ближайшее время. Остаётся желать, что в



Прогноз рынка ИИ

¹ См. также: *Боргест Н.М.* Стратегии интеллекта и его онтологии: попытка разобраться // *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №4(34). С.407-428. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-407-428.

От редакции. Искусственного много – интеллекта мало // *Онтология проектирования*, №4, том 10, 2020. С.413-414.

² AI Governance Alliance. <https://initiatives.weforum.org/ai-governance-alliance/home>.

³ AI Governance Summit. <https://www.weforum.org/events/ai-governance-summit-2023/>.

⁴ *Bergur Thormundsson*. Oct 6, 2023. Global artificial intelligence market size 2021-2030. <https://www.statista.com/statistics/1365145/artificial-intelligence-market-size/>.

⁵ The Collins word of the year 2023 is...AI. <https://www.collinsdictionary.com/woty>.

лучшую сторону. Аббревиатура **AI-2023** на обложке юбилейного выпуска нашего журнала отмечает факт активного вхождения ИИ в уходящем году в нашу жизнь и выражает надежду на лучшее с его приходом.

15 ноября, вслед за словарём Коллинза, словарь Кембриджа объявил своё слово 2023 года, и им оказалась *галлюцинация* или, точнее, глагол *галлюцинировать* (*hallucinate*)⁶. И это неспроста, т.к. повальное использование «всемогущих» больших языковых моделей (*large language model, LLM*) часто приводит к результатам, которые иначе, чем «глюки» или галлюцинации не назовёшь. В новом поколении чат-ботов используется разновидность ИИ - *GenAI*, в котором компьютерные модели могут создавать текст и изображения. *GenAI* основан на огромных объёмах языковых данных в форме *LLM* и может вести беседу на любую выбранную тему, писать стихи, рассказы или эссе, но порой «выдумывает» то, что вообще не соответствует действительности. Эти ошибки и есть галлюцинации или конфабуляции. Точность и качество результатов, которые получают эти модели ИИ, основаны на количестве и качестве данных, на которых они обучаются.

Поскольку область ИИ быстро развивается, то растёт и язык, который используется, чтобы говорить о ней. Не обошёл стороной вопросы терминологии и новый указ Президента США от 30.10.2023 в области ИИ⁷. Вот перевод определений некоторых терминов из указа:

(b) «ИИ» - машинная система, которая для заданного набора целей, определённых человеком, может делать прогнозы, давать рекомендации или принимать решения, влияющие на реальную или виртуальную среду. Системы ИИ используют машинные и человеческие входные данные для восприятия реальной и виртуальной среды; абстрагируют такое восприятие в модели посредством анализа автоматическим способом; используют вывод из модели для формулирования вариантов информации или действий.

(c) «Модель ИИ» означает компонент информационной системы, который реализует технологию ИИ и использует вычислительные, статистические методы или методы машинного обучения для получения результатов из заданного набора входных данных.

(d) «Совместная работа с ИИ» означает структурированное тестирование с целью поиска недостатков и уязвимостей в системе ИИ, часто в контролируемой среде и в сотрудничестве с разработчиками ИИ ...

(e) «Система ИИ» означает любую информационную систему, программное обеспечение, аппаратное обеспечение, приложение, инструмент или утилиту, которые работают полностью или частично с использованием ИИ.

(p) «Генеративный ИИ» означает класс моделей ИИ, которые эмулируют структуру и характеристики входных данных для создания производного синтетического контента. Это может включать изображения, видео, аудио, текст и другой цифровой контент.

(t) «Машинное обучение» означает набор методов, которые могут быть использованы для обучения алгоритмов ИИ для повышения производительности при выполнении задачи на основе данных.

(u) «Вес модели» означает числовой параметр в модели ИИ, который помогает определять выходные данные модели в ответ на входные данные.

2 ноября 2023 года завершился первый в мире саммит по безопасности ИИ, где передовые страны и компании, разрабатывающие ИИ, согласовали план тестирования безопасности ИИ. Новый центр, базирующийся в Великобритании и отвечающий за тестирование безопасности новых типов ИИ, получил поддержку ведущих компаний и стран в области ИИ⁸. Вопросам терминологии на саммите также уделялось много внимания. Вот перевод нескольких основных определений⁹.

⁶ Kate Woodford. Understanding AI jargon: Artificial intelligence vocabulary. November 15, 2023.

<https://dictionaryblog.cambridge.org/2023/11/15/understanding-ai-jargon-artificial-intelligence-vocabulary/>.

⁷ Joseph R. Biden JR. Executive Order on the Safe, Secure, and Trustworthy Development and Use of Artificial Intelligence. October 30, 2023. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2023/10/30/executive-order-on-the-safe-secure-and-trustworthy-development-and-use-of-artificial-intelligence/>.

⁸ <https://www.gov.uk/government/news/world-leaders-top-ai-companies-set-out-plan-for-safety-testing-of-frontier-as-first-global-ai-safety-summit-concludes>.

⁹ <https://www.gov.uk/government/publications/ai-safety-summit-introduction/ai-safety-summit-introduction-html#glossary-of-terms>.

«ИИ или система ИИ» (AI) - программное обеспечение, которое является «адаптируемым» и «автономным» в смысле, изложенном в определении в «Белой книге по ИИ»¹⁰.

«Передовой ИИ» (Frontier AI) находится на переднем крае технологического прогресса, предлагает больше возможностей, но и таит в себе новые риски. Это относится к высокопроизводительным моделям ИИ общего назначения, которые могут выполнять широкий спектр задач и соответствовать или превосходить возможности, присутствующие в самых продвинутых сегодня моделях.

«Узкий ИИ» (Narrow AI) - это ИИ, предназначенный для выполнения определённой задачи, особый тип ИИ, в котором алгоритм обучения разработан для выполнения одной задачи или узкого набора задач, и любые знания, полученные в результате выполнения задачи, не будут автоматически применимы или передаваемы.

Стали известны рейтинги¹¹ ведущих университетов, стран и городов мира по достижениям в области ИИ за период 2012-2023 гг. Здесь США и Китай - явные фавориты в гонке по разработкам ИИ, по публикациям и числу авторов. К сожалению, составители рейтингов не включили Россию в обзор, и напрасно.

#	Institute	#	Country	#	City
1	Carnegie Mellon University 117 authors	1	USA 187 institutes 3165 authors	1	Beijing 6 institutes 384 authors
2	Peking University 119 authors	2	China 33 institutes 999 authors	2	Boston 9 institutes 194 authors
3	Tsinghua University 91 authors	3	UK 43 institutes 924 authors	3	Pittsburgh 2 institutes 153 authors
4	Stanford University 53 authors	4	Germany 70 institutes 552 authors	4	London 10 institutes 209 authors
5	University of Maryland - College Park 55 authors	5	Canada 30 institutes 465 authors	5	San Francisco Bay Area 3 institutes 166 authors
6	University of Toronto 58 authors	6	Australia 13 institutes 325 authors	6	Hong Kong 6 institutes 140 authors
7	Georgia Institute of Technology 57 authors	7	Singapore 5 institutes 150 authors	7	New York 7 institutes 212 authors
8	Univ. of California - San Diego 64 authors	8	Israel 8 institutes 182 authors	8	Los Angeles 5 institutes 142 authors
9	Univ. of California - Berkeley 59 authors	9	Japan 7 institutes 191 authors	9	Singapore 5 institutes 150 authors
10	University of Southern California 36 authors	10	India 25 institutes 223 authors	10	Washington DC 4 institutes 109 authors

Впервые сформирован рейтинг российских ВУЗов по качеству подготовки специалистов в области ИИ, в который вошли 180 университетов, сегментированных на 12 групп от «А+» до «Е+»¹². Десятка сильнейших ВУЗов в области ИИ от «А+» до «В» представлена в таблице.

A+	A	B+	B
НИУ «ВШЭ», НИУ ИТМО, МФТИ (НИУ)	С-ПГУ, МГУ им. М.В. Ломоносова	УФУ им. Б.Н. Ельцина, МГТУ им. Н.Э. Баумана	НИЯУ «МИФИ», С-ПГУ Петра Великого, Университет Иннополис

16 ноября 2023 года в Москве прошёл «Форум этики в сфере ИИ: Поколение GPT. Красные линии», где обсуждался курс развития этики ИИ в России. Как известно, в России создан Альянс в сфере ИИ¹³, который объединяет ведущие технологические компании для совместного развития их компетенций и ускоренного внедрения ИИ в образовании, научных исследованиях и в практической деятельности бизнеса. В рамках Альянса создана Комиссия

¹⁰ <https://www.gov.uk/government/publications/ai-regulation-a-pro-innovation-approach/white-paper>.

¹¹ AIRankings (<https://airankings.org/>) - рейтинг, основанный на показателях, который дает представление о возможностях исследований в области ИИ во всем мире на различных уровнях (авторы, институты, города, страны...).

¹² Рейтинг российских ВУЗов по качеству подготовки специалистов в области ИИ. <https://rating.a-ai.ru/#rating>.

¹³ Альянс в сфере ИИ - <https://a-ai.ru/>.

по реализации Кодекса этики в сфере ИИ¹⁴, которая включает ряд рабочих групп по: разработке и мониторингу методики оценки рисков и гуманитарного воздействия систем ИИ; созданию свода наилучших практик решения возникающих этических вопросов в жизненном цикле ИИ; оценке эффективности реализации Кодекса; рекомендательным сервисам; этике ИИ в медицинской сфере. Кодекс этики в сфере ИИ¹⁵ устанавливает общие этические принципы и стандарты поведения, которыми следует руководствоваться участникам отношений в сфере ИИ в своей деятельности, а также механизмы реализации положений настоящего Кодекса. Кодекс распространяется на отношения, связанные с этическими аспектами создания, внедрения и использования технологий ИИ на всех этапах жизненного цикла, которые пока не урегулированы законодательством Российской Федерации. К Кодексу этики ИИ присоединились 16 стран, и 234 организации стали его подписантами.

Созданный Национальный портал в сфере ИИ¹⁶ освещает результаты деятельности в области ИИ в России, включая стратегии ИИ, внедрение, развитие, регуляторику, сообщества, инфраструктуру и др. Для обеспечения экспертно-аналитического сопровождения внедрения и развития ИИ в отраслях экономики и госсекторе, координации работы органов власти, научных и исследовательских организаций, бизнес-сообщества создан Национальный центр развития ИИ при Правительстве Российской Федерации (НЦРИИ)¹⁷. НЦРИИ - правительственный экспертный и координационный центр, площадка для отбора эффективных решений в области ИИ, созданная в целях содействия реализации Федерального проекта «Искусственный интеллект», разработанного в соответствии с Национальной стратегией развития ИИ на период до 2030 года.

22–24 ноября 2023 года в Москве состоялась Международная конференция *AI Journey 2023 - AIJ Путешествие в мир ИИ*¹⁸. Это очередной успех организаторов *AIJ*, идущих семимильными шагами в неизведанные дали ИИ. Ключевые тренды развития ИИ на ближайшие пять лет наметил заместитель председателя правительства Российской Федерации Д.Н. Чернышенко. Президент России В.В. Путин, уже по традиции, осветил своим присутствием это мероприятие, выступив с речью и пообещав в ближайшее время подписать обновлённую стратегию развития ИИ в Российской Федерации.



¹⁴ Комиссия по реализации Кодекса этики в сфере ИИ - <https://ethics.a-ai.ru/>.

¹⁵ Кодекс этики в сфере ИИ - https://ethics.a-ai.ru/assets/ethics_files/2023/05/12/Кодекс_этики_20_10_1.pdf.

¹⁶ Национальный портал в сфере ИИ - <https://ai.gov.ru/>.

¹⁷ Национальный центр развития ИИ при Правительстве Российской Федерации - <https://aicentre.hse.ru/>.

¹⁸ Конференция AIJ Путешествие в мир ИИ - <https://aij.ru/>.



XXI Национальная конференция по ИИ с международным участием (КИИ-2023)¹⁹ прошла в г. Смоленске 16-20 октября 2023 г. Конференция традиционно проводится Российской ассоциацией ИИ (РАИИ)²⁰. КИИ-2023 проводилась совместно с ФИЦ «Информатика и управление» РАН, филиалом НИУ «МЭИ» в г. Смоленске при поддержке Администрации Смоленской области.



РАИИ создана на основе Советской ассоциации ИИ и объединяет в своих рядах учёных России и стран СНГ, областью профессиональной деятельности которых является ИИ.

***Вступайте в ряды РАИИ!
Вместе весело шагать по просторам ИИ!***

¹⁹ КИИ-2023 - <http://mcai2023.raai.org/>.

²⁰ РАИИ - <https://raai.org/>.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 629.7.01

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-479-495



Особенности формализованной технологии концептуального проектирования в авиастроении

© 2023, Е.Б. Скворцов, А.В. Бондарев, В.М. Коноплева, О.В. Сонин,
М.Н. Чанов, А.С. Шелехова ✉

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского («ЦАГИ»),
Жуковский, Россия

Аннотация

Статья посвящена общим вопросам формализации проектирования и практическим методам разработки концептуального проекта в гражданском авиастроении. Рассмотрены замысел проекта и последовательное выполнение этапов разработки концепции проекта. Особое внимание уделено маркетингу и обоснованию стратегии проекта. Показана важность метода анализа идей для концепции разрабатываемого проекта. В задаче синтеза технической системы представлен подход к согласованию её элементов и риск-анализ критических характеристик проектируемого гражданского самолёта. Описан процесс валидации разрабатываемой концепции проекта самолёта посредством экспериментальных аналогий. Представленная методология впервые разработана в качестве завершённой технологии полного цикла концептуального проектирования гражданских самолётов, научные результаты которой позволят исключить риски ошибочного выбора технической концепции и её несоответствия техническому заданию.

Ключевые слова: проект, самолёт, концепция, маркетинг, стратегия, анализ идей, синтез системы, аналогии концепции.

Цитирование: Скворцов Е.Б., Бондарев А.В., Коноплева В.М., Сонин О.В., Чанов М.Н., Шелехова А.С. Особенности формализованной технологии концептуального проектирования в авиастроении // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №4(50). С.479-495. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-479-495.

Благодарности: авторы выражают благодарность ведущему инженеру ЦАГИ С.В. Шелеховой за помощь в оформлении рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В работе [1] представлены теоретические основы управления разработкой технических концепций в области авиастроения. На основе теории множеств, векторного анализа и теории систем разработаны формально-логические модели последовательных этапов, составляющих процесс концептуального проектирования согласно техническому заданию (ТЗ) с повышением уровня готовности технологий (УГТ, см. рисунок 1). Показано, что управление проектом неотделимо от управления техническими рисками.

Настоящая работа посвящена практическим приёмам технологии проектирования с их научным обоснованием. Представлено описание основных задач этого технологического процесса, принятых методов работы и применяемых средств. Изложение связано с названными этапами выполнения концептуального проекта и может рассматриваться как дополнение к их теоретическим основам.



Рисунок 1 – Этапы разработки концептуального проекта [1]

1 Замысел проекта

Цель этапа – оценить потребность в новом проекте и обосновать ТЗ на его осуществление. Источником знаний на этапе являются результаты различных исследований, которые выполняются специальными методами, объединёнными в согласованную систему или единый план получения знаний, необходимых для обоснования и инициации проекта самолёта (см. рисунок 2). При создании нового летательного аппарата (ЛА) требуется кооперация множества предприятий и продолжительное время разработки до момента освоения его в эксплуатации (см. рисунок 3).

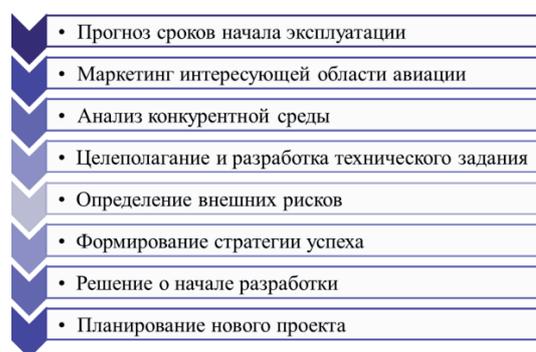


Рисунок 2 – Этапы и методы формирования замысла проекта

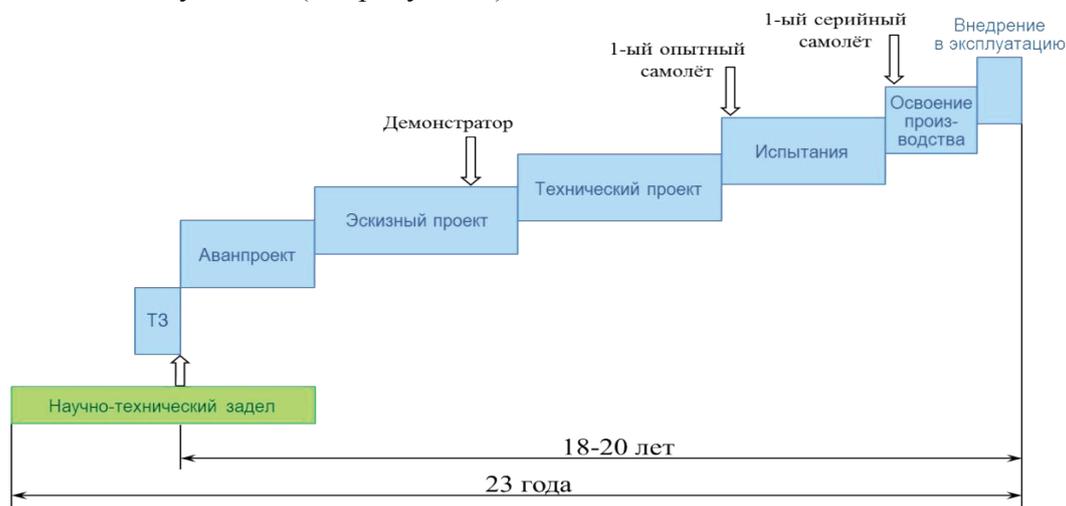


Рисунок 3 – Полномасштабный проект создания нового самолёта

Прогнозируя отдалённое будущее, сложно оценить конкретные условия применения нового самолёта, поэтому проект должен опираться на достоверные сведения, полученные с учётом неопределённостей и рисков его жизненного цикла (ЖЦ).

Объективный маркетинг. В гражданской авиации первоочередным является исследование будущего рынка воздушных перевозок и возможного состояния парка воздушных судов (ВС). Интересы данной работы сосредоточены на выполнении задачи, смысл которой заклю-

чён в одном из лозунгов Ф. Котлера: «Производите то, что можете продать, вместо того, чтобы пытаться продать то, что можете произвести» [2].

Как правило, авиационная техника (АТ) создаётся за счёт или с участием бюджетных средств. Стремясь получить внешнее финансирование, предприятия-разработчики предлагают проекты создания новых изделий, а в обоснование их целесообразности приводят данные консалтинговых фирм и иных организаций, специализирующихся на прогнозных исследованиях. Такой подход не гарантирует достоверной оценки. Объективный прогноз возможен только на основе достоверных статистических данных и знания законов развития рынка [3].

Стратегия успеха. Показанные на рисунке 2 методы формирования возможной стратегии проекта в литературе имеют различные описания. Так, в теории игр [4] стратегией называют правило поведения стороны, участвующей в игровой ситуации. Известна типовая процедура долгосрочного стратегического планирования [5], когда определена отдалённая цель, достижение которой соответствует интересам лица или группы лиц, принимающих решения (ЛПР), и возникает необходимость в продолжительном плане её осуществления. Аналогичный смысл заключён и в стратегии маркетинга [2]. Понятие стратегии в военном деле означает принятие особых мер, уменьшающих риски поражения и увеличивающих шансы победы над противником. Такой подход наиболее близок к задачам проектирования изделий. Это позволяет предложить следующее определение.

Стратегия – это условие успеха проекта, предусмотренное концепцией создания нового продукта и принятое в качестве идейной основы его будущих преимуществ, включая готовность к противодействию антагонистическим проектам. Выбор стратегии – важная задача в технологии концептуального проектирования, где технология – это система знаний о способе создания нужного продукта.

Способ – это сочетание преобразовательных действий (приёмов, операций), режимов их осуществления и необходимых для этого средств, обеспечивающих полезный эффект. В концептуальном проектировании преобразовательными действиями являются этапы анализа, синтеза и аналогии (рисунок 1). По своему значению в проектной деятельности стратегия сопоставима с выбором благоприятного режима – нужной температуры обжига, скорости резания, катализатора реакции или давления инструмента в производственных технологиях для улучшения производительности труда и качества продукта.

Главными в стратегии являются решения, направленные на обретение преимуществ нового проекта на этапах ЖЦ, следующих за разработкой. При этом задача обоснования стратегии не может быть формализована. Изобретательность и кругозор авторов стратегии, способность предвидеть условия применения разрабатываемого продукта определяют привлекательность проекта.

При управлении проектом принимаются стратегические решения с целью сделать «как лучше». Так, известен ряд стратегий, основанных на прошлых проектах. Например, важным условием расширения производства и уменьшения цены на продукцию является унификация агрегатов транспортных и пассажирских самолётов. Примером эффективной стратегии являются самолёты Ан-24/Ан-26. Унификация пассажирского и грузового самолётов в условиях совместного производства позволяет по расчётам вдвое увеличить серийность производства и снизить стоимость изделия на 25%, что существенно улучшает его продажи. Другим примером может служить унификация узлов и агрегатов самолётов Ту-204/Ту-334, Ил-18/Ил-38 и др. Стратегия унификации в задачах проектирования модификаций самолёта проявляется в наложенных на конструкцию требованиях к агрегатам и узлам для вариантов их применения, а также к соблюдению нормативных актов различного назначения. Действие стратегии не заканчивается эксплуатационными испытаниями изделия, а продолжается в серийном производстве и длительной эксплуатации самолёта.

Таким образом, стратегия – это забота о будущей пользе разрабатываемого изделия, расширяющей области его применения, продлевающей его ЖЦ и уменьшающей стоимость ЖЦ. Хотя сегодня эта деятельность не нормируется никакими требованиями или регламентами, управление проектом должно уделять ей первостепенное внимание, а принятые решения фиксировать наравне с ТЗ при разработке Замысла проекта.

2 Теоретические основы концептуального проектирования

Концептуальное проектирование - это начальная фаза проекта, итогом которой является определение полезных для объекта идей и соответствующих технологий, подлежащих дальнейшей разработке на конструкторской и производственной стадиях (таблица 1).

Таблица 1 – Технологический цикл проекта – от идеи до внедрения в эксплуатацию

Программа создания продукта	Шкала УГТ	Контрольные события
А. Стадия разработки концепции и технологий продукта	1	Выбор фундаментальных принципов, составляющих концепцию продукта
	2	Определение технологий, ключевых в концепции продукта
	3	Аналитическое и экспериментальное подтверждение характеристик, критических для концепции продукта
В. Стадия конструкторской разработки и демонстрации продукта	4	Проверка элементов системы в лабораторных условиях
	5	Проверка элементов системы в натуральных условиях
	6	Демонстрация модели системы/подсистемы в натуральных условиях
С. Стадия производства и ввода продукта в эксплуатацию	7	Демонстрация прототипа системы в натуральных условиях
	8	Проверка реальной системы в условиях испытаний и демонстрации
	9	Проверка реальной системы в условиях эксплуатации

В работе [1] формализованы понятия концепции, принципа, идеи и системы, которые позволяют построить логико-математическую модель проектирования на языке теории множеств и векторного анализа. Деятельность проектанта отвечает ТЗ, которое включает множество требований к объекту в виде связей и ограничений, где определённые значения, составляющие цель Z , включают:

$$Z \subset N_p \times N_r \times N_e, \quad (1)$$

N_p – множество ожидаемых воздействий от среды обитания;

N_r – допустимое множество используемых ресурсов;

N_e – множество потребных полезных эффектов объекта.

Под *концепцией* \vec{K} понимается сочетание актуальных для цели проекта принципов действия ($\vec{Q} = \vec{\lambda}_u \cdot Q$), устройства ($\vec{V} = \vec{\lambda}_x \cdot V$) и формы ($\vec{F} = \vec{\lambda}_g \cdot F$)

$$\vec{K} \subset \vec{V} \times \vec{F} \times \vec{Q}. \quad (2)$$

Принципы – это свёртки логически связанной информации, направленной на достижение цели. Направления векторных принципов определяются идеями $(\vec{\lambda}_x, \vec{\lambda}_g, \vec{\lambda}_u)$, а их скалярное содержание (V, F, Q) описывают системы, моделирующие объект.

Идея – это мыслеобраз, логическую суть которого субъект осознаёт и представляет как перспективу для изучения и применения. Идеи образуют сумму единичных векторов и формируют векторное *имя* концепции (здесь «имя» - сочетание идей)

$$\vec{\sigma} = \{(\vec{\lambda}_x, \vec{\lambda}_g, \vec{\lambda}_u) | \vec{\lambda}_x \in \vec{V} \wedge \vec{\lambda}_g \in \vec{F} \wedge \vec{\lambda}_u \in \vec{Q}\}. \quad (3)$$

Здесь принцип действия \vec{Q} содержит информацию об организации объекта: множестве динамических элементов $u \in Q$, которыми являются взаимодействующие в общем технологическом процессе способы функционирования $Q \subset M_u$, отличающиеся такими признаками, как приёмы, режимы, последовательность и условия выполнения операций, реализующих отдельные программы управления.

Принцип устройства \vec{V} содержит информацию о внутренней структуре объекта: множестве статических элементов систем $x \in V$, которые представляют собой детали, узлы, агрегаты, изделия и др. $V \subset M_x$, предназначенные для выполнения технологических процессов. Устройства как структурные единицы могут отличаться материалом, размерами, архитектурой и другими параметрами состояния.

Принцип формы \vec{F} содержит информацию о границах объекта и его элементов. Универсальной информацией (геометрической) обладают схемы и чертежи, которые характеризуют плотность распределения материала в пространстве и пограничную область взаимодействия с внешней средой $g \in V \subset M_g$.

Эндосистема, или объектовая модель S_0 , представляет объект обособленно от среды обитания и описывает его внутреннее содержание:

$$S_0 \subset V \times F \times Q. \quad (4)$$

При этом скалярные компоненты эндосистемы входят в состав концепции независимо друг от друга как факторы решения частных задач достижения цели. Их роль состоит в представлении идей на скалярном поле фазовых параметров. Декартово произведение скалярных компонентов эндосистемы образует упорядоченные тройки фазовых параметров (x, g, u) , связанные векторным именем концепции:

$$S_0 = \{(x, g, u) | x \in V \wedge g \in F \wedge u \in Q\}. \quad (5)$$

Связи объекта со средой обитания характеризуются экзосистемой:

$$S_z \subset R \times P \times E, \quad (6)$$

где R, P, E – соответственно множества, составляющие модели ресурсов, внешних нагрузок и полезных эффектов.

Связь субъекта проектирования D с информацией об объекте S_0 и экзосистемой S_z определяется функциональной системой, моделирующей управление творческим процессом со стороны ЛПП (рисунок 4):

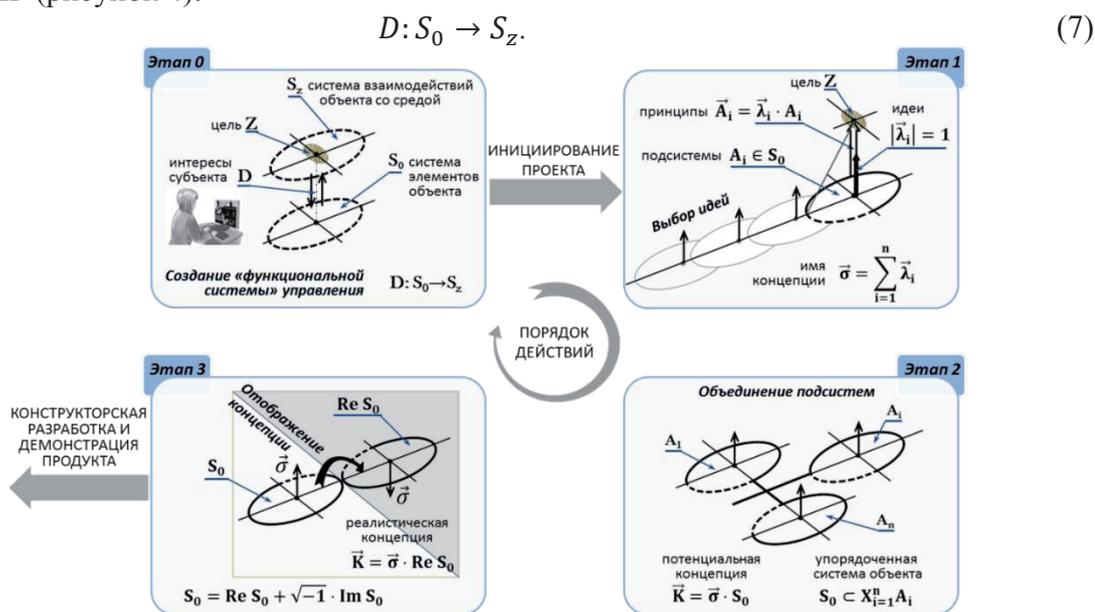


Рисунок 4 – Модели управления концептуальным проектом

Здесь экзосистема S_z служит для измерения целевых показателей (6) и получения информации для принятия решений. Объектовая эндосистема S_0 содержит результаты целенаправленных усилий ЛППР при том, что конечная цель процесса проектирования заключена в более содержательной векторной модели концепции с направляющими идеями. Поэтому выражение (7) предполагает $D = D(\vec{\sigma})$. Таким образом, в соответствии с интересами (1) и полезными идеями (3) ЛППР решает задачу разработки технической концепции.

3 Анализ идей

Начало концептуального проектирования (рисунок 1) следует за подготовкой ТЗ, в котором сформулированы цель и задачи проекта, и разработкой стратегических идей, включённых в замысел проекта.

Первый этап проекта с достижением УГТ1 [6] посвящён выбору векторного имени концепции (3) - рационального сочетания идей технической концепции из числа возможных для достижения поставленной цели (см. рисунок 5). Анализ идей невозможен без их образного представления. В проектной деятельности необходимо иметь наглядные представления о предмете, которым интересуется ЛППР [7]. Известны два способа творческого мышления:

Интуитивный, как способность к озарению, т.е. к одномоментному осознанию сути искомого решения. Интуиция проявляется в *образном мышлении* на основе воображения, эмпатии и опыта. Возникшие мыслеобразы представляются без деталей, как одно целое, как ожидаемое знание из неопределённого источника, полученное в результате интеллектуального напряжения.

Логический, как способность создавать понятия, суждения и умозаключения, оперировать методами анализа, синтеза, аналогии, индукции и т.д.

Решение творческой задачи приводит сначала к появлению мыслеобраза (из памяти или благодаря воображению), а затем к его интерпретации и логической трансформации. Для решения проектных задач ЛППР должно обладать хорошей интуицией и развитым образным мышлением. Для управления проектом ценным качеством является способность ЛППР организовать коллективное мышление. Ожидаемым результатом общения сотрудников могут стать полезные идеи для решения поставленной задачи и коллективный выбор лучшей из них, что снижает риск субъективной ошибки.

Технический облик (ТО). От мыслеобраза к ТО самолёта необходим логический переход, использующий опыт ЛППР и других специалистов. Выражением полезных идей ЛППР являются проектные признаки, которые должны быть выбраны при формировании ТО. При этом проектанту необходимо составить непротиворечивое объединение проектных признаков, отражающих нужное сочетание идей и образующих первичную объектовую систему с учётом известных правил проектирования самолётов [8, 9] и типовых проектных решений.

Слово «облик» в НИИ и ОКБ отрасли означает нечто большее, чем просто внешний вид. В данной статье *облик* – это простая модель технической системы, содержащая внешне отлич-

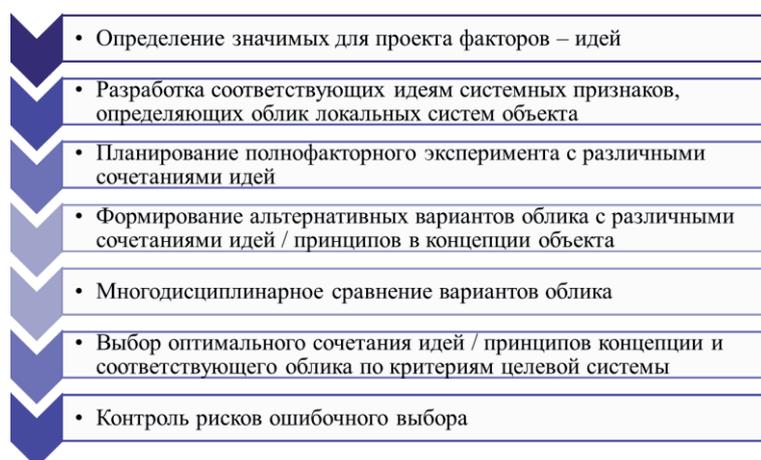


Рисунок 5 – Этапы и методы анализа идей

чимые проектные признаки объекта, дающие представление о его конфигурации и особенностях основных элементов. По смыслу ТО совпадает с понятием *схема* – это упрощённое изображение, строение чего-либо в общем виде, знаковое описание логической модели и иные формы лаконичного представления сути дела. Это позволяет определять информационное содержание ТО как протосистему в качестве первичной системы S_0 (1).

Протосистема S_0 и последующие, более содержательные в своём развитии эндосистемы объекта, образуют скалярную величину векторной концепции объекта. Направление её определяется векторным именем концепции \vec{c} , рациональный состав которого заранее неизвестен и подлежит разработке. Для решения этой задачи ЛПР привлекает новые идеи, предположительно более эффективные, чем известные. Рассматриваются различные комбинации тех и других идей, каждая из которых находит своё выражение в соответствующем ТО объекта.

Разработка множества альтернативных вариантов возможного облика самолёта, отвечающих одному ТЗ, служит решению задачи прямого поиска идей рациональной концепции. Возможные варианты подвергаются многодисциплинарным исследованиям с целью их сравнения и выбора лучшего. Для этого анализа служат полуэмпирические инженерные методики, руководства для конструкторов и САПР с программами многодисциплинарного расчёта характеристик, адаптированными для ЛА определённого назначения, например [10].

Для наглядного представления результатов многодисциплинарных расчётов определяются потребные размеры самолёта и формируется его ТО (рисунок 6). Содержание такой протосистемы достаточно, чтобы определить основные свойства объекта исследования, образующие его экзосистему S_z .

Сравнение вариантов. Этап «Анализ идей» не предполагает непосредственного сравнения единичных векторов $\vec{\lambda}_i$, т.к. они безразмерны. Сравнение происходит опосредованно – на основе мыслеобразов с логическим построением ТО, каждый из которых отражает несколько идей, составляющих имя концепции. На рисунке 4 такое сравнение показано в векторной форме, а на рисунке 7 – в предметной. Например, варианты самолёта могут быть построены на идеях применения силовых установок различного типа и компоновки. В представленных вариантах чередуются две пары принципов, предусматривающих двигатели ТВВД или ТРДД (варианты 1 и 2), планер интегрального или федеративного типа (3 и 4).

При использовании n идей количество вариантов в сравнении должно составлять не менее числа 2^n [12]. Тогда построенная с участием новых n идей из 2^n ТО траектория поиска гарантированно содержит рациональную концепцию с наилучшими характеристиками.

Трудоёмкий процесс разработки и изучения множества технических обликов создаёт «сопротивление» случайному, необоснованному выбору. Проведение полнофакторного эксперимента с полезными идеями и всеми возможными техническими обликами исключает неполноту рассмотрения и риск ошибки, гарантирует 100%-ый успех поиска рационального

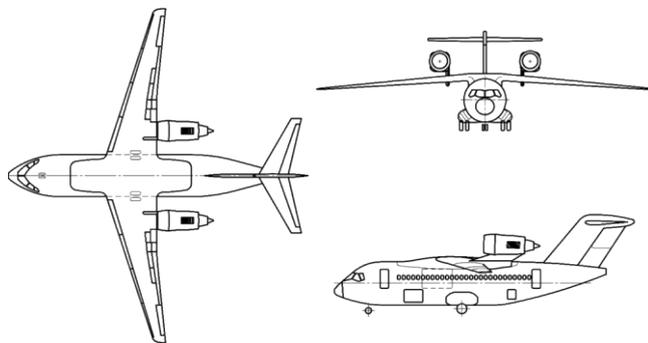


Рисунок 6 – Технический облик самолёта (пример)

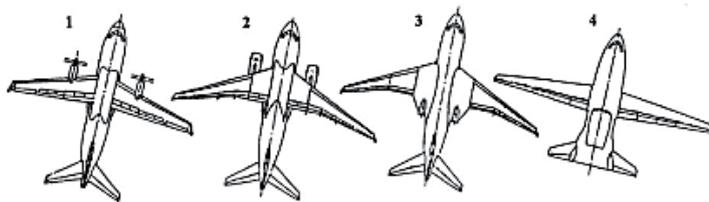


Рисунок 7 – Возможные варианты транспортного самолёта [11]

решения проектной задачи с апробацией n – конкретных новых принципов в концепции самолёта (на рисунке 8 пример для $n=3$). Рассмотрение 1-2 вариантов из числа возможных может удовлетворить их автора, но делает успех проекта маловероятным. Отметим, что большая трудоёмкость «Анализа идей» ограничивает практическую сложность этой задачи.

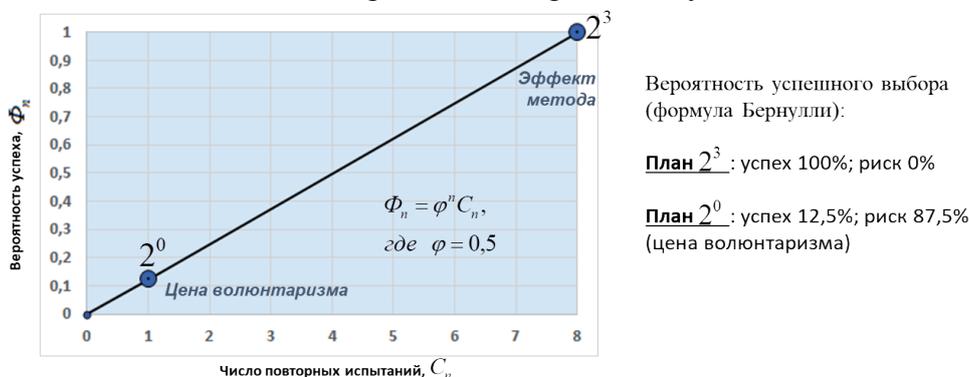


Рисунок 8 – Планирование проектного эксперимента [12]

Принятое на Этапе 1 решение по выбору объекта с наилучшим сочетанием идей сохранится неизменным до Этапа 3 концептуального проекта:

$$\vec{\sigma}(1) = \vec{\sigma}(2) = \vec{\sigma}(3) = const. \quad (8)$$

При этом концепция объекта на Этапе 1 не является ни полноценной, ни завершённой. Причина в том, что модель объектовой протосистемы $S_0(1)$, представленная в ТО самолёта, далека по своему содержанию от многоуровневого и многодисциплинарного описания объекта S_0 , которое позволит довести концепцию до уровня технического предложения: $S_0(1) < S_0(2) < S_0(3)$. По окончании Этапа 1 устраняется риск применения ошибочных идей, хотя и сохраняется неопределённость состава и свойств элементов системы в выбранной концепции самолёта (рисунок 9).



Рисунок 9 – Управление рисками на этапах концептуального проектирования

4 Синтез системы

Цель Этапа 2 состоит в построении внутренне упорядоченной объектовой системы и оценке её осуществимости. Исходными данными для проектирования объекта с достижением УГТ2 являются требования к самолёту, его ТО и др. данные, полученные ранее. Ввиду сложности объектовой системы требуется её углублённое изучение с учётом влияния, которое оказывают свойства элементов на выполнение ТЗ. В этой деятельности компоновочные исследования играют центральную роль для разработки общей геометрической модели. Что-

бы сформировать математическую модель (ММ) самолёта, необходимо получить рекомендации профильных специалистов. Объединяя предложения экспертов, участвующих в проекте, создаётся интегрированная база данных. Проектант даёт геометрическую интерпретацию поступивших предложений, формируя трёхмерную ММ поверхности объекта вместе с внутренней компоновкой (пример см. рисунок 10). Составленная трёхмерная геометрическая модель самолёта используется в различных исследованиях, на её основе генерируются сетки для аэродинамических и прочностных расчётов.

Для синтеза технической системы в соответствии с выбранным сочетанием идей применяются метод согласования проектных параметров эндосистемы S_0 и метод риск-анализа характеристик экзосистемы S_z .

Метод согласования. На Этапе 2 предусмотрена детализация объектовой системы, выбор условий согласования локальных систем, их оптимизация по выбранным критериям эффективности, а также формирование компоновки агрегатов объекта и выбор их рациональных параметров (см. рисунок 11).

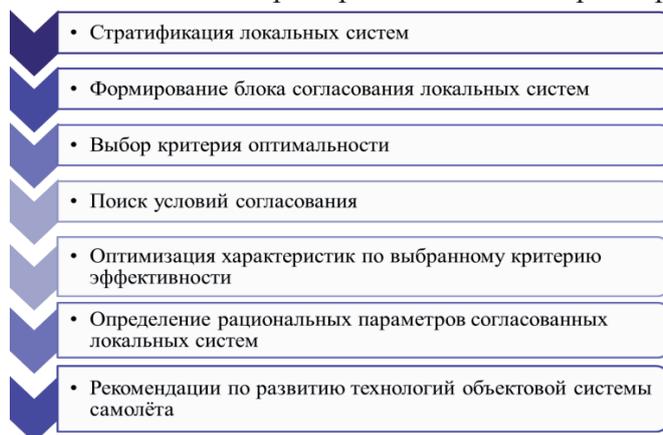


Рисунок 11 – Методы согласования элементов объектовой системы

условие и есть согласующий фактор, выбор которого должен обеспечить максимальную дальность $\bar{L}_{кр}$. В результате решения задачи определяется оптимальная степень двухконтурности ($m_0 = 4.5$) и вариант профилировки крыла с аэродинамической круткой (рисунок 13). Согласование подсистем объекта выполняет объединяющую функцию при формировании его геометрической модели и упорядочении объектовой системы данных.

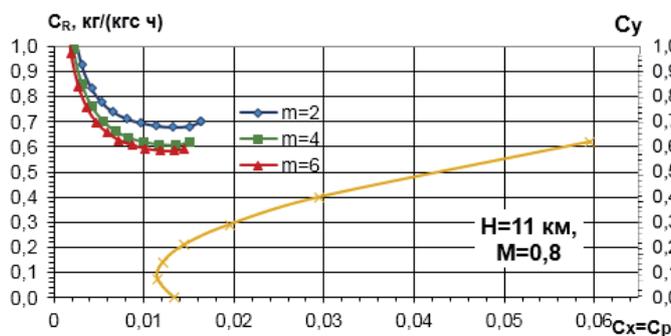


Рисунок 12 – План согласования аэродинамики планера с параметрами двигателя

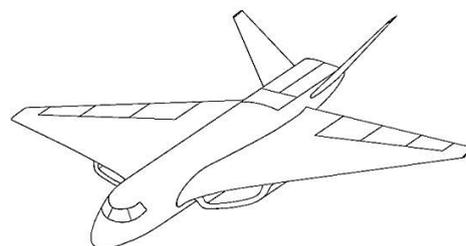


Рисунок 10 – 3D модель регионального самолёта [13]

В примере на рисунке 12 рассматривается взаимодействие двух основных агрегатов в системе самолёта – планера и двигателей. Их технические модели параметризуются в диапазоне, который может содержать глобально оптимальные значения важнейших параметров. В данном случае это степень двухконтурности (m) ТРДД и особенности аэродинамической компоновки крыла. Составляется план согласования разнородных параметров по условиям крейсерского полёта, когда тяга двигателей (C_p) должна уравнивать силу аэродинамического сопротивления ($C_x = C_p$). Это

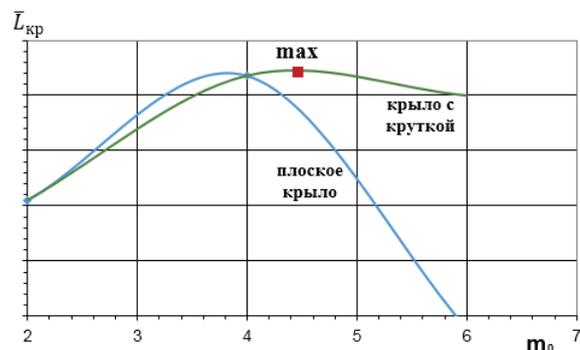


Рисунок 13 – Результат согласования степени двухконтурности двигателя и профиля крыла

Метод риск-анализа на Этапе 2 позволяет измерить степень неопределённости расчётных характеристик системы и оценить риски применения отдельных технических решений. Путём верификации при сравнении с ТЗ выделяются критические характеристики, требующие уточнения технологий создания новой АТ, чтобы гарантировать выполнение ТЗ.

Согласно методологии (рисунок 14) в первую очередь формируются модели неопределённости основных характеристик объекта, от которых непосредственно зависит его целевая функция. Например, расход топлива, аэродинамические и массовые характеристики самолёта в связи с дальностью его полёта. Их значения на начальных этапах проекта не могут быть определены точно. Поэтому по статистике или экспертно необходимо оценить распределение их вероятных величин в возможном диапазоне значений. На этой основе выполняется имитационное моделирование с объединением случайных величин в составе интегрального показателя, например, методом Монте-Карло. Полученную гистограмму распределения вероятных значений интегрального показателя сравнивают с требованиями к самолёту (рисунок 15). Результатом верификации проектных данных становится вероятность выполнения требуемых значений, (например, интеграл от плотности вероятности дальности полёта, превышающей ТЗ), которую необходимо исследовать на чувствительность к локальным неопределённостям, определив критические характеристики, вносящие наибольший вклад в риски невыполнения требований.

Например, анализируется вероятность выполнения требований в зависимости от трёх характеристик, определяющих дальность полёта, включая: аэродинамическое качество, удельный расход топлива и массу пустого самолёта. Выполняется поочерёдное фиксирование этих характеристик в пределах диапазонов их неопределённости, в т.ч. на уровне благоприятных, средних и неблагоприятных значений. Это необходимо, чтобы сделать частные прогнозы для принятых технологий. Если одно из фиксированных значений окажется неизбежным, необходимо знать, как изменится вероятность выполнения ТЗ самолёта.

Итак, на Этапе 2 путём согласования основных элементов производится синтез функциональных агрегатов системы (рисунок 4) с рациональными параметрами, которые обеспечивают объектовой системе наилучшие эксплуатационные характеристики. Так устраняются неопределённости состава системы и происходит упорядочение её элементов (рисунок 9).

5 Аналогии концепции

Сам факт проведения риск-анализа на Этапе 2 говорит о мнимом характере расчётных данных в составленном описании объектовой системы:

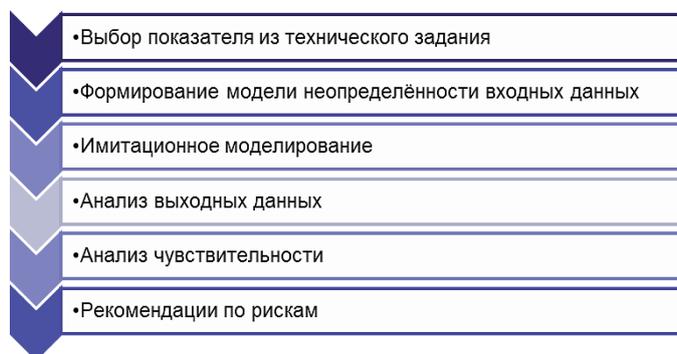


Рисунок 14 – Методология оценки технических рисков

На этой основе выполняется имитационное моделирование с объединением случайных величин в составе интегрального показателя, например, методом Монте-Карло. Полученную гистограмму распределения вероятных значений интегрального показателя сравнивают с требованиями к самолёту (рисунок 15).

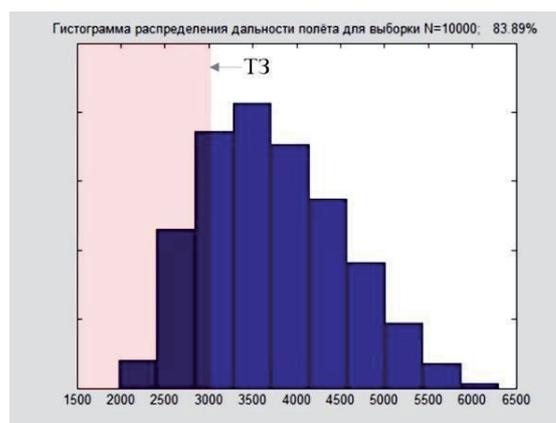


Рисунок 15 – Распределение плотности вероятности расчётной дальности полёта

$$S_0(2) = Re S_0(2) + \sqrt{-1} \cdot Im S_0(2), \quad (9)$$

где $Re S_0(2) \ll Im S_0(2)$.

Независимо от методологии исследования к реалистической информации, описывающей объектовую систему, можно отнести статистические данные и опыт специалистов. Для доказательства осуществимости новых результатов разработки необходима их экспериментальная проверка на следующем Этапе 3. Содержание этапа показано на рисунке 16.

Информационное обеспечение. Основу технологии проектирования комплекса экспериментальных моделей самолёта на этом этапе составляют средства информационной поддержки процесса проектирования - CAD/CAM/CAE-системы [14, 15]. Создаётся универсальное геометрическое объёмно-цифровое изображение самолёта в CAD-системах и многодисциплинарное электронное описание этой модели с помощью CAE-программ. Формируется база расчётных и экспериментальных данных с возможностью управления ими. Такая база данных позволяет осуществлять создание, доступ, распределение и контроль за обновляемыми хранилищами информации в рамках PDM-технологий (см. рисунок 17).

Созданные на Этапе 3 электронные чертежи и твёрдотельные модели сборки используются в конструировании и производстве моделей [15, 16]. Комплекс моделей, созданный на основе принципов подобия [17], служит для проведения экспериментов в соответствии с методиками и программами испытаний. Результаты экспериментальных и расчётных исследований используются для подтверждения проектных данных.

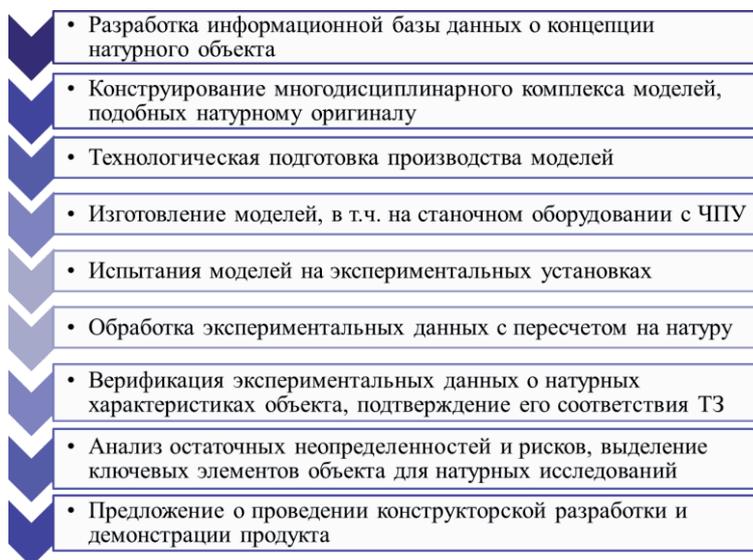


Рисунок 16 – Валидация критических характеристик объекта

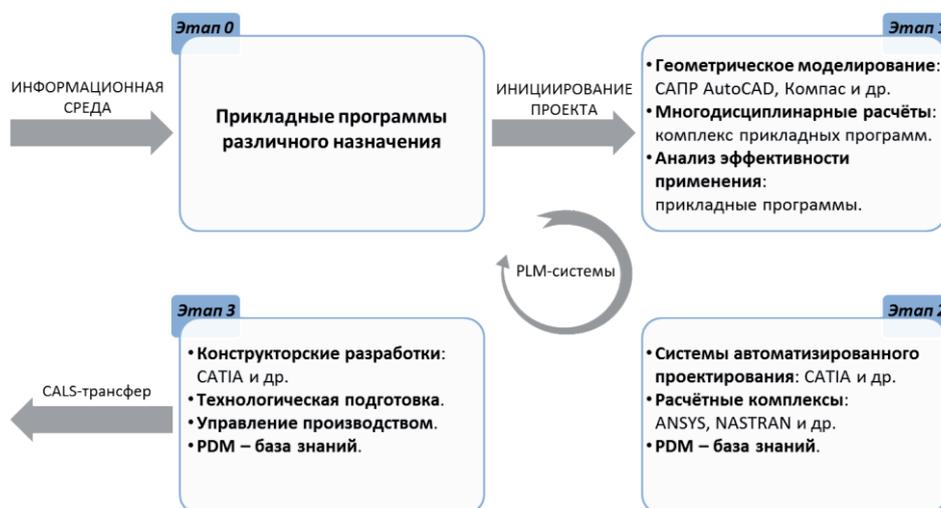


Рисунок 17 – Информационное обеспечение проекта

На Этапе 3 происходит трансформация части мнимых в реалистические характеристики разработанной технической концепции. При этом множество действительных данных (9) объектовой системы определённо увеличивается так, что:

$$S_0(3) = Re S_0(3) + \sqrt{-1} \cdot Im S_0(3),$$

где $ReS_0(3) \gg ReS_0(2)$

Трансфер технологий. Подобие моделей есть простейшее преобразование во взаимно однозначных (конформных) отображениях трёхмерного оригинала и его образа. На концептуальной стадии проекта оригиналом является сочетание идей – векторное имя концепции $\vec{\sigma}$ как прообраз её скалярного содержания, заключённого в объектовой системе S_0 . При этом суммарный вектор идей направлен в сторону их источника, неизменного на всех этапах развития концепции (рисунок 4). Являясь информационным проводником оригинала, концепция объекта ($\vec{K} = \vec{\sigma} \cdot S_0$) отображается в своих образах-аналогиях - в физических и иных моделях, проявленных на Этапе 3 в квазиреальных условиях применения будущего объекта. Вслед за этим управление проектом и направление вектора $\vec{\sigma}$ изменяются. Экспериментальные модели останутся образами, но оригинал в новом отображении будет другим. Им станет будущий натуральный объект. Дальнейшие разработки проводятся на материальной основе и в реальных условиях.

Начиная с Этапа 4, предстоит выполнить стадию «В» проекта (таблица 1). Её управление решит задачи конструирования и испытания опытных образцов будущего изделия. Однако эта деятельность не может быть инициирована раньше, чем у её руководителей возникнет интерес к работе над предложенным проектом.

Следовательно, для рассматриваемого Этапа 3 характерно двойное назначение – он служит не только для производства доказательных фактов в пользу разработанной концепции, но и для активной пропаганды полученных знаний среди ЛПП, квалифицированных в материализации идей. Иначе говоря, научная организация Этапа 3 должна играть роль «индуктора», возбуждающего внешний интерес к потребительскому потенциалу и технической эффективности новой концепции изделия.

6 Особенности концептуального проекта

Многодисциплинарная организация. На стадии «А» активными участниками проекта являются эксперты в областях аэродинамики и силовой установки, конструкции и системы управления, испытаний и эксплуатации АТ. В многодисциплинарном коллективе с объединяющим участием специалистов по проектному управлению и проектно-компоновочным разработкам профильные специалисты выполняют все этапы работы. Деятельность профильных специалистов обеспечивает квалифицированное решение основных задач концептуального проектирования – от выбора альтернативных идей и создания единой ММ объекта до получения достоверных данных о прогнозируемых характеристиках объекта.

Новая технология в сравнении. Особенности технологии проектирования, представленной в статье, начинаются с непосредственного обращения к теории познания с фундаментальными законами творческой деятельности. При этом для методов анализа, синтеза и аналогии разработаны логико-математические модели исследования, которые оперируют строгими понятиями концепции, принципа, идеи, системы на языке теории множеств и векторного анализа [1]. Именно они определены в качестве предметов проектного управления при разработке технической концепции будущего изделия.

На этапах «Анализа идей» и «Синтеза системы» научные методы позволяют численно определить вероятность успеха и риски в решении соответствующих задач. На этапе

«Аналогии концепции» устраняются неопределённости критических характеристик для ключевых проектных решений.

Концептуальный проект рассматривается как часть многоэтапного процесса разработки нового изделия. Аналогичным образом эта деятельность представлена и в «Системной инженерии» [18], которая является сводом знаний для выполнения полномасштабных проектов. Это собрание рекомендаций основано на опыте проектных разработок полного цикла и составлено в интересах широкого круга специалистов – инженеров, конструкторов, технологов и в т.ч. менеджеров проекта.

Проведено сравнение разработанной технологии с известными регламентами. Содержание расчётных и экспериментальных исследований, выполненных, например, на Этапе 3 проекта, вполне соответствует требованиям УГТЗ (таблица 1). Требования к завершению концептуальной стадии проекта идентичны основному содержанию эскизного проекта, которое представлено в действующем ГОСТ РВ 15.203-2001.

Действующий на современных авиастроительных предприятиях ОАК «Порядок управления авиационными программами» включает этапы 0, 1, 2, 3 (рисунок 18), по своим задачам аналогичным порядку концептуального проектирования на рисунке 1.

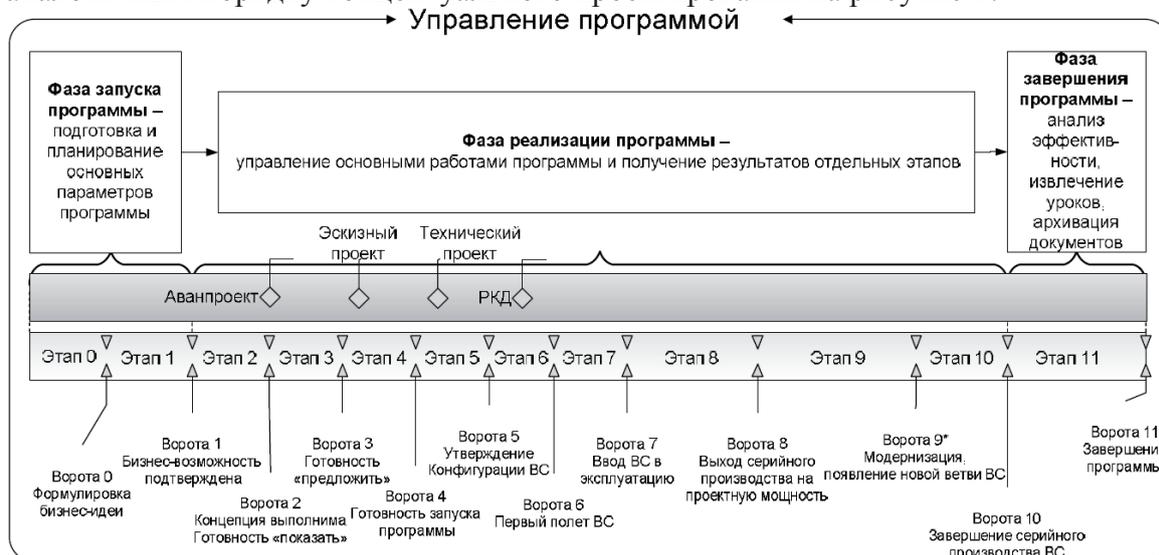


Рисунок 18 – Управление программой

Их описание отличается терминологией, удобной для менеджеров проекта (рисунок 3), и составляет Стадию А «Разработки концепции и технологий продукта» (см. таблицу 1). Её значение для полномасштабного проекта описано стандартом ОАК, который представляет аналогичный Этап 3, как «Определение изделия». Этап предназначен для оценки конкурентоспособности и определения конфигурации ВС. В ходе этого этапа уточняется облик ВС и разрабатывается основная часть эскизного проекта. По его результатам выявляются основные риски программы и планируются меры по их снижению. Существенным результатом является «Готовность предложить», которая предполагает заключить «мягкий» контракт с будущим заказчиком.

Для того, чтобы исполнить Стадию А в полномасштабном проекте, представленная технология концептуального проектирования предусматривает трансфер полученных результатов на этапы 4, 5, 6 конструкторской разработки.

Заключение

Статья развивает системный подход в проектировании самолёта [1, 19, 20] и знакомит с методами формализации разработки концепции будущего изделия. Сравнение со стандартными регламентами создания АТ показывает, что предложенная технология разработки концепции нового изделия по задачам аналогична Этапам 0, 1, 2, 3 стандарта ОАК. Особенности предложенной технологии состоят в систематическом применении логико-математических моделей и численного определения рисков для принятия обоснованных проектных решений. Результаты концептуальных проектов, разработанных согласно предложенной технологии, могут быть использованы на следующей стадии «Конструкторская разработка и демонстрация продукта».

Список источников

- [1] *Скворцов Е.Б., Шелехова А.С.* Начала теории концептуального проектирования с приложениями в области авиационной науки и технологий / Управление большими системами // Сборник трудов. М.: ИПУ РАН, 2018. Выпуск 75. С.170-206.
- [2] *Котлер Ф.* Основы маркетинга / пер. с англ., С: Прогресс, 1990, 736 с.
- [3] *Скворцов Е.Б., Шелехова С.В., Самойлов И.А., Лесничий И.В.* Измерение авиарынка и планирование поставок пассажирских самолётов // Общероссийский научно-технич. журнал «Полёт», 2022, №5. С.3-13.
- [4] *Гермейер Ю.Б.* Игры с непротивоположными интересами. М: Наука, 1976, 328 с.
- [5] *Володин С.В.* Стратегическое управление проектами на примере аэрокосмической отрасли. М: Ленанд, 2019, 148 с.
- [6] ГОСТ Р 57194.1-2016. Трансфер технологий. Общие положения.
- [7] *Ильин Е.П.* Психология творчества, креативности, одарённости. СПб: Питер, 2009. 434 с.
- [8] *Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисейцев Н.К.* и др. Проектирование самолётов / под ред. Егера С.М. – М: Машиностроение, 1983. 616 с.
- [9] *Торенбик Э.* Проектирование дозвуковых самолётов / Пер. с англ. – М: Машиностроение, 1983, 648 с.
- [10] *Денисов В.Е., Каргопольцев В.А., Шкадов Л.М., Уджуху А.Ю.* Опыт разработки систем автоматизации предварительного проектирования самолётов и вертолётов / В сб. «Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники», М: Физматлит, 2005. С.389-400.
- [11] *Чанов М.Н., Скворцов Е.Б. и др.* Анализ технических концепций транспортного самолёта с различными типами и компоновкой силовой установки // Вестник Московского авиационного института, 2020, т.27, №4. С.30-47.
- [12] *Скворцов Е.Б., Шелехова А.С.* Метод анализа альтернатив в концептуальном проектировании авиационной техники. «Ученые записки ЦАГИ», 2017, том XLVIII, №5. С.54-62.
- [13] *Бондарев А.В., Васин С.С., Скворцов Е.Б. и др.* Разработка и диверсификация технологий дозвукового самолёта интегральной схемы с треугольным крылом. Часть 1 // Общероссийский научно-технический журнал «Полёт», 2019, №9. С.3-11.
- [14] *Буньков Н.Г.* Современная информационная технология в создании летательного аппарата (введение в CALS (ИПИ)-технологии). М.: Изд-во МАИ, 2007. 252 с.
- [15] *Вермель В.Д.* Развитие автоматизации проектирования и изготовления аэродинамических моделей самолётов в 1990-2000 г.г. / В сб. «Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники», М: Физматлит, 2005. С.367-388.
- [16] *Балашова Ю.С., Вермель В.Д., Мамонтов О.Б., Овсянников И.Ю., Подлеснов А.М., Шиняев А.В.* Автоматизация управления производством аэродинамических моделей // Вестник МГТУ «Станкин», №2(49), 2019.
- [17] *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М: Наука, 1977, 440 с.
- [18] *Косяков А., Свит У.* и др. Системная инженерия. Принципы и практика / пер. с англ. – М: ДМК Пресс, 2014. 624 с.
- [19] *Sadraey M.H.* Aircraft design: a systems engineering approach. A John Wiley & Sons, Ltd.. 2013. 778 p.
- [20] *Gatian Katherine N.* A quantitative model-driven approach to technology selection and development through epistemic uncertainty reduction // Georgia Institute of Technology. 2015. 423 p.

Сведения об авторах



Скворцов Евгений Борисович, 1947 г. рождения. Окончил Московский авиационный институт им. С. Орджоникидзе (МАИ) в 1971 г., к.т.н. (1993). Начальник научно-исследовательского отдела ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов около 80 работ, включая 8 патентов на изобретения. Область научных интересов – исследование перспектив развития авиационной техники, разработка технических концепций и новых технологий создания ЛА. skvortsov-tsagi@yandex.ru.

Бондарев Антон Владимирович, 1988 г. рождения. Окончил Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ) в 2011 г., аспирантуру ЦАГИ в 2019 г. Ведущий инженер Научно-исследовательского управления реализацией проектов ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов более 30 работ, включая 5 патентов. Область научных интересов – исследование перспективных концепций и технические решения для новых технологий ЛА. AuthorID: 1070766. bondarevram@mail.ru.



Коноплева Виктория Марковна, 1994 г. рождения. Окончила Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ») в 2018 г. Аспирант ЦАГИ. Специалист Центра комплексной интеграции технологий ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов 14 работ. Область научных интересов – методы принятия проектных решений с учётом рисков и ограничений. viktoriya.konopleva@tsagi.ru

Сонин Олег Владимирович, 1971 г. рождения. Окончил Московский авиационный институт им. С. Орджоникидзе (МАИ) в 1995 г., аспирантуру ЦАГИ в 2002 г. Ведущий инженер НИО-10 ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов более 30 работ в области концептуального проектирования и создания автоматизированных систем компоновки транспортных самолётов. Author ID (Scopus): 15737603500 velomobil@yandex.ru



Чанов Максим Николаевич, 1983 г. рождения. Окончил Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ) в 2006 г., аспирантуру ЦАГИ в 2021 г. Ведущий инженер Научно-исследовательского управления реализацией проектов ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов 26 работ, включая 3 патента на изобретения. Область научных интересов – проектные исследования и разработка новых концепций и технологий ЛА. arzmax@bk.ru

Шелехова Анна Сергеевна, 1985 г. рождения. Окончила Российскую экономическую академию им. Г.В. Плеханова в 2006 г., к.т.н. (2021 г.). Главный специалист Отдела управления проектами ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов 15 работ в области риск-анализа и управления качеством научно-исследовательских проектов. anna.shelekhova@tsagi.ru ✉



Поступила в редакцию 13.11.2023, после рецензирования 28.11.2023. Принята к публикации 1.12.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-479-495

Formalized conceptual design technology in the aircraft industry

© 2023, E.B. Skvortsov, A.V. Bondarev, V.V. Konopleva, O.V. Sonin, M.N. Chanov, A.S. Shelekhova ✉.

Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N. E. Zhukovsky ("TsAGI"), Zhukovsky, Russia

Abstract

The article is devoted to the general issues of design formalization and practical methods of conceptual project development in civil aircraft industry. The project idea and the sequential implementation of the project concept development stages are considered. Special attention is paid to marketing and justification of the project strategy. The importance of

the idea analysis method for the project concept is shown. In the task of the technical system synthesis an approach to the coordination of its elements and a risk analysis of the designed civil aircraft critical characteristics is presented. The process of validation the aircraft project concept under development by means of experimental analogies is described. The presented methodology was developed for the first time as a complete full-cycle technology of civil aircraft conceptual design, the scientific results of which will eliminate the risks of erroneous choice of the technical concept and its inconsistency with the technical specifications.

Keywords: project, aircraft, concept, marketing, strategy, idea analysis, system synthesis, concept analogies.

For citation: Skvortsov EB, Bondarev AV, Konopleva VV, Sonin OV, Chanov MN, Shelekhova AS. Formalized conceptual design technology in the aircraft industry [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 479-495. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-479-495.

Acknowledgment: the authors express their gratitude to the lead engineer of TsAGI S.V. Shelekhova for her help in the design of the article.

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

List of figures and tables

- Figure 1 - Stages of conceptual project development
- Figure 2 - Stages and methods of project concept formation
- Figure 3 - A full-scale project of a new aircraft development
- Figure 4 - Conceptual project management models
- Figure 5 - Stages and methods of idea analysis
- Figure 6 - Technical appearance of an aircraft (example)
- Figure 7 - Possible variants of a transport aircraft [11]
- Figure 8 - Planning of the project experiment [12]
- Figure 9 - Risk management at the conceptual design stage
- Figure 10 - 3D model of a regional aircraft [13]
- Figure 11 - Methods of matching elements of the object system
- Figure 12 - Plan for matching airframe aerodynamics with engine parameters
- Figure 13 - Result of matching the engine bypass ratio and the wing profile
- Figure 14 - Methodology of technical risk assessment
- Figure 15 - Probability density distribution of the estimated flight range
- Figure 16 - Validation of the object's critical characteristics
- Figure 17 - Information support of the project
- Figure 18 - Program management
- Table 1 - The technological cycle of the project - from the idea to the introduction into maintenance

References

- [1] **Skvortsov E.B., Shelekhova A.S.** Beginning of the theory of conceptual design with applications in aeronautical science and technology [In Russian]. Management of large systems // Proceedings. Moscow: IPU RAS, 2018; 75: 170-206.
- [2] **Kotler F.** Fundamentals of marketing [In Russian]. Trans. from English, From: Progress, 1990, 736 p.
- [3] **Skvortsov EB, Shelekhova SV, Samoilov IA, Lesnichiy IV.** Measurement of the aviation market and planning of passenger aircraft rates [In Russian]. All-Russian Scientific and Technical journal "Flight", 2022; 5: 3-13.
- [4] **Hermeyer YuB.** Games with non-contradictory interests [In Russian]. Moscow: Nauka, 1976, 328 p.
- [5] **Volodin SV.** Strategic project management on the example of the aerospace industry [In Russian]. Moscow: Leland, 2019, 148 p.
- [6] GOST R 57194.1-2016. Technology transfer. General provisions [In Russian].
- [7] **Ilyin E.P.** Psychology of creativity and giftedness [In Russian]. St. Petersburg: Peter, 2009. 434 p.
- [8] **Eger S.M., Mishin V.F., Liseitsev N.K., etc.** Aircraft design [In Russian]. Ed . Egera S.M. – M: Mashinostroenie, 1983. 616 p.
- [9] **Torenvik E.** Designing subsonic aircraft [In Russian]. Trans. from English. Moscow: Mechanical Engineering, 1983, 648 p.
- [10] **Denisov VE, Kargopoltsev VA, Shkadov LM, Ujuhu AYu.** Experience in developing automation systems for preliminary design of aircraft and helicopters [In Russian]. In the collection "Problems of creating promising aerospace technology", Moscow: Fizmatlit, 2005. P.389-400.

- [11] **Chanov MN, Skvortsov EB. et al.** Analysis of technical concepts of transport aircraft with different types and layout of the power plant [In Russian]. Bulletin of the Moscow Aviation Institute, 2020; 27(4): 30-47.
 - [12] **Skvortsov EB, Shelekhova AS.** Method of analysis of alternatives in the conceptual design of aviation technology [In Russian]. Scientific Notes of TsAGI, 2017; XLVIII(5): 54-62.
 - [13] **Bondarev AV, Vasin SS, Skvortsov EB. et al.** Development and diversification of technologies for subsonic flight of an integrated circuit with a triangular wing. Part 1 [In Russian]. All-Russian Scientific and Technical Journal "Flight", 2019; 9: 3-11.
 - [14] **Bunkov NG.** Modern information technology in the creation of an aircraft (introduction to CALS (IPI) technology) [In Russian]. Moscow: Publishing House of MAI, 2007. 252 p.
 - [15] **Vermel VD.** Development of automation of design and manufacture of aerodynamic models of self-flying in 1990-2000 [In Russian]. In the collection "Problems of creating promising aerospace technology", Moscow: Fizmatlit, 2005. p.367-388.
 - [16] **Balashova YuS, Vermel VD, Mamontov OB, Ovsyannikov IYu, Podlesnov AM, Shinyaev AV.** Automation of production management of aerodynamic models [In Russian]. Bulletin of MSTU "Stankin", №2(49), 2019.
 - [17] **Sedov L.I.** Similarity and dimension methods in mechanics [In Russian]. Moscow: Nauka, 1977, 440 p.
 - [18] **Kosyakov A, Sweet U, etc.** System engineering. Principles and practice [In Russian]. Trans. from English. Moscow: DMK Press, 2014. 624 p.
 - [19] **Sadraey MH.** Aircraft design: a systems engineering approach. A John Wiley & Sons, Ltd.. 2013. 778 p.
 - [20] **Gatian Katherine N.** A quantitative model-driven approach to technology selection and development through epistemic uncertainty reduction // Georgia Institute of Technology. 2015. 423 p.
-

About the authors

Evgeny Borisovich Skvortsov (b. 1947) graduated from the Ordzhonikidze Moscow Aviation Institute (MAI) in 1971, Ph.D. (1993). Head of the Research Department of the FAU "TsAGI". The list of scientific papers consists of about 80 works, including 8 patents for inventions. The scientific interests include the study of the prospects for the development of aviation technology, the development of technical concepts and new technologies for the creation of aircraft. *skvortsov-tsagi@yandex.ru*.

Anton Vladimirovich Bondarev (b. 1988) graduated from the Bauman Moscow State Technical University (MSTU) in 2011, and finished a TSAGI postgraduate course in 2019. Lead engineer of the Research Management of project implementation of the FAU "TsAGI". The list of scientific papers consists of more than 30 works, including 5 patents. The area of scientific interests is the study of promising concepts and technical solutions for new aircraft technologies. AuthorID: 1070766. *bondarevram@mail.ru*.

Victoria Markovna Konopleva (b. 1994) graduated from the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI") in 2018. Postgraduate student of TsAGI. Specialist of the Center for Complex Integration of Technologies of FAU "TSAGI". There are 14 works in the list of scientific papers. The field of scientific interests is methods of making design decisions taking into account risks and limitations. *viktoriya.konopleva@tsagi.ru*

Oleg Vladimirovich Sonin (b. 1971) graduated from the Ordzhonikidze Moscow Aviation Institute (MAI) in 1995, and finished a TSAGI postgraduate course in 2002. Lead engineer of the NIO-10 FAU "TsAGI". The list of scientific papers includes more than 30 works in the field of conceptual design and creation of automated systems for the layout of transport aircraft. Author ID (Scopus): 15737603500. *velomobil@yandex.ru*

Maxim Nikolaevich Chanov (b. 1983) graduated from the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (NSTU) in 2006, finished a TSAGI postgraduate course in 2021. Lead engineer of the Research Management of project implementation of the FAU "TsAGI". The list of scientific papers consists of 26 works, including 3 patents for inventions. Research interests include design research and development of new concepts and technologies of aircraft. *arzmax@bk.ru*

Anna Sergeevna Shelekhova (b. 1985) graduated from the Plekhanov Russian Academy of Economics in 2006, Candidate of Technical Sciences (2021). Chief Specialist of the Project Management Department of FAU "TsAGI". In the list of scientific papers there are 15 articles in the field of risk analysis and quality management of research projects. *anna.shelekhova@tsagi.ru*



Когнитивный потенциал естественных языков агглютинативного типа в интеллектуальных технологиях

© 2023, Д.Ш. Сулейманов, Р.А. Гильмуллин✉, А.Р. Гатиатуллин, Н.А. Прокопьев

Институт прикладной семиотики, Академия наук Республики Татарстан, Казань, Россия

Аннотация

Описан подход к разработке новых интеллектуальных технологий на основе исследования когнитивного потенциала и семиотического моделирования лексико-грамматических структур агглютинативных языков (на примере татарского языка). Проведена классификация когнитивных лексико-грамматических структур, определяющих информационную технологичность языка. На конкретных примерах показаны возможности татарского языка для компактного представления знаний, оперирования с нечёткой информацией, раскрыты такие важные свойства, как регулярность, естественная и конструктивная сложность, рекурсия, глубокий морфологический эллипсис, функциональное разнообразие и семантическая многовалентность аффиксов. Предложенный подход, основанный на семиотических моделях агглютинативного языка и применении децентрализованной системы технологических средств вербализации и контекстного распознавания значений элементов языка, может позволить получать эффективные решения для создания интеллектуальных инструментов накопления и обработки знаний. Работы в этом направлении создают перспективу построения когнитивно-коммуникативной системы искусственного интеллекта на базе универсального языка общения систем искусственного интеллекта между собой и с человеком.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, татарский язык, лексико-грамматические структуры, морфология, рекурсия, нечёткие команды, активность знаний, интеллектуальные системы.

Для цитирования: Сулейманов Д.Ш., Гильмуллин Р.А., Гатиатуллин А.Р., Прокопьев Н.А. Когнитивный потенциал естественных языков агглютинативного типа в интеллектуальных технологиях // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №4(50). С.496-506. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-496-506.

Финансирование: работа поддержана Фондом научных исследований (проект № 23-21-10083).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В исследовании естественных языков (ЕЯ) можно выделить три аспекта: когнитивный, коммуникативный и технологический [1]. Когнитивный аспект – это характеристика ЕЯ с точки зрения возможностей описания модели мира, представления знаний, организации и отображения процессов мышления. Коммуникативный аспект отражает потенциал ЕЯ для кодирования, приёма и передачи, семиотической обработки информации, организации диалога. Технологический аспект определяет формальный и концептуальный потенциалы ЕЯ для реализации средств эффективной обработки, адекватного описания и компактного хранения информации на данном языке, создания эргономичных технических средств, учитывающих специфику языка (например, частотность букв при разработке клавиатуры), а также для разработки интеллектуального программного инструментария, включая операционные системы. В основе искусственных языков и систем программирования лежат глубинные

структуры (ментальность) ЕЯ и, таким образом, эти системы реализуют описательный и вычислительный потенциал соответствующего ЕЯ.

Опыт авторов в области разработок и использования инфокоммуникационных технологий позволяет отметить, что современные средства накопления и обработки знаний неэффективны и не справляются с такими задачами, как поиск и отбор информации в распределённых базах данных, извлечение знаний, семантический анализ текстовой информации. Причиной их неинтеллектуальности является главным образом то, что создаются они с использованием относительно примитивных искусственных языков программирования, представляющих собой подмножество флективно-аналитических языков или искусственных структур, созданных на основе ЕЯ. Морфосинтаксические структуры этих ЕЯ больше ориентированы на реализацию коммуникативных, а не когнитивных функций.

Другая причина неинтеллектуальности систем обработки ЕЯ связана с организацией их моделей на основе формальных систем, практически игнорирующих семантику, в частности, порождающих грамматик [2], что создаёт фундаментальные проблемы: монотонность результатов логического вывода и пассивность инструментов логико-семантического анализа информации. В работе [3] такая организация моделей ЕЯ названа глобальным подходом к исследованию ЕЯ. Эти методы мало подходят для описания агглютинативных языков в целом и татарского языка в частности, поскольку не позволяют эффективно описать важные когнитивные особенности языков этого типа. Например, таких, как рекурсивно-параметрические конструкции, фрактальность лексико-грамматических структур, многовалентность и проактивность корневых и аффиксальных морфем и др.

Основной задачей фундаментальных исследований когнитивного потенциала ЕЯ агглютинативного типа для создания интеллектуальных технологий является разработка и использование семиотических моделей лексико-грамматических конструкций тюркских языков, как формальной основы интеллектуальных технологий, а также лексического корпуса, как лингвистической базы данных. Среди важных признаков интеллектуальности систем принятия решений выделяются такие свойства, как активность знаний, т.е. первичность анализа данных и вторичность принятия решения; возможность оперировать нечёткой информацией, семантически управляемой контекстом, и исполнять нечёткие команды.

В предлагаемом подходе используются языковые инструменты обработки информации, разработанные с учётом свойства проактивности морфем агглютинативных языков. По функциональности такие инструменты являются агентами, подобно агентам в многоагентных системах. Эти инструменты менее автономны, привязаны к контексту и функционируют в тесной связи между собой в соответствии с условиями, сформированными координирующими модулями. Такие модули, разрабатываемые на основе семиотических моделей Пospelова-Полякова [4, 5], обеспечивают целостность и полноту использования доступной информации на каждом этапе функционирования системы обработки информации.

В данной работе на конкретных примерах показывается перспективность исследования в этих целях татарского языка как языка агглютинативного типа, обладающего такими важными свойствами, как регулярность, рекурсия, активность знаний и др.

1 Классификация когнитивных лексико-грамматических структур

Исследование возможностей ЕЯ для разработки языков ИИ входят в число базовых проблем в области построения интеллектуальных систем (ИС) [1]. Особенно важными являются исследования когнитивного потенциала ЕЯ исходя из того, что любой ЕЯ обладает необходимым лексико-грамматическим потенциалом для реализации базовых когнитивных функций, присутствие которых в системах интеллектуальной обработки информации в настоящее

время становится критически востребованной. Такие задачи, как: компьютерная обработка больших массивов ЕЯ-текстов; разработка онтологий в условиях нечёткости данных и динамичности пространства; представление и обработка разнородных и динамических графов знаний; ЕЯ-диалог с ИС; создание больших банков информации на основе ЕЯ; разработка языков-посредников в многоязычной информационной среде, базирующихся на развитых лингвистических моделях, - приобретают особую актуальность в связи с развитием глобальных компьютерных сетей, формированием больших объёмов распределённых данных, и необходимостью создания объяснительного ИИ.

Разработка нового поколения программного инструментария включает:

- исследование грамматических (морфологических, синтаксических, семантических, прагматических) конструкций в различных ЕЯ в целях создания на их базе языков ИИ нового поколения;
- разработку языка-посредника на основе подмножеств и конструкций языков с определёнными свойствами, позволяющими адекватно и сжато описывать контекст и быстро обрабатывать тексты на ЕЯ.

Для ИС обработки знаний важны следующие характеристики:

- время обработки;
- объём памяти для хранения информации;
- компактность хранения и передачи смысла;
- возможность кодирования и обработки нечеткой информации;
- активность знаний.

Первые три характеристики описывают эффективность, а последние – интеллектуальность систем. Татарский язык, являясь одним из тюркских языков, имеет богатую, сложную, регулярную морфологию, обладает потенциалом, позволяющим эффективно кодировать и компактно хранить информацию, а также реализовывать на уровне аффиксальных морфем такие явления, как рекурсия и нечёткость [6].

В объектно-предикативной модели мира именные группы, как правило, обозначают объект или объекты, в то время как действие, процессы, отношения между объектами и группами объектов описываются глагольной группой. Выделяются когнитивные механизмы, реализуемые в рамках именной и глагольной групп, соответственно. Кроме того, структура текста, которая определяется синтаксическими закономерностями языка, служит одним из когнитивных механизмов языка, управляющим в тексте такой важной характеристикой, как активность знаний, естественным образом реализуя логическую схему «анализ-действие».

2 Морфология татарского языка

Татарская морфология является регулярной, почти автоматной [6-8] и в то же время имеет естественную сложность, которая заключается в следующем.

- 1) Возможность аффиксального преобразования словоформы с одного типа в другой путём присоединения определённых аффиксальных морфем справа (праволинейная грамматика). Присоединяясь к словоформе, специальный аффикс-переключатель меняет («переключает») слово с одного типа на другой, например, превращает именную словоформу в глагольную или в форму прилагательного, и наоборот (*уй-уй+ла*: мысль-думай; *кара-кара+у-карау+чы*: наблюдай-наблюдение-наблюдатель). Здесь и далее знак «+» - это условный разделитель слова и аффикса-переключателя. В тексте слитное написание: *уйла* - думай.
- 2) Морфологическое (синтетическое) задание признаков модальности, настроения, эмоционально-личностного отношения к ситуации, объекту или процессу, описываемых данной

словоформой (*кояш-кояш+тай*: солнце-словно солнце; *алды-алды+мыни*: взял-неужели взял).

- 3) Контекстное разнообразие значений аффикса. В татарском языке порядка 90 словоизменительных аффиксальных морфем. Большинство из них имеют несколько значений, т.е. используются для кодирования в тексте нескольких, иногда до 20 и более, различных контекстных значений (смыслов). Например, аффикс *-дан/-тан*, обозначаемый как аффикс исходного падежа: *бакча+дан чыга* (выходит из сада), используется также для кодирования других контекстных смыслов: *корыч+тан каты* (крепче стали: сравнение), *кояш+тан аста* (ниже солнца: точка отсчёта), *укытучы+дан сора* (спроси у учителя: адресат) и т.п.

Именная группа, как правило, кодирует некую семантическую субъектно-объектную ситуацию, а глагольная группа – контекстные отношения над этой ситуацией. Возможность перехода от именной формы к глагольной и, наоборот, через присоединение соответствующих аффиксов позволяет описывать одновременно в пределах одной словоформы как сложную ролевую ситуацию, так и контекстные отношения между семантическими ролями. Тем самым обеспечивается компактность описания и хранения информации. Синтетический (аффиксальный) способ словоизменения обеспечивает кодирование в рамках одной словоформы некоторого значения, описываемого на флективно-аналитических языках (например, на английском) несколькими словосочетаниями или предложениями.

Сложность татарской морфологии конструктивная, т.к. аффиксальная морфема однозначно выделяется в последовательности аффиксов в словоформе, и её значение практически однозначно определяется в лексико-грамматическом контексте. Морфология татарского языка в большой степени регулярна, близка к автоматной, с небольшим количеством исключений из правил, не меняющих смысла, что обеспечивает минимизацию ёмкостных и временных функций при обработке текстов на татарском языке, упрощает анализ структуры и значения словоформы.

Важное свойство татарской морфологии - это фиксированная позиция, «жёсткое» размещение аффиксов в последовательности аффиксальных морфем. Это означает, что одна и та же схема сочетания морфем (морфотактика) присуща почти всем именным и глагольным группам. Это даёт возможность по одной и той же схеме (автоматно) образовывать словоформы с одинаковыми глубинными значениями аффиксов. Например: *кул, куллар, кулларым, кулларыма* – (рука, руки, мои руки, моим рукам); *бакча, бакчалар, бакчаларым, бакчаларыма* – (сад, сады, мои сады, моим садам).

Разные именные корневые морфемы *кул* (рука), *бакча* (сад) имеют одни и те же последовательности аффиксальных морфем с идентичными значениями. Приведённые парадигмы описываются следующими схемами: $X(\text{Имя сущ.})$, $X(\text{Имя сущ.})+лар(\text{афф.мн.})$, $X(\text{Имя сущ.})+лар(\text{афф.мн.})+ым$ (афф. притяж., 1-е л., ед.ч.), $X(\text{Имя сущ.})+лар(\text{афф.мн.})+ым$ (афф. притяж., 1-е л., ед.ч.) + *a* (афф. падежн., дат. падеж).

Позиции аффиксальных морфем, составляющих словоформу, неизменны относительно друг друга. Таким образом, можно определить следующие когнитивные механизмы татарского языка: регулярность и естественная сложность морфологии; фиксированность позиций соответствующих типов аффиксальных морфем. Эти механизмы универсальны, т.е. работают на всех словах, входящих в соответствующие классы лексем (части речи).

3 Морфологический эллипсис

Следующая возможность в татарской морфологии, которая может быть отнесена к когнитивному механизму (компактность), называется морфологическим эллипсисом [9] - это

возможность пропуска последовательности аффиксов при однородных именных словоформах с сохранением её в последней словоформе. В понятии морфологической эллипсис последовательность пропускаемых аффиксов может быть сколь угодно длинной (теоретически не ограничена). Т.е. возможен вывод любой последовательности аффиксов, общих для однородных членов, вправо за последовательность однородных членов и присоединение их к последнему справа однородному члену. Например:

Иишек алды тавыкларга, казларга, сарыкларга тулы = ишек алды тавык, каз, сарыкларга тулы (Двор полон кур, гусей, овец).

Мин кырларыбызга, урманларыбызга, елагларыбызга шатланам = Мин кыр, урман, елагларыбызга шатланам (Я радуюсь нашим полям, лесам, рекам).

4 Морфологическая рекурсия

Одним из важных и мощных когнитивных механизмов в татарском языке является механизм рекурсии [10] - это возможность циклического порождения нового значения путём последовательного применения одной и той же «формулы», т.е. повторного присоединения одного и того же аффикса. Такими свойствами обладают аффиксальные морфемы *-ДАГЫ*¹ (локатив2) и *-НЫКЫ* (притяжательность), которые можно назвать также аффиксами неопределённости, т.е. аффиксами, придающими неопределённость множеству существей, связанных с лексемой, к которой присоединяется аффикс рекурсии.

Например, пусть задана лексема *ком* (песок). Присоединение аффикса *-дагы* порождает множество новых существей. Например: *комдагы* {таш-камень, эз-след, агач-дерево, кеше-человек, кош-птица, баз-яма, ... все что угодно, любой возможный объект на песке}. Присоединение аффикса *-НЫКЫ* вносит определённость в предыдущую лексему, “заставляя” словоформу-лексему *-комдагы-на песке* заполнить постпозицию одной из существей (путём выбора, контекстным или явным, одного объекта из множества). Например, эта существей - человек. Одновременно присоединение рекурсивного аффикса *-НЫКЫ* порождает множество новых объектов, принадлежащих человеку или свойств, присущих человеку, образуя неопределённость, которая заполняется контекстно или явно при присоединении следующего рекурсивного аффикса. Для данного случая это: *ком-ДАГЫ* (на песке) (*кеше-человек*)-*НЫКЫ* (голова, рука, шаг, взгляд, часы и т.п., принадлежащие или присущие этому человеку, который на/в песке).

По такой формуле возможно образование словоформы практически неограниченной длины. Такие длинные последовательности морфем в нормальной речи (при коммуникации между людьми, в текстах) практически не используются. Это связано с проблемами глубины памяти человека, удобства общения между людьми. Подобное словоизменение является совершенно корректным для грамматики татарского языка, и словоформа, образованная присоединением любой последовательности, гипотетически всегда имеет смысл. Конкретное значение приобретается при «погружении» словоформы в определённый контекст.

Пример со следующей словоформой: *бакчаныкындагыныкыныкындагы*, которая однозначно раскладывается на составляющие: *бакча-сад* (имя сущ.) + *ныкы* (притяж.) + *ндагы* (локатив2) + *ныкы* (притяж.) + *ныкы* (притяж.) + *ндагы* (локатив2).

Значение данной словоформы таково: «*нечто/некто, которое находится на/в нечто/некто, которое само принадлежит нечто/некто, которое само принадлежит нечто/некто, которое само находится на/в нечто/некто, которое принадлежит саду*».

¹ Здесь и далее заглавные буквы в аффиксальных морфемах обозначают вариативность символов в соответствующих позициях согласно закону сингармонизма.

Эксплицитно задавая параметры после каждой морфемы, можно получить контекстную определённость словоформы. В реальных случаях такие параметры задаются имплицитно, наполняясь конкретным значением в зависимости от контекста речи.

Пример. Пусть после каждого аффикса неопределённости стоят параметры: $бакча+ныкы(x0)+ндагы(x1)+ныкы(x2)+ныкы(x3)+ндагы(x4)+ныкы(x5)$, где x_i – контекстные объекты, т.е. объекты, которые либо приобретают конкретное значение из контекста, либо их задаёт пользователь ($i = 1, \dots, 4$). Тогда, придавая значения параметрам: $x0 = \text{«яблоны»}$, $x1 = \text{«ветка»}$, $x2 = \text{«птичка»}$, $x3 = \text{«крыло»}$, $x4 = \text{«перо»}$, можно получить следующее контекстное значение: *«нечто (значение $x5$, придаваемое параметру последним аффиксом, осталось неопределённым) на пере, что принадлежит крылу, что принадлежит птичке, что на ветке, что принадлежит яблоне»*. Пример показывает, что применение рекурсивных аффиксов приводит к сжатию информации и существенной экономии памяти.

5 Когнитивные механизмы при описании действий

Поверхностное лексическое описание предикатов (действий, отношений), как правило, осуществляется глагольными группами [11, 12]. Свойства регулярности и конструктивной сложности морфологии и фиксированности позиций соответствующих типов аффиксальных морфем в татарском языке присущи также и глагольным группам. В дополнение к когнитивным механизмам, выделенным на основе именных словоформ, можно рассмотреть следующие естественные когнитивные механизмы, проявляющиеся в глагольных словоформах.

5.1 Возможность рекурсивно задавать нечёткие команды и описывать нечёткие действия

Данное свойство кодируется глагольными аффиксами – *Гала и -итыр*, занимающими позицию залога, т.е. сразу же после глагольной основы. Пример с глаголом *кара* (смотри, 2-е лицо, ед.ч., повел. накл.).

караитыр (смотри/поглядывай время от времени); *кара* (смотри)+*итыр* (время от времени); *караитыргала* (смотри время от времени, время от времени – т.е. реже); *кара* (смотри)+*итыр* (время от времени)+*гала* (время от времени); *караитыргалаитыргалаитыр...* (смотри время от времени, время от времени, время от времени – и ещё реже...); *кара* (смотри, корень, 2-е лицо, ед.ч., повел.накл.)+*итыр* (время от времени-изредка)+*гала* (время от времени - ещё реже)+*итыр* (ещё реже)+*гала*(ещё реже)+*итыр* (ещё реже)...

Насколько редко требуется *смотреть/поглядывать* - определяется из контекста ситуации.

5.2 Возможность одной словоформой задавать объектно-предикативные сценарии, ролевые ситуации

Реализация данного свойства обеспечивается рядом специальных глагольных аффиксов, занимающих также залоговую позицию: *-н, -Бли, -т, -Дыр, -Тыр*.

Изменения ролевой ситуации при присоединении соответствующих аффиксов можно рассмотреть на примере с глагольной словоформой *кара* (смотри).

Участники действия: субъект S , объект-предмет O_k , где $k \geq 1$.

Для словоформы *кара* (смотри) ролевая ситуация следующая: S воздействие на O_k .

Присоединение аффиксов *-н, -Бли, -т, -Дыр* приводит к изменениям.

1) *-н: каран – кара+н* (оглядывайся).

Ролевая ситуация: S воздействие S .

2) *-Биш*: *караш – кара+иш* (помогай смотреть-ухаживать/ смотри-ухаживай вместе).

Участники действия: субъект S , объект-актор $A_{i,j}$, объект-предмет O_k , где i – номер группы объекта-актора, $i \geq 1$; j – число участников в группе $i, j \geq 1$.

Ролевая ситуация: S воздействие (помощь) $A_{i,j}$ и (S & $A_{i,j}$) воздействие (бросить) O_k .

3) *-т, -ДЫр*: *карат – кара+т* (сделай так, чтобы смотрел/смотрели-ухаживал/ухаживали)

Ролевая ситуация: S воздействие $A_{i,j} \rightarrow A_{i,j}$ воздействие (смотреть) O_k . Здесь стрелка \rightarrow означает импликацию. *караттыр – кара+т+тыр* (сделай так, чтобы сделали так, чтобы смотрели).

Ролевая ситуация: S воздействие $A_{i,j} \rightarrow A_{i,j}$ воздействие $A_{l,m} \rightarrow A_{l,m}$ воздействие (смотреть) O_k . *караттырт – кара+т+тыр+т* (сделай так, чтобы сделали так, чтобы сделали так, чтобы смотрели).

Ролевая ситуация: S воздействие $A_{i,j} \rightarrow A_{i,j}$ воздействие $A_{l,m} \rightarrow A_{l,m}$ воздействие $A_{s,t} \rightarrow A_{s,t}$ воздействие (смотреть) O_k .

По такой формуле, подставляя новые определённые аффиксы, можно создавать всё новые и новые ролевые ситуации и описывать процессы на лексическом уровне. Например, добавление аффикса *-Ыл* к последней полученной словоформе: *караттыртыл* превращает сам субъект в объект-предмет, объект воздействия, т.е. $S = O_k$.

Получается следующая ролевая ситуация: S воздействие $A_{i,j} \rightarrow A_{i,j}$ воздействие $A_{l,m} \rightarrow A_{l,m}$ воздействие $A_{s,t} \rightarrow A_{s,t}$ воздействие (бросить) S , т.е. воздействие на самого же инициатора-субъекта действия (бросить) через 4 промежуточных объекта-агента (или группы объектов-агентов).

6 Активность знаний

Известно, что английские предложения строятся по схеме *S-V-O (subject-verb-object: субъект-глагол-объект)* [13-15], а татарские - по схеме: *S-O-V*. Т.е. англичанин, если говорит, например, о намерении сходить в кино, сначала скажет, пойдёт или не пойдёт, и только после этого выдаст информацию – куда, какое, зачем, с кем, когда и т.д. (*“We’ll go to the cinema “Attila” with my friends tomorrow”*). Здесь действие управляет ситуацией. После того, как высказано однозначно намерение субъекта *We’ll go – мы пойдём*, дальнейшая информация становится пассивной, практически не влияет на выбор способа действия или усложняет его. В тексте на татарском языке сначала даётся информация и её анализ, и только после этого определяется действие. (*«Без дуслар белән иртәгә буласы “Аттила” киносына барабыз/бармыйбыз»* – Мы с друзьями на завтрашний фильм «Аттила» пойдём/не пойдём).

В ИС это называется активностью знаний, что служит одним из важных признаков интеллектуальности системы. Для подобных систем естественным и основополагающим является стиль мышления: анализ-действие, мышление-цели-алгоритмы, а не командный стиль: действие-анализ, алгоритм-цель, как это реализовано в современных технологиях, основанных на структуре английского языка. Т.е. в тюркских языках сначала анализируется, обрабатывается информация, а затем осуществляется действие: подбирается соответствующая адекватная модель представления знаний или выбираются соответствующие алгоритмы и схемы реализации, эффективность которых во многом определяется корректностью и полнотой анализа информации. Это можно назвать событийным программированием.

Такие возможности татарского языка позволяют ставить задачу разработки программ накопления и извлечения знаний в глобальных компьютерных сетях.

Заключение

Как показывают исследования [6, 16-18], тюркские языки, и в частности татарский язык, как агглютинативный язык, обладающий регулярной морфологией и контекстно разрешаемой конструктивной сложностью, являются эффективным инструментом для создания ИС обработки информации. В силу малых значений показателей временных и ёмкостных оценочных функций для генерации и анализа татарских словоформ (за счёт регулярности) достигается эффективность при накоплении и обработке информации на татарском языке. Компактность передачи смысла текста на поверхностном, лексическом уровне объясняется возможностями языка синтетически, т.е. словоформой, кодировать смысл, который для других языков (английский, русский) формируется аналитически (несколькими предложениями). Агглютинативность языка, алгоритмические закономерности, минимальность исключений, жёсткость синтаксиса позволяют ставить задачу о построении языка промежуточной трансляции, т.е. языка-посредника на базе татарского языка.

Исследование когнитивных лексико-грамматических структур описания, запоминания, хранения, обработки и передачи информации ЕЯ способствует созданию ИС и технологий обработки информации. Представляют интерес ЕЯ агглютинативного типа, обладающие естественными когнитивными технологическими механизмами, которые позволяют на поверхностном уровне эксплицитно вербализовать, фиксировать и отображать стереотипы, когнитивные модели и механизмы, описывающие ситуации и процессы в модели мира [17, 18]. На примере татарского языка показано, что ЕЯ агглютинативного типа обладают когнитивным потенциалом, позволяющим описывать сложные информационные системы обработки знаний. Дальнейшее развитие и применение на практике предлагаемого подхода и принципов исследования лексико-грамматического потенциала ЕЯ позволит создать новые технологии и когнитивные модели обработки знаний и принятия решений в ИС.

Список источников

- [1] *Сулейманов Д.Ш.* К вопросу исследования технологического аспекта естественных языков // Обработка текста и когнитивные технологии: Труды XI Междунар. науч. конф. (7–14 сентября 2009, Констанца). Казань: Изд-во Казанского университета., 2010. С.232-245.
- [2] *Chomsky N.* Syntactic Structures. The Hague: Mouton, 1957. 117 p.
- [3] *Поспелов Д.А., Осипов Г.С.* Прикладная семиотика. <http://raii.org/library/ainews/1999/1/ OSPOS.ZIP>.
- [4] *Pospelov D.* Situational Control: Theory and Practice. Columbus OH: Batelle Memorial Institute, 1986.
- [5] *Поляков В.Н.* Проблемы представления, приобретения и использования знаний в свете обработки естественного языка // Когнитивно-семиотические аспекты моделирования в гуманитарной сфере. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017. С.145-163.
- [6] *Suleymanov D.S.* Natural Cognitive Mechanisms in the Tatar language // In the Collection of the Vienna Proceedings of the Twentieth European Meeting in Cybernetics and Systems Research. Ed. by Robert Trappel. Vienna, Austria, 6-9 April, 2010. P.210-213.
- [7] *Гузев В.Г.* О некоторых экзотических особенностях тюркских языков («тюркские чудеса») // Актуальные проблемы мировой политики. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2020. Вып.10. С.231-245.
- [8] *Щербак А.М.* О морфологической структуре слов в тюркских языках // Морфологическая структура слова в языках различных типов. 1963. С.267-270.
- [9] *Лекант П.А.* Эллипсис как проблема синтаксиса и фразеологии // Ученые записки МОПИ им. Н.К. Крупской. 1966. Т.160, Вып.11. С.210-224.
- [10] *Лодатко Е.А.* Рекурсивные лингвистические структуры // Теоретические и прикладные проблемы русской филологии: Научно-метод. сборник. Славянск: СГПУ, 2004. Вып. XII. С.86-95.
- [11] *Fillmore C.J.* Frame Semantics and the Nature of Language // In Annals of the New York Academy of Sciences: Conference on the Origin and Development of Language and Speech. 1976, Vol. 280. P.20-32.
- [12] *Осипов Г.С., Смирнов И.В., Тихомиров И.А.* Реляционно-ситуационный метод поиска и анализа текстов и его приложения // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. № 2. С.3-10.
- [13] *Givón T.* Syntax: An introduction. John Benjamins Publishing Co., 2001. 500 p.

- [14] **Тестелец Я.Г.** Введение в общий синтаксис. М.: Издательство РГГУ, 2001. 805 с.
- [15] **Гринберг Дж.** Некоторые грамматические универсалии, преимущественно касающиеся порядка значимых элементов // Новое в лингвистике. Языковые универсалии. 1970. Вып. 5. С. 114-162.
- [16] **Gatiatullin A., Suleymanov D., Prokopyev N., Khakimov B.** About Turkic Morpheme Portal // In Proceedings of the Computational Models in Language and Speech Workshop (CMLS 2020). Kazan, November 12-13, 2020. P.226-243.
- [17] **Oflazer K., Sarachlar M.** Turkish Natural Language Processing // Theory and Applications of Natural Language Processing. Series ed. J. Hirshberg, E. Hovy, M. Jhonson. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018. 357 p.
- [18] **Tantug A.G., Adali E.** Machine Translation Between Turkic Languages // Turkish Natural Language Processing. Theory and Applications of Natural Language Processing. Series ed. J. Hirshberg, E. Hovy, M. Jhonson. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018. P.237-255.
-

Сведения об авторах



Сулейманов Джавдет Шевкетович, 1955 г. рождения. Окончил механико-математический факультет Казанского государственного университета в 1977 г., к.т.н. (1985), д.т.н. (2000). Научный руководитель Института прикладной семиотики Академии наук Республики Татарстан (АН РТ), академик АН РТ, профессор. Заслуженный деятель науки РТ, член Российской ассоциации искусственного интеллекта (РАИИ). В списке научных трудов более 300 работ в области прикладной семиотики, компьютерной и когнитивной лингвистики, искусственного интеллекта, электронной и социальной педагогики. Author ID (РИНЦ): 9142;

Author ID (Scopus): 6603474810; Researcher ID (WoS): B-4793-2014. dvdt.slt@gmail.com

Гильмуллин Ринат Абрекович, 1975 г. рождения. Окончил Казанский государственный университет в 1997 г., к.ф.-м.н. (2010). Директор Института прикладной семиотики АН РТ. В списке научных трудов около 50 работ. ORCID: 0000-0002-8520-8921; Author ID (РИНЦ): 179405; Author ID (Scopus): 57079235700. rinatgilmullin@gmail.com ✉



Гатиатуллин Айрат Рафизович, 1972 г. рождения. Окончил Казанский государственный университет в 1994 г., к.т.н. (2002). Ведущий научный сотрудник Института прикладной семиотики АН РТ. В списке научных трудов более 60 работ. ORCID: 0000-0003-3063-8147; Author ID (РИНЦ): 161758; Author ID (Scopus): 56500678000. ayrat.gatiatullin@gmail.com

Прокопьев Николай Аркадиевич, 1992 г. рождения. Окончил Институт вычислительной математики и информационных технологий Казанского Федерального университета в 2015 году. Научный сотрудник Института прикладной семиотики АН РТ. В списке научных трудов около 40 работ. ORCID: 0000-0003-0066-7465; Author ID (РИНЦ): 999214; Author ID (Scopus): 57190803409; Researcher ID (WoS): S-3829-2016. nikolai.prokopyev@gmail.com



Поступила в редакцию 13.11.2023, после рецензирования 23.11.2023. Принята к публикации 1.12.2023.



Cognitive potential of agglutinative languages in intelligent technologies

© 2023, D.S. Suleymanov, R.A. Gilmullin ✉, A.R. Gatiatullin, N.A. Prokopyev

Tatarstan Academy of Sciences, Institute of Applied Semiotics, Kazan, Russia

Abstract

This article describes an approach to development of new intelligent technologies based on the study of cognitive potential and semiotic modeling of lexical and grammatical structures of agglutinative languages (using the Tatar language as an example). A classification of cognitive lexical grammatical structures that determine the information technological effectiveness of a language is proposed. Specific examples show the relevant capabilities of the Tatar language for compact representation of knowledge, operating with fuzzy information, revealing such important properties as regularity, natural and constructive complexity, recursion, deep morphological ellipsis, functional diversity and semantic multivalence of affixes. The proposed approach, based on semiotic models of agglutinative language and the use of technological means of verbalization and contextual recognition of language meanings, can provide effective solutions for creating intelligent tools for accumulating and processing knowledge. Work in this direction creates the prospect of building a cognitive-communicative artificial intelligence system based on a universal language of communication between artificial intelligence systems as well as with humans.

Keywords: cognitive modeling, Tatar language, lexical grammatical structures, morphology, recursion, fuzzy commands, knowledge activity, intelligent systems.

For citation: Suleymanov DS, Gilmullin RA, Gatiatullin AR, Prokopyev NA. Cognitive potential of agglutinative languages in intelligent technologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 496-506. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-496-506.

Funding: This work was supported by the Scientific Research Foundation (project 23-21-10083).

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

References

- [1] **Suleimanov DS.** On the question of researching the technological aspect of natural languages [In Russian]. In: Text processing and cognitive technologies: Proceedings of the XI Intern. scientific conf. (Constanța, 7–14 September 2009). Kazan: Kazan Publishing House of the State Univ., 2010: 232–245.
- [2] **Chomsky N.** Syntactic Structures. The Hague: Mouton, 1957. 117 p.
- [3] **Pospelov DA, Osipov GS.** Applied semiotics [In Russian]. <http://raii.org/library/ainews/1999/1/OSPOS.ZIP>.
- [4] **Pospelov DA.** Situational Control: Theory and Practice. Batelle Memorial Institute, Columbus, OH, 1986.
- [5] **Polyakov V.** Problems of representation, acquisition and use of knowledge in natural language processing. In: Cognitive-semiotic aspects of modeling in the humanities. Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, 2017: 145-163.
- [6] **Suleymanov DS.** Natural Cognitive Mechanisms in the Tatar language. In: Collection of the Vienna Proceedings of the Twentieth European Meeting in Cybernetics and Systems Research. Ed. by Robert Trappel. Vienna, Austria, 6-9 April, 2010: 210-213.
- [7] **Guzev VG.** About some exotic features of Turkic languages («Turkic miracles») [In Russian]. Digest of World Politics. Annual Review. St Petersburg State University, 2020; 10: 231-245.
- [8] **Scherbak AM.** On the morphological structure of words in Turkic languages [In Russian]. Morphological structure of words in languages of different types. 1963: 267-270.
- [9] **Lekant PA.** Ellipsis as a problem of syntax and phraseology [In Russian]. Scientific notes of MOPI named after N.K. Krupskaya. M., 1966; 160(11): 210-224.
- [10] **Lodatkо EA.** Recursive linguistic structures [In Russian]. Theoretical and applied problems of Russian philology: Scientific and methodological collection. Slavyansk: SGPU, 2004; 12: 86-95.
- [11] **Fillmore CJ.** Frame Semantics and the Nature of Language. In: Annals of the New York Academy of Sciences:

- Conference on the Origin and Development of Language and Speech. 1976; 280: 20-32.
- [12] **Osipov GS, Smirnov IV, Tikhomirov IA.** Relational-situational method of searching and analyzing texts and its applications [In Russian]. Artificial Intelligence and Decision Making. 2008; 2: 3-10.
- [13] **Givon T.** Syntax: An introduction. John Benjamins Publishing Co., 2001. 500 p.
- [14] **Testeleys YG.** Introduction to general syntax [In Russian]. M.: RGSU, 2001.
- [15] **Grinberg J.** Some Grammar Universals, primarily concerning the order of Significant Elements [In Russian]. New in linguistics. Language universals. M.: Progress, 1970; 5: 114-162.
- [16] **Gatiatullin A, Suleymanov D, Prokopyev N, Khakimov B.** About Turkic Morpheme Portal. In: Proceedings of the Computational Models in Language and Speech Workshop (CMLS 2020). Kazan, Russian, November 12-13, 2020: 226-243.
- [17] **Oflazer K, Sarachlar M.** Turkish Natural Language Processing Theory and Applications of Natural Language Processing. Series ed. J. Hirshberg, E. Hovy, M. Jhonson. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018. 357 p.
- [18] **Tantug AG, Adali E.** Machine Translation between Turkic Languages. Turkish Natural Language Processing. Theory and Applications of Natural Language Processing. Series ed. J. Hirshberg, E. Hovy, M. Jhonson. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018: 237-255.
-

About the authors

Dzhavdet Shevketovich Suleymanov (b. 1955) graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of Kazan State University in 1977, PhD (1985), Doctor of Technical Sciences (2000). Scientific director of the Institute of Applied Semiotics of the Tatarstan Academy of Sciences, academician of the Tatarstan Academy of Sciences, professor. Honored Scientist of the Republic of Tatarstan, member of the Russian Association of Artificial Intelligence (RAAI). The list of scientific works includes more than 300 works in the field of applied semiotics, computer and cognitive linguistics, artificial intelligence, electronic and social pedagogy. Author ID (RSCI): 9142; Author ID (Scopus): 6603474810; Researcher ID (WoS): B-4793-2014. dvdt.slt@gmail.com.

Rinat Abrekovich Gilmullin (b. 1975) graduated from Kazan State University in 1997, PhD (2010). Director of the Institute of Applied Semiotics of the Tatarstan Academy of Sciences. The list of scientific works includes about 50 works. ORCID: 0000-0002-8520-8921; Author ID (RSCI): 179405; Author ID (Scopus): 57079235700. rinatgilmullin@gmail.com ✉.

Ayrat Rafizovich Gatiatullin (b. 1972) graduated from Kazan State University in 1994, PhD (2002). Leading researcher at the Institute of Applied Semiotics of the Tatarstan Academy of Sciences. The list of scientific works includes more than 60 works. ORCID: 0000-0003-3063-8147; Author ID (RSCI): 161758; Author ID (Scopus): 56500678000. ayrat.gatiatullin@gmail.com.

Nikolai Arkadievich Prokopyev (b. 1992) graduated from the Institute of Computational Mathematics and Information Technologies of Kazan Federal University in 2015. Researcher at the Institute of Applied Semiotics of the Tatarstan Academy of Sciences. The list of scientific works includes about 40 works. ORCID: 0000-0003-0066-7465; Author ID (RSCI): 999214; Author ID (Scopus): 57190803409; Researcher ID (WoS): S-3829-2016. nikolai.prokopyev@gmail.com.

Received November 13, 2023, Revised November 23, 2023. Accepted December 01, 2023.

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-507-519



Формирование модели интеллектуального программного аналитического комплекса в электроэнергетике

© 2023, В.В. Антонов, Л.Е. Родионова ✉,
Л.А. Кромина, А.Р. Фахруллина, Л.И. Баймурзина

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация

Рассматривается модель интеллектуального программного аналитического комплекса, позволяющего организациям электроэнергетики дистанционно применять системы учёта электрической энергии, предназначенные для снятия показаний потребителей в онлайн-режиме, регистрации отклонений, а также определения качества электрической энергии. Программный аналитический комплекс представлен в виде совокупности моделей: модели обеспечения устойчивости качества электрической энергии, позволяющей сформировать правила информационной среды и единое хранилище данных для систематизации процессов сбора, обработки и передачи данных, упростить поиск и повысить скорость доступа к данным; модели продукционной базы знаний, предназначенной для поиска решений в рассматриваемом процессе и оценки результатов поиска; динамического графа отклонений квадрата Декарта, позволяющего управлять электроэнергетическими параметрами с целью повышения эффективности работы организации и совершенствования процесса управления технической стратегией энергетической системы; онтологической и сетевой моделей показателей качества электрической энергии. Приведены схемы алгоритма работы программного аналитического комплекса, а также разработанного узла нейронной сети, предназначенных для выполнения анализа отклонений на предмет наличия неисправностей в работе аппаратного обеспечения. Применение представленных моделей в программном аналитическом комплексе позволит оперативно выявлять возникающие отклонения и проводить их анализ.

Ключевые слова: электроэнергетика, программный аналитический комплекс, динамический граф, квадрат Декарта, качество электрической энергии, узел нейронной сети, анализ отклонений.

Цитирование: Антонов, В.В., Родионова Л.Е., Кромина Л.А., Фахруллина А.Р., Баймурзина Л.И. Формирование модели интеллектуального программного аналитического комплекса в электроэнергетике // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №4(50). С.507-519. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-507-519.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках основной части государственного задания высшим учебным заведениям № FEUE-2023-0007.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Применение программных средств автоматизации в электроэнергетике является одним из приоритетных направлений в этой отрасли. Например, программный комплекс «Аварийность» позволяет автоматизировать процесс ввода записей в журнал отключений и актов расследования, их корректировки, а также дальнейшего анализа результатов расследования причин аварий [1]. Программное обеспечение АПК ЦЕНСОП, предназначенное для хранения, сбора и отображения информации, позволяет формировать сводки и отчёты [2]. Систе-

мы сбора данных и оперативного контроля SCADA (от англ. *Supervisory Control And Data Acquisition*) позволяют организовать дистанционный мониторинг параметров [3].

Востребованными являются решения в области аналитики данных, направленные на обеспечение надёжности и устойчивости работы энергосистем. К ним относятся: оперативный анализ ситуаций, поддержка принятия решений, формирование аналитической отчётности. Сформирована энергетическая стратегия России на период до 2030 года, которая направлена на стимулирование разработки и внедрения инновационных, в т.ч. цифровых, технологий в области энергетики [4]. Актуальны вопросы разработки методов моделирования интеллектуального программного аналитического комплекса (ПАК), позволяющего прогнозировать и оптимизировать показатели производственных процессов в энергетике.

1 Модель обеспечения устойчивости качества электрической энергии

Разработка методов моделирования интеллектуального ПАК позволит организациям электроэнергетики дистанционно использовать интеллектуальные информационные системы (ИС) учёта электрической энергии (ЭЭ), в онлайн-режиме снимать показания потребителей, регистрировать отклонения и определять качество ЭЭ. Интеллектуальный ПАК должен обеспечить надёжность и устойчивость работы системы.

Интеллектуальный ПАК – комплекс инструментов, содержащих хранилище данных, базу знаний (БЗ), средства извлечения данных, средства преобразования и загрузки данных, аналитические средства [5].

При обследовании предметной области (ПрО) образуется много данных и знаний, которые необходимо своевременно обрабатывать и передавать в ПАК. К модулям ПАК, которые являются информационными объектами (ИО), можно применить положения теории категорий [6]. В этом случае ПАК проектируется в виде совокупности объектов, которые имеют свойства категорий. Организация взаимодействия функциональных программ обеспечивает объединение системы анализа объектов ПрО с учётом динамических свойств ПрО, а составляющие интеллектуального ПАК образуют категорию множеств. Представление ПАК в виде совокупности ИО позволяет рассматривать его в качестве модели цифрового двойника (ЦД), что расширяет его «электронную прозрачность» во многих аспектах, в т.ч. управленческих и технологических [7, 8].

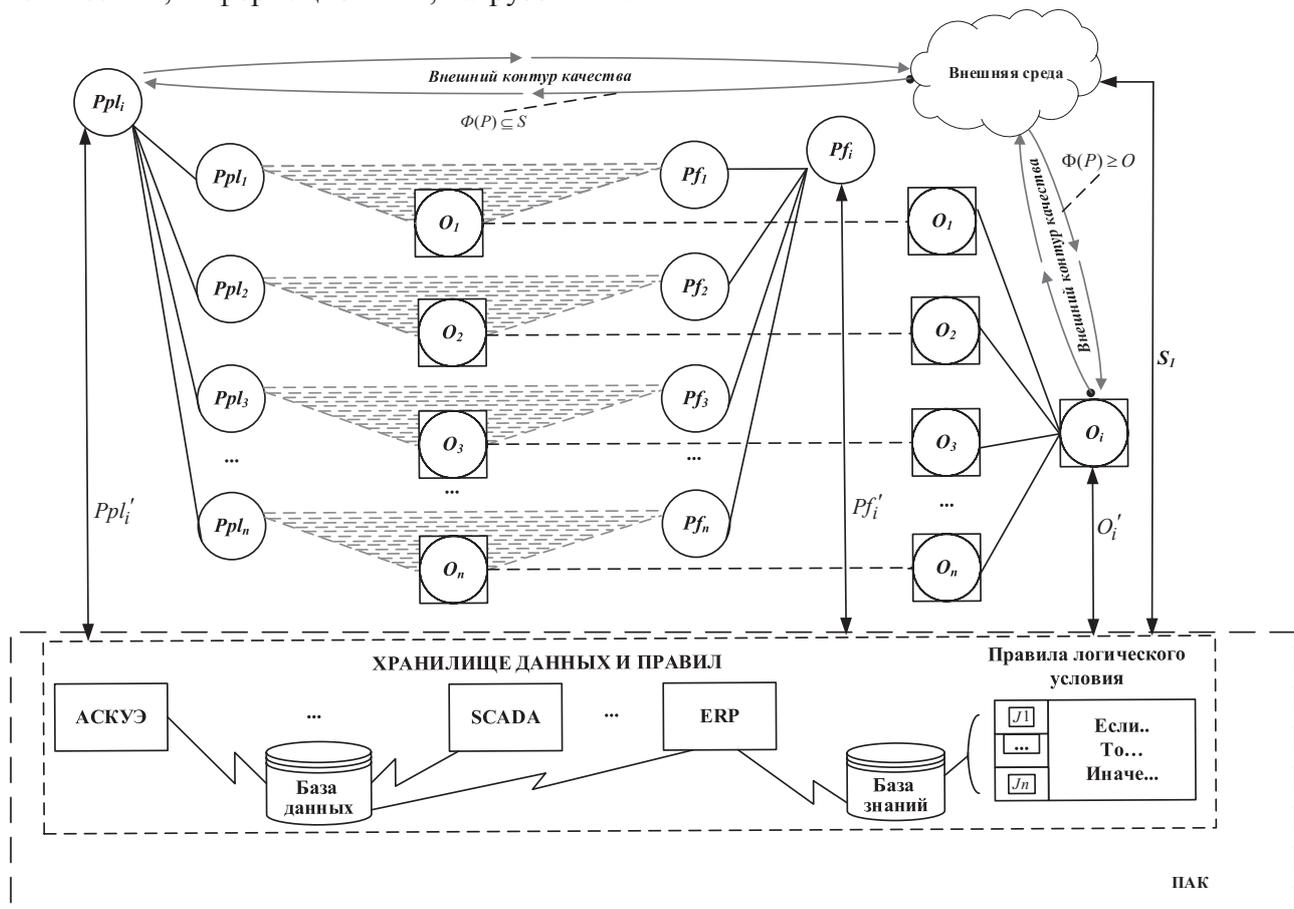
Разработка семантической модели системы с учётом внешнего контура качества на основе цикла Деминга [9], отражающей реализацию процессов в интеллектуальном ПАК, позволит представить модель контура на формальном уровне в терминах объектов и их характеристик, рассмотреть правила взаимодействия процессов и подпроцессов при помощи функций (рисунок 1).

Все функции, введённые в данную модель, реализуются в виде конечного множества определённых сценариев в онлайн-режиме.

В системе электроснабжения на предприятии электроэнергетики на основе нормативной документации формируются Ppl_i – плановые показатели/индикаторы и нормы качества ЭЭ. $Ppl_i = \{Ppl_1, \dots, Ppl_n\}$ – множество показателей зависит от конкретного объекта электроснабжения и категории потребителей. Пусть $\Phi(P)$ – функция, характеризующая нормативные показатели/индикаторы и нормы качества ЭЭ, поступающие из внешней среды S . Показатели и нормы качества ЭЭ должны соответствовать нормативной документации (регламенты, положения и др.) $\Phi(P) \subseteq S$ отображает учёт внешней среды при формировании нормативной документации.

ИС относится к классу открытых систем, которые активно взаимодействуют с окружающей средой, т.е. со всей совокупностью элементов окружающего ИС мира, оказывающих

на неё воздействия. Внешняя среда характеризуется тремя видами воздействия на ИС: энергетическим, информационным, нагрузочным.



АСКУЭ – автоматизированная система коммерческого учёта электроэнергии; ERP – система управления и планирования ресурсов; SCADA – диспетчерское управление и сбор данных, программный пакет

Рисунок 1 – Модель обеспечения устойчивости качества электрической энергии с учётом внешнего контура качества с использованием интеллектуального программного аналитического комплекса

Изменения нормативной документации $\Phi'(P)$ пополняются новыми нормативными показателями/индикаторами и нормами качества ЭЭ, что отражается в изменении Ppl_i и соответствует новым значениям Ppl_i' .

По истечении определённого периода, регламентируемого стандартами объекта электро-снабжения, формируются Pf_i – фактические показатели/индикаторы качества ЭЭ; $\{Pf_1, \dots, Pf_n\}$ – множество фактических показателей/индикаторов. Pf_i сравниваются с Ppl_i и выявляются O_i – отклонения в виде маркированных показателей/индикаторов O_1, \dots, O_n , при этом отклонения показателей/индикаторов и нормы качества ЭЭ не должны превышать установленные значения, иначе при выявлении отклонений формируются управляющие воздействия, что ведёт к изменению Pf_i и новым значениям Pf_i' . Под маркированными показателями/индикаторами понимаются данные – результаты измерений показателей качества ЭЭ и результаты объединения измеренных значений показателей на временных интервалах [10]. В процессе формирования управляющих воздействий новых значений Pf_i' изменяются значения маркированных показателей/индикаторов на новые O_i' .

В объекте управления выделяются количественные характеристики ИО, а на их основе формируются качественные характеристики ИО в интеллектуальном ПАК. К ним относятся группы показателей качества ЭЭ (ПКЭЭ) (рисунок 2), которые состоят из видов ПКЭЭ

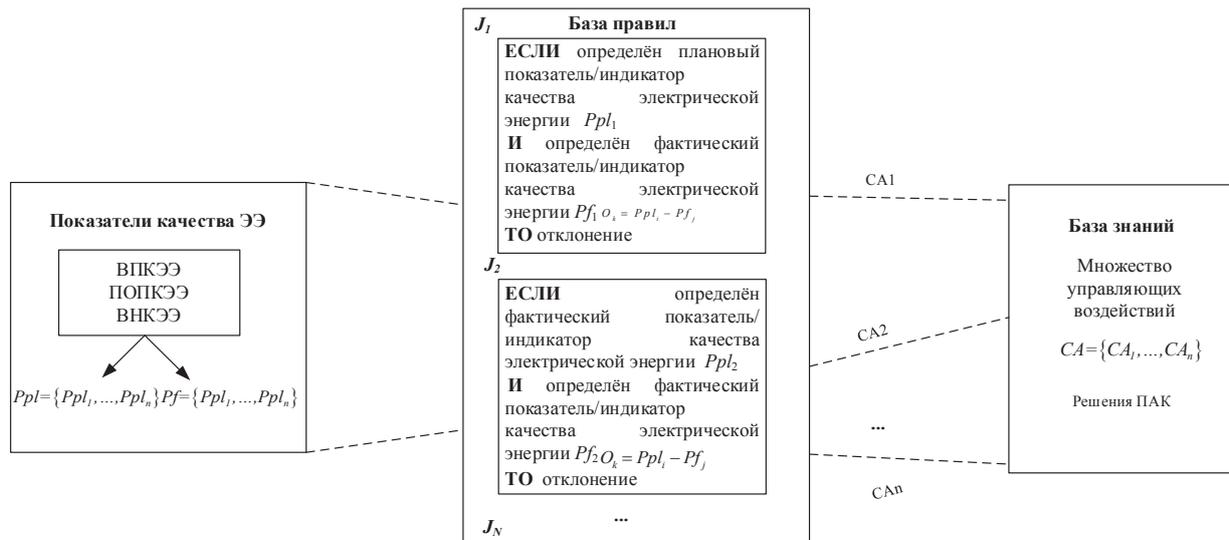


Рисунок 3 – Модель представления знаний в ПАК

Таким образом, при формализации ПрО с использованием положений теории категорий описываются все отношения объектов проектируемой системы между собой [13].

В интеллектуальных ИС, работающих на базе алгоритмов и моделей машинного обучения, используется большое количество данных, в т.ч. справочных размеченных данных для обучения алгоритмов. Использование динамического графа, его объединений позволяет не только повысить точность работы таких систем, но и обеспечить объяснимость получаемых результатов. Динамический граф представляет собой упорядоченную во времени последовательность статических графов, не имеющих параллельных рёбер и петель, переход между которыми описывается в терминах теории категорий [14, 15].

В динамическом графе существует определённое количество узлов. Каждую цепочку узла можно будет достроить до квадрата Декарта (рисунок 4) [6]. Декартов квадрат морфизмов для плановых показателей/индикаторов представлен $f : Ppl_1 \rightarrow O_1$ и $g : Ppl_2 \rightarrow O_1$ – это объект O_1 и морфизмы $p : Ppl_i \rightarrow Ppl_1$ и $q : Ppl_i \rightarrow Ppl_2$, такие что $f \circ p = g \circ q$ и для любого объекта O_1 и морфизмов $m : O_1 \rightarrow Ppl_1$ и $n : O_1 \rightarrow Ppl_2$, если $f \circ m = g \circ n$, то существует уникальный морфизм $u : O_1 \rightarrow Ppl_i$, такой что $p \circ u = m$ и $q \circ u = n$, в результате получается множество отношений между объектами с плановыми показателями/индикаторами, представленное квадратом Декарта.

Для фактических показателей/индикаторов следующий Декартов квадрат $f' : Ppf_1 \rightarrow O_1$ и $g' : Ppf_2 \rightarrow O_1$ – это объект O_1 и морфизмы $p' : Ppf_i \rightarrow Ppf_1$ и $q' : Ppf_i \rightarrow Ppf_2$, такие что $f' \circ p' = g' \circ q'$ и для любого объекта O_1 и морфизмов $m' : O_1 \rightarrow Ppf_1$ и $n' : O_1 \rightarrow Ppf_2$, если $f' \circ m' = g' \circ n'$, то существует уникальный морфизм $u' : O_1 \rightarrow Ppf_i$, такой что $p' \circ u' = m'$ и $q' \circ u' = n'$.

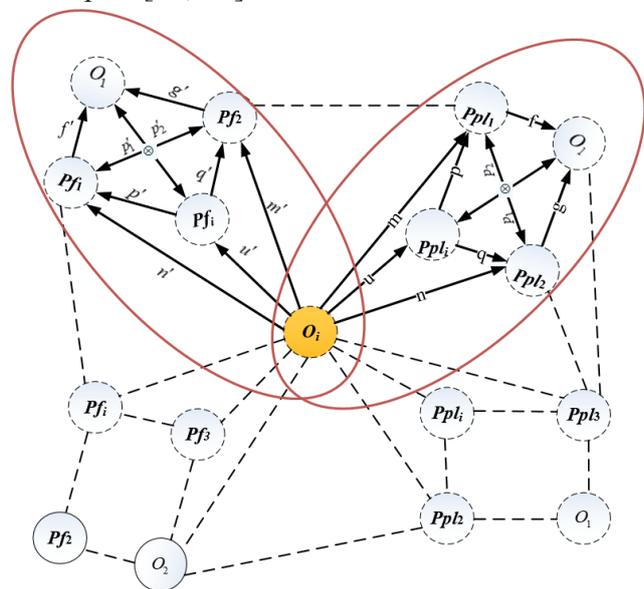


Рисунок 4 – Динамический граф поиска отклонений фактических показателей/индикаторов от плановых

Коммутативная диаграмма является ориентированным графом, где вершины – это объекты, а стрелки – морфизмы, а результат композиции морфизмов не зависит от выбранного пути между этими объектами (рисунок 4).

Ppl_i – плановые показатели/индикаторы, показатели Ppl_1 и Ppl_2 входят в отдельные категории и подкатегории. Взаимодействие подкатегорий, внутри которых расположены ИО, приводит к коммутативному треугольнику по категории и отдельным подкатегориям (рисунок 4). Категория Ppl_i образует класс объектов с заданным отношением для любых пар (Ppl_i, Ppl_1) и (Ppl_i, Ppl_2) , отношения которых определены множеством морфизмов: $\{p, q, p_1, p_2\}$. Процесс взаимодействия можно представить декартовым произведением $n: Ppl_i \rightarrow Ppl_1 \otimes Ppl_2$, где n является единственным морфизмом, выражающимся результатом взаимодействия указанных показателей/индикаторов.

Таким образом, Ppl_i формализуется в виде морфизмов, обладающих следующими свойствами: результат взаимодействия ИО может быть представлен декартовым произведением $Ppl_1 \otimes Ppl_2$ с морфизмами $p_1: Ppl_1 \otimes Ppl_2 \rightarrow Ppl_1$ и $p_2: Ppl_1 \otimes Ppl_2 \rightarrow Ppl_2$ такими, что для любого объекта Ppl_i с морфизмами $q: Ppl_i \rightarrow Ppl_1$ и $p: Ppl_i \rightarrow Ppl_2$ существует единственный морфизм $n: Ppl_i \rightarrow Ppl_1 \otimes Ppl_2$, при котором выделяется диаграмма в форме коммутативного треугольника (рисунок 4). Рассматривая Ppf_i – фактические показатели/индикаторы, показатели Ppf_1 и Ppf_2 , процесс взаимодействия можно представить декартовым произведением $n': Ppf_i \rightarrow Ppf_1 \otimes Ppf_2$, где n' является единственным морфизмом, выражающимся результатом взаимодействия параметров.

Таким образом, Ppf_i формализуется в виде морфизмов, обладающих следующими свойствами: результат взаимодействия ИО может быть представлен декартовым произведением $Ppf_1 \otimes Ppf_2$ с морфизмами $p'_1: Ppf_1 \otimes Ppf_2 \rightarrow Ppf_1$ и $p'_2: Ppf_1 \otimes Ppf_2 \rightarrow Ppf_2$ такими, что для любого объекта Ppf_i с морфизмами $q': Ppf_i \rightarrow Ppf_1$ и $p': Ppf_i \rightarrow Ppf_2$ существует единственный морфизм (отклонение графа) $n': Ppf_i \rightarrow Ppf_1 \otimes Ppf_2$, при котором выделяется диаграмма в форме коммутативного треугольника (рисунок 4).

В результате достраивания до квадрата Декарта каждой цепочки отношений получается итерационная составляющая (рекурсия). Пока ИС сохраняет свою целостность, он остаётся уникальным. Решается задача прослеживаемости всех объектов ИС, а в качестве объектов могут выступать и отношения. В результате появляются ещё требования идентифицируемости и прослеживаемости на всех стадиях создания и эксплуатация ПАК.

При декомпозиции системы на подсистемы увеличивается количество частично открытых областей. Размер формализованной части определяется суммой, состоящей из количества объектов и числа связей. В результате получается множество объектов, идентифицируемых и прослеживаемых в пространстве и во времени. Когда обеспечивается прослеживаемость в пространстве, получается маршрут поиска отклонений. Графическим представлением Декартова произведения является информационное покрытие - метрика, объекты которой пересекаются друг с другом, и на месте этих пересечений возникают новые метрики. Между двумя объектами всегда существуют отношения, они образуют маршрут, маршрут преобразуется в адрес, который становится новым объектом, в данном случае новым отклонением. Эти категории отношений описаны функторными отношениями. В качестве объектов представлены группы ПКЭЭ (рисунок 2), которые состоят из ВПКЭЭ и ПОПКЭЭ. Применение динамического графа отклонений квадрата Декарта позволяет связать модель ПКЭЭ с моделью решения задачи цифровой трансформации процесса управления качеством предоставления ЭЭ на основе применения ПАК.

На рисунке 5 представлена структура ПАК, состоящая из ПКЭЭ, в которую входят ВПКЭЭ, ПОПКЭЭ, ВНКЭЭ, нормально и предельно допустимые значения показателей. Показатель колебания напряжения состоит из ВНКЭЭ, который включает размах изменения напряжения и дозу мерцания (фликер), у которых ПОПКЭЭ - потребитель с резкопеременной нагрузкой и ВНКЭЭ - предельно допустимое значение показателей. Показатель несимметрии напряжений в трёхфазной системе состоит из ВПКЭЭ – коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности и коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности. ПОПКЭЭ – это потребитель с несимметричной нагрузкой, а ВНКЭЭ – нормально и предельно допустимые значения показателей.

ПКЭЭ несинусоидальность формы кривой напряжения состоит из: коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения; ПОПКЭЭ – потребитель с нелинейной нагрузкой, а ВНКЭЭ предельно и нормально допустимое значение показателей.



1 – группа показателей качества электроэнергии; 2 – вид показателя качества электроэнергии; 3 – причина отклонения значения показателей качества электроэнергии; 4 – вид нормы качества электроэнергии

Рисунок 5 – Структура программного аналитического комплекса

К прочим показателям относятся следующие ВПКЭЭ: отклонение частоты, длительность провала напряжения, импульсное напряжение, коэффициент временного перенапряжения. ПКЭЭ – особенности работы сети, климатические условия или природные явления и ВНКЭЭ - предельно и нормально допустимые значения показателей.

2 Схема алгоритма работы ПАК

Разработанная модель знаний служит основой для формирования БЗ экспертной системы (рисунок 3). Работа алгоритма основана на значениях нормативного ПКЭЭ (Ppl_i) и фактического ПКЭЭ (Pf_i), загружаемых из БД ПАК для каждого прибора учёта в отдельности. БЗ после загрузки значения отклонения показателя (O_i) позволяет осуществлять анализ отклонения значения фактического ПКЭЭ от значения нормативного ПКЭЭ. В результате пользователь получает соответствующее сообщение (рисунок 6).

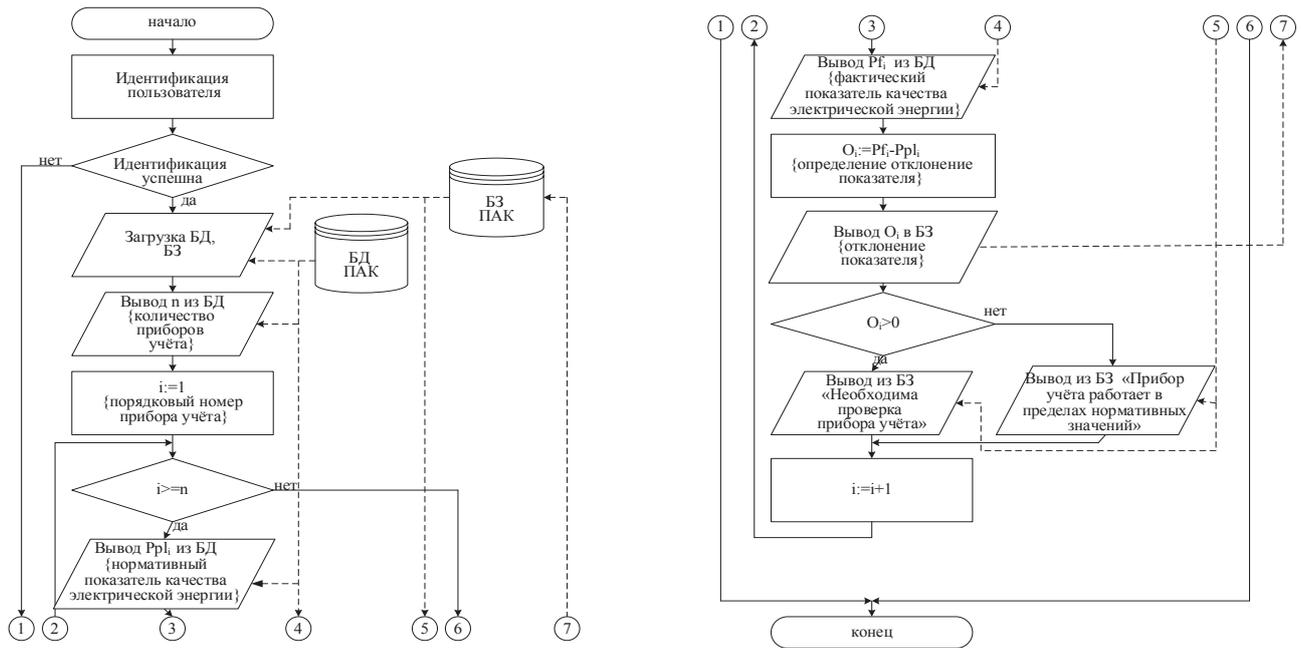


Рисунок 6 – Схема алгоритма работы программно-аналитического комплекса

Для ПАК требуется построить узел нейронной сети (НС) [16], представляющий собой схему искусственного нейрона, входными сигналами которого являются величины, соответствующие значениям фактических ПКЭЭ для каждого прибора учёта Pf_i . Весами являются нормативные ПКЭЭ для каждого прибора учёта Ppl_i . Функция $O_i = Pf_i - Ppl_i$, указанная в блоке сумматора, позволяет определить величину отклонения значения фактического ПКЭЭ Pf_i от значения нормативного ПКЭЭ $Ppl_i - O_i$ (см. рисунок 7).

Представленный блок предназначен для проведения аналитики отклонений в целях выявления отсутствия или наличия неполадок в работе аппаратного обеспечения. Результатом работы узла НС является сообщение, формируемое интеллектуальной системой на основе позиционных правил, которое может быть использовано при принятии управленческих решений о работе приборов учёта, выводимое пользователю.

Результаты работы НС поступают в блок запоминания состояний, из которого переходит в архив хранилища данных. Семантический слой позволяет пользователю получать данные, являющиеся результатом работы узла НС. Витрины данных, в свою очередь, являются хранилищем данных, предназначенным для определённых категорий пользователей.

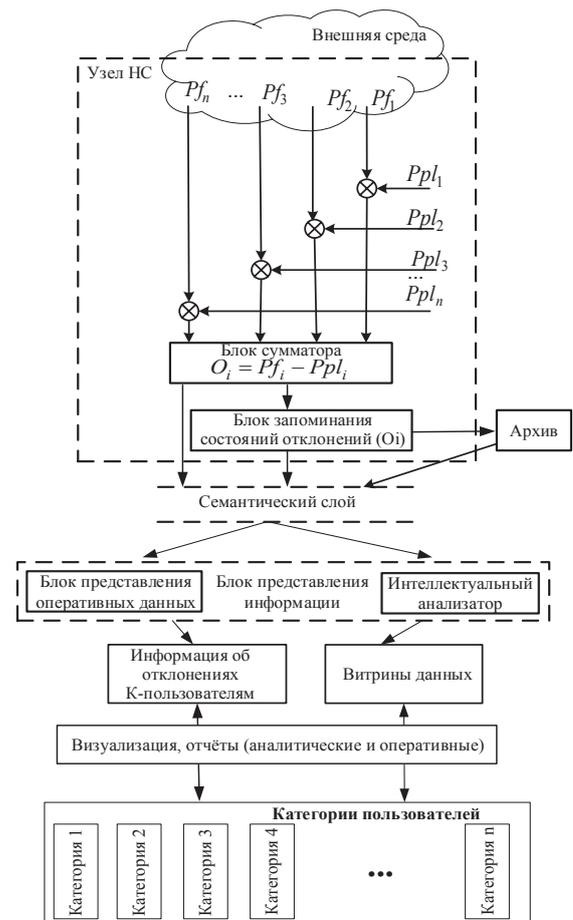


Рисунок 7 – Схема обработки отклонений плановых показателей/индикаторов от фактических в программно-аналитическом комплексе

При работе с НС особое внимание уделяется способности НС к обучению на основе данных, поступающих из внешней среды (см. рисунок 7). Представленная схема узла НС предполагает применение алгоритма обучения с учителем, который позволит выполнять корректировку возникающих ошибок. В процессе обучения знания учителя будут передаваться в сеть в полном объёме. После завершения обучения можно отключить учителя, что позволит НС работать самостоятельно [17].

НС контролирует значения показателей, при обнаружении интеллектуальным анализатором отклонений выдаётся сообщение k -пользователям, например, руководителям, практическим работникам, аналитикам и др., в зависимости от выявленных отклонений показателей. K -пользователи = $\{K_1, \dots, K_i\}$ - множество категорий пользователей.

Построенную модель узла НС можно использовать для автоматизации других бизнес-процессов в сфере электроэнергетики, например для контроля перегрузок в электрической сети [18].

Заключение

Рассмотрена задача управления качеством предоставления ЭЭ на основе ПАК, как эффективного способа достижения заданных параметров в условиях действующих ограничений. Построенная схема алгоритма работы ПАК и узел НС предоставляют возможность осуществлять аналитику отклонений на наличие неисправностей в работе энергосистем. Предложенные модели целесообразно применять в рамках реализации ПАК, что в полной мере обеспечит оперативность выявления возникающих отклонений, а также анализа причин непредвиденных ситуаций.

Список источников

- [1] Программный комплекс «Аварийность ЭСК». <https://platforms.su/platform/21629>.
- [2] Программное обеспечение АПК ЦЕНСОР. <https://www.censor-m.ru/decisions/peredacha-i-obrabotka-informatsii/programmnoe-obespechenie-apk-tsensor/>.
- [3] **Топольский Д.В., Топольская И.Г.** Анализ современных SCADA-систем в электроэнергетике // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции Секции технических наук С.1378-1381. <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/4522/55.pdf>.
- [4] Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-п). <https://www.garant.ru/pro ducts/ipo/prime/doc/96681/>.
- [5] **Ноженкова Л.Ф., Шайдунов В.В.** OLAP-технологии оперативной информационно-аналитической поддержки организационного управления // Информационные технологии и вычислительные системы: журнал. 2010. №2. С.15-27.
- [6] **Куликов Г.Г., Антонов В.В., Навалихина Н.Д., Родионова Л.Е., Суворова В.А., Шилина М.А.** Методология проектирования ПАК исследуемой проблемной области на основе идентификации логических противоречий квадрата Декарта и структурной самоорганизации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 34. С.7-26. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.01.
- [7] **Антонов В.В., Куликов Г.Г., Кромина Л.А., Родионова Л.Е., Фахруллина А.Р., Харисова З.И.** Концепция программно-аналитического комплекса образовательного процесса на основе онтологии и искусственных нейронных сетей // Онтология проектирования. 2021. Т.11, №3(41). С.339-350. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-339-350.
- [8] **Коровин Г.Б.** Возможности применения цифровых двойников в промышленности // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т.27. №8. С.124–133. DOI: 10.21209/2227- 9245-2021-27-8-124-133.
- [9] Цикл Деминга // Энциклопедия производственного менеджмента: <http://www.up-pro.ru/encyclopedia/deming-cycle.html>.
- [10] ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.

- [11] *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
- [12] *Ильясов Б.Г., Герасимова И.Б., Макарова Е.А., Хасанова Н.В., Черняховская Л.Р.* Основы теории систем и системного анализа. Уфа: УГАТУ, 2014. 217 с.
- [13] *Голдблатт Р.* Топосы. Категорный анализ логики = Topoi. The categorial analysis of logic. Москва: Мир, 1983. 488 с.
- [14] *Фаустова К.И.* Нейронные сети: применение сегодня и перспективы развития // Территория науки. Воронежский экономико-правовой институт. 2017. №4, С.83–87.
- [15] *Калинин В.Ф., Зяблов Н.М., Кочергин С.В., Кобелев А.В., Джапарова Д.А.* Анализ методов представления данных искусственной нейронной сети для управления электроэнергетическими системами // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. Том 23. №4, С.609–616. DOI: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.609-616.
- [16] *Торопов А.С., Туликов А.Н.* Прогнозирование почасового электропотребления региональной энергосистемы с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Том 21. №5(124), С.143–151.
- [17] *Воронов И.В., Политов Е.А., Ефременко В.М.* Обзор типов искусственных нейронных сетей и методов их обучения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. №3(61). С.38-42.
- [18] *Kulikov G., Antonov V., Rodionova L., Suleymanova A., Abdulnagimov A.* A digital twin model for electricity systems // Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2021, P.239–244. DOI:10.1109/ICOECS52783.2021.9657362.

Сведения об авторах



Антонов Вячеслав Викторович, 1956 г. рождения. Окончил Башкирский государственный университет (1979), к.т.н. (2007), доктор технических наук (2015). Заведующий кафедрой автоматизированных систем управления Уфимского университета науки и технологий (УУ-НиТ), профессор кафедры управления в органах внутренних дел Уфимского юридического института МВД России. В списке научных трудов более 130 работ в области построения интеллектуальных систем. AuthorID (РИНЦ): 530537. AuthorID (Scopus): 57200254522; ResearcherID (WoS): AАН-5121-2019. antonov.v@bashkortostan.ru.

Родионова Людмила Евгеньевна, 1984 г. рождения. Окончила Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ, 2007), к.т.н. (2019). Доцент кафедры автоматизированных систем управления УУНиТ. В списке научных трудов около 10 работ в области проектирования программных аналитических комплексов на основе моделей и методов декартово замкнутой категории. AuthorID (РИНЦ): 852968. Author ID (Scopus): 57219160976. ORCID 0000-0003-4041-0365; Researcher ID (WoS): AAU-3498-2020. lurik@mail.ru ✉.



Кромина Людмила Александровна, 1983 г. рождения. Окончила УГАТУ (2005), к.т.н. (2012), доцент (2019). Доцент кафедры автоматизированных систем управления УУНиТ. В списке научных трудов около 40 работ в области управления в социальных и экономических системах. AuthorID (РИНЦ): 38216513; Author ID (Scopus): ORCID 0000-0002-5226-0512; Researcher ID (WoS): _AAO-7905-2021. luyda-kr@yandex.ru.

Фахруллина Альмира Раисовна, 1982 г. рождения. Окончила Кумертауский филиал УГАТУ (2004), к.т.н. (2017), доцент (2020). Директор филиала УУНиТ в г. Кумертау. В списке научных трудов около 50 работ в области математического и программного обеспечения. AuthorID (РИНЦ): 31294902; Author ID (Scopus): 57219166246 ORCID 0000-0002-3482-4169; Researcher ID (WoS): AAT-3738-2021. almira-fax@mail.ru.



Баймурзина Лилия Ифтаровна, 1987 г. рождения. Окончила УГАТУ (2009). Старший преподаватель кафедры технологии производства летательных аппаратов УУНиТ. В списке научных трудов около 10 работ в области проектирования информационных аналитических систем. AuthorID (РИНЦ): 1185834. ORCID ID 0009-0009-1996-0494. lilabay@mail.ru.

Поступила в редакцию 04.09.2023, после рецензирования 17.11.2023. Принята к публикации 27.11.2023.



Formation of the model of an intellectual software analytical complex in the electric power industry

© 2023, V.V. Antonov, L.E. Rodionova ✉, L.A. Kromina, A.R. Fakhrullina, L.I. Baimurzina

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract

The paper considers the model of an intelligent software analytical complex that allows electric power industry organizations to remotely apply electricity metering systems designed to take consumer's meter readings online, register deviations, and determine the quality of electricity. The software analytical complex is presented in the form of a set of models: a model for ensuring the sustainability of the quality of electric power, which makes it possible to create rules for the information environment and a unified data repository to systematize the processes of collecting, processing and transmitting data, simplify the search and increase the speed of access to data; a model of the product knowledge base, designed to search for solutions in the process under consideration and evaluate the search results; a dynamic graph of deviations of the Descartes square, which makes it possible to manage electrical power parameters in order to increase the efficiency of the organization and improve the process of managing the technical strategy of the energy system; and ontological and network models of electric energy quality indicators. The diagrams of the software analytical complex algorithm as well as the developed neural network node designed to analyze deviations for the presence or absence of malfunctions in the hardware operation are presented. The application of the presented models in the software analytical complex will help to promptly identify emerging deviations and analyze them.

Keywords: electric power industry, software analytical complex, dynamic graph, Descartes square, electric power quality, neural network node, deviation analysis.

Citation: Antonov VV, Kromina LA, Rodionova LE, Fakhrullina AR, Baimurzina LI. Formation of the model of an intellectual software analytical complex in the electric power industry [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 507-519. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-507-519.

Funding: The study is carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the main part of the state assignment to higher educational institutions No. FEUE-2023-0007.

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

List of figures

- Figure 1 – Model for ensuring the sustainability of electric power quality, taking into account the external quality loop with the use of intelligent software analytical complex
- Figure 2 – Groups of electric power quality indicators
- Figure 3 – Model of knowledge representation in software analytical complex
- Figure 4 – Dynamic graph for searching deviations of planned indicators/indicators from actual ones
- Figure 5 – Structure of the software analytical complex
- Figure 6 – Diagram of the software analytical complex algorithm
- Figure 7 – Scheme for processing deviations of planned indicators/indicators from actual ones in the software analytical complex

References

- [1] “Accidentality of ESC”, Software complex [In Russian]. <https://platforms.su/platform/21629>.
- [2] APC SENSOR software [In Russian]. <https://www.censor-m.ru/decisions/peredacha-i-obrabotka-informatsii/programmnoe-obespechenie-apk-tsensor/>.

- [3] **Topolsky DV, Topolskaya IG.** Analysis of modern SCADA-systems in the electric power industry [In Russian]. Science of SUSU: Proceedings of the 66th scientific conference of the Section of Technical Sciences. P.1378-1381. <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/4522/55.pdf>.
- [4] Energy Strategy of Russia for the period up to 2030 (approved by Decree No. 1715-r of the Government of the Russian Federation on November 13, 2009) [In Russian]. <https://www.garant.ru/pro ducts/ipo/prime/doc/96681>.
- [5] **Nozhenkova LF, Shaidurov VV.** OLAP technologies for operational information and analytical support of organizational management [In Russian]. Information technologies and computing systems. 2010; 2: 15-27.
- [6] **Kulikov GG, Antonov VV, Navalikhina ND, Rodionova LE, Suvorova VA, Shilina MA.** Methodology for designing a software and analytical complex of the problem area under study based on the identification of logical contradictions of the Cartesian square and structural self-organization [In Russian]. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2020; 34: 7-26. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.01.
- [7] **Antonov VV, Kulikov GG, Kromina LA, Rodionova LE, Fakhrollina AR, Kharisova ZI.** The concept of a software and analytical complex of the educational process based on ontology and artificial neural networks [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2021; 11(3): 339-350. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-339-350.
- [8] **Korovin GB.** Possibilities of using digital twins in industry [In Russian]. Bulletin of Transbaikal State University. 2021; 27(8): 124–133. Doi:10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133.
- [9] Deming Cycle [In Russian]. Encyclopedia of Production Management. <http://www.up-pro.ru/encyclopedia/deming-cycle.html>.
- [10] GOST 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) Electrical power. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measurement of quality indicators of electric power (Amended edition). [In Russian]. <https://base.garant.ru/70665936/>.
- [11] **Gavrilova TA, Khoroshevsky VF.** Knowledge Bases of Intelligent Systems [In Russian]. SPb: Peter, 2000. 384 p.
- [12] **Ilyasov BG, Gerasimova IB, Makarova EA, Khasanova NV, Chernyakhovskaya LR.** Fundamentals of Systems Theory and Systems Analysis [In Russian]. Ufa: UGATU, 2014. 217 p.
- [13] **Goldblatt R.** Topoi. The categorial analysis of logic. Topoi. The categorial analysis of logic [In Russian]. Moscow: Mir, 1983. 488 p.
- [14] **Faustova KI.** Neural networks: application today and prospects for development [In Russian]. Territory of Science. Voronezh Institute of Economics and Law. 2017; 4: 83-87.
- [15] **Kalinin VF, Zyablov NM, Kochergin SV, Kobelev AV, Dzharparova DA.** Analysis of artificial neural network data representation methods for electric power systems control [In Russian]. Bulletin of Tambov State Technical University. 2017; 4: 609-616. DOI: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.609-616.
- [16] **Toropov AS, Tulikov AN.** Forecasting of hourly power consumption of regional power system using artificial neural networks [In Russian]. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017; 21(5): 143-151.
- [17] **Voronov IV, Politov EA, Efremenko VM.** Review of types of artificial neural networks and methods of their leaning [In Russian]. Bulletin of Kuzbass State Technical University. 2007; (3): 38-42.
- [18] **Kulikov G, Antonov V, Rodionova L, Suleymanova A, Abdalnagimov A.** A digital twin model for electricity systems // Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2021, P.239–244. DOI:10.1109/ICOECS52783.2021.9657362.

About the authors

Vyacheslav Viktorovich Antonov (b. 1956) graduated from the Bashkir State University (1979), PhD (1985), D. Sc. Eng. (2015). Professor of the Department of Automated Control Systems of the Ufa University of Science and Technology, Professor of the Department of Management in Internal Affairs Bodies of the Ufa Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. The list of scientific papers contains more than 130 works in the field of building intelligent decision support systems. AuthorID (RCI): 530537. Author ID (Scopus): 57200254522; Researcher ID (WoS): AAH-5121-2019. antonov.v@bashkortostan.ru.

Lyudmila Evgenievna Rodionova (b. 1984) graduated from the Ufa State Aviation Technical University (2007), PhD (2019). Senior Lecturer of the Department of Automated Control Systems of the Ufa University of Science and Technology. The list of scientific papers contains about 10 works in the field of designing software analytical complexes. AuthorID (RCI): 852968. Author ID (Scopus): ORCID 0000-0003-4041-0365; Researcher ID (WoS): AAU-3498-2020. lurik@mail.ru ✉.

Lyudmila Aleksandrovna Kromina (b. 1983) graduated from the Ufa State Aviation Technical University (2005), Candidate of Technical Sciences (2012), Associate Professor (2019). Associate Professor at the Department of Automated Control Systems of the Ufa University of Science and Technology. The list of scientific works includes about 40 works

works in the field of management in social and economic systems. AuthorID (RSCI): 38216513; Author ID (Scopus): ORCID 0000-0002-5226-0512; Researcher ID (WoS): AAO-7905-2021. *luyda-kr@yandex.ru*.

Almira Raisovna Fakhrollina (b. 1982) graduated from the Kumertau branch of Ufa State Aviation Technical University (2004), Candidate of Technical Sciences (2017), Associate Professor (2020). Director of the branch of Ufa University of Science and Technology in Kumertau. The list of scientific works includes about 50 works in the field of mathematical software. AuthorID (RCI): 31294902; Author ID (Scopus): ORCID 0000-0002-3482-4169; Researcher ID (WoS): AAT-3738-2021. *almirafax@mail.ru*.

Liliya Iftarovna Baimurzina (b. 1987) graduated from the Ufa State Aviation Technical University (2009). Senior Lecturer of the Department of Aircraft Production Technology of the Ufa University of Science and Technology. The list of scientific papers includes about 10 works in the field of designing information analytical systems. AuthorID (RSCI) 1185834. Orcid ID 0009-0009-1996-0494. *lilabay@mail.ru*.

Received September 04, 2023. Revised November 17, 2023. Accepted November 27, 2023.



Формирование лексического модуля прикладной онтологии для её обучения

© 2023, П.А. Ломов

Кольский научный центр Российской академии наук,
Институт информатики и математического моделирования им. В.А. Путилова, Апатиты, Россия

Аннотация

Трудоёмкость разработки онтологий связана с их обучением, которое предполагает автоматизацию решения задач извлечения онтологических понятий и отношений из естественно-языковых текстов. Для созданной онтологии, используемой в информационной системе, с большой долей вероятности возникнет необходимость расширения её понятийной системы ввиду усложнения или изменения процессов обработки данных. Последующее применение текстового анализа для обнаружения новых понятий и включения их в онтологию, т.е. связывания их с существующими понятиями, потребует идентификации последних в предложениях естественно-языковых текстов. В данной работе рассматривается задача автоматизации формирования лексического модуля прикладной онтологии, включающего формализованные представления онтологических понятий в естественно-языковых текстах. Представлен обзор работ, посвящённых использованию лексической информации о компонентах онтологии при решении задач, связанных с анализом текстовых данных. Рассмотрены способы применения модели *OntoLex-Lemon* для определения структуры лексических представлений понятий онтологии. Предложена процедура формирования лексических представлений на основе анализа текстов предметной области, учитывающая наличие у понятий имён, состоящих из нескольких слов. Приведены результаты применения полученного модуля для автоматического формирования обучающего набора нейросетевой языковой модели, используемой в задаче обучения онтологии для обнаружения новых понятий в корпусе предметных текстов.

Ключевые слова: лексический модуль, прикладная онтология, *OntoLex-Lemon*, обучение онтологии.

Цитирование: Ломов П.А. Формирование лексического модуля прикладной онтологии для её обучения // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №4(50). С.520-530. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-520-530.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Разработка онтологий включает: определение словаря понятий онтологии, задание иерархических и предметных отношений между ними, наполнение онтологии экземплярами, формализацию ограничений предметной области (ПрО) в виде логических выражений, тестирование и др. Полученная онтология представляет знания о ПрО и предполагает её дальнейшее развитие, которое является следствием изменения условий эксплуатации и появления задач, требующих учёта дополнительных предметных знаний. В этой связи актуальным является обучение онтологий [1], т.е. автоматизация процесса создания онтологий и их последующего расширения и усложнения. Основным источником новых знаний для пополнения и/или изменения понятийной системы, представленной в онтологии, являются естественно-языковые (ЕЯ) тексты (ЕЯТ) – одна из форм фиксации знаний в различных ПрО. Поэтому обучение онтологий на основе анализа текстов и последующего представления их фрагментов в виде новых понятий, связанных отношениями, является распространённой практикой.

Обучение онтологий на основе анализа ЕЯТ можно рассмотреть с позиции триады «знак-смысл-предмет» - т.н. треугольника Фреге [2], модели, предложенной для понимания семантики знаковых выражений. В тексте в качестве знака имеется слово или словосочетание и подразумевается некоторый его смысл, зависящий от контекста употребления слова и имеющихся знаний о ПрО. С учётом этого можно указать на некоторый предмет реального мира. В онтологии знаком может выступать компонент онтологии - класс, экземпляр, свойство. Смысл знака может задаваться по-разному в зависимости от используемого языка описания онтологии: в случае *RDF/RDFS (Resource Description Framework/ RDF Schema)*, *SKOS (Simple Knowledge Organization System)* - его положением в понятийной системе; в случае *OWL (Ontology Web Language)* - множеством логических выражений (*OWL*-аксиом), которое формально определяет множество интерпретации знака.

При выявлении в тексте новых понятий или отношений, которые могут быть добавлены в онтологию, необходимо для имеющихся в ней элементов (онтологических знаков) обнаружить такие слова и/или словосочетания в тексте (текстовые знаки), которые бы соответствовали друг другу, т.е. обозначали одинаковые предметы. Такое увязывание знаков и предметов в двух триадах (онтологической и текстовой) позволяет сопоставить и соответствующие им смыслы, представленные текстовым и онтологическим (т.е. набором логических выражений и фрагментом понятийной системы онтологии) контекстами. В результате сопоставления появляется возможность расширить онтологический смысл на основе текстового, т.е. добавить в онтологию новые понятия.

Для решения задачи поиска понятий онтологии в тексте требуется наличие некоторого их лексического представления, включающего компоненты соответствующей текстовой триады «знак-смысл-значение». Объём и сложность такого лексического представления значительно влияют на эффективность обучения онтологии, применяемые методы и полученные результаты. Важным требованием является также его формирование именно автором онтологии на этапе её разработки, т.к. это позволяет избежать искажения и/или утраты авторского смысла.

При решении задач с применением онтологий ввиду, как правило, отсутствия такого специального лексического представления в качестве него используют наименования понятий и/или отношений, которые трактуются как текстовые знаки, тождественные онтологическим - классам, экземплярам, отношениям или атрибутам. Наличие такого базового лексического представления позволяет с некоторой степенью достоверности обнаруживать в ЕЯТ знаки (слова или словосочетания), соответствующие онтологическим. Однако для обучения онтологий использование только онтологических наименований является недостаточным, т.к. в текстах понятия или отношения могут быть представлены различными группами слов. В данной работе рассматривается проблема автоматизации формирования модуля, содержащего лексические представления для понятий прикладной онтологии, а также возможности его дальнейшего использования на примере решения задачи обучения онтологий.

1 Обзор работ

Существует множество работ, связанных с обработкой лексической информации с применением онтологических моделей. Среди них можно выделить несколько групп в зависимости от использования существующей или создания новой лексической онтологии и способов её формирования и применения. В одну группу можно отнести работы, выполняемые в рамках концепции связанных лингвистических данных (*Linguistic Linked Open Data*) [3], направленной на представление с помощью языков семантической паутины существующих лингвистических ресурсов (словарей, тезаурусов и др.), а также результатов анализа и аннотирова-

ния ЕЯТ. Целью в этом случае является обеспечение возможности совместного использования различных лингвистических данных в веб-сервисах, ориентированных на решение задач обработки ЕЯ информации. Так, в работе [4] рассматривается отображение *Open-de-WordNet*, аналога *WordNet* для немецкого языка, в онтологическую модель *OntoLex-Lemon (Lexicon Model for Ontologies)*, а также возможности включения в неё дополнительной лексической информации для слов помимо их лемм и тэгов.

В работах, использующих лингвистические онтологии, последние обычно представляют собой объёмные и признанные научным сообществом модели. При этом язык их описания и структура могут сильно отличаться от онтологий, представленных в виде семантической сети или таксономии. Например, работа [5] посвящена применению лексической онтологии в контексте решения проблемы извлечения мнений из ЕЯТ, относящихся к туристической тематике. В этом исследовании онтология *WordNet* используется в случаях отсутствия слова в словаре и недостаточного количества размеченных образцов на этапе обучения. Благодаря ей удаётся расширить список ключевых слов, ассоциированных с определённой категорией, путём добавления в словарь их синонимов. Это позволяет повысить точность классификации найденных мнений, включающих слова, отсутствующие в обучающем наборе.

В работах, в которых производится предварительное формирование лингвистической онтологии, рассматривается создание новой либо наполнение собранными данными существующей онтологии. Например, в работе [6] рассматривается процедура формирования в онтологии лексического слоя в виде некоторой дополнительной системы классов: «Лексическое значение», «Лексическая сущность», «Контекст», «Слово», «Фраза» и др. С их помощью осуществляется представление связей слова, употребляемого в нескольких контекстах, с понятиями онтологии и разными смыслами. Контекст и смысл в этом случае представляются в виде экземпляров соответствующих классов. Каждый экземпляр представляет некоторый набор слов. Применение данного слоя позволило авторам в ходе экспериментов определять смысл слов, встречающихся в анализируемых текстах. В качестве примера наполнения существующей онтологии можно привести работу [7]. В ней авторы констатируют утрату лексической информации при переходе от термина, представленного в тексте (в лексическом слое), к его представлению в онтологии (в онтологическом слое) и показывают необходимость создания интерфейса между ними в виде лексической онтологии. Рассматривается применение такого интерфейса в веб-сервисе, ориентированном на поиск кулинарных рецептов в сети Интернет. Анализ лексической информации (синонимов и гиперонимов терминов) позволяет находить большее количество рецептов. Онтологический слой даёт возможность расширить ЕЯ поисковый запрос и получить наиболее подходящие профилю пользователя рецепты. Основой лексической онтологии является *OntoLex-Lemon* [8], включающая набор классов и отношений для представления необходимых данных в виде экземпляров.

В приведённых работах создание лексической онтологии не является основной целью, а рассматривается в контексте решения прикладной задачи. Примером автоматического формирования лексического слоя для существующей онтологии является работа [9]. В ней исследуются возможные способы для добавления в существующую онтологию лексической информации, т.н. её лексикализации. В качестве основы её представления применяется онтология *OntoLex-Lemon*. Предлагаются два подхода получения лексической информации для классов и отношений онтологии соответственно. Первый подход включает нахождение синонимов наименований классов в некотором внешнем словаре, последующее их сохранение в виде экземпляров класса «Лексическая единица» онтологии *OntoLex-Lemon*, связываемых отношениями с понятиями исходной онтологии.

Во втором подходе из исходной онтологии извлекаются триплеты вида: «экземпляр класса А» - «отношение» - «экземпляр класса Б», включающие отношения, для которых необхо-

димо сформировать лексикализацию. Из текстового корпуса извлекается набор предложений, содержащих оба экземпляра одного триплета, и создаются деревья синтаксических зависимостей, которые конвертируются в триплеты и сохраняются в хранилище триплетов. В результате получается некоторый набор триплетов, соответствующих предложениям с возможными лексикализациями. Далее определяются несколько паттернов извлечения лексикализаций в виде *SPARQL*-запросов к хранилищу триплетов. Подставляя в данные паттерны наименования отношений исходной онтологии, собираются триплеты, представляющие возможные лексикализации отношений.

Описанный подход к извлечению лексикализаций использует веб-ресурс *DBpedia* в качестве прикладной онтологии и ресурс *Wikipedia* в качестве текстового корпуса. *DBpedia*, как онтология, ввиду своего значительного объёма содержит большое множество разнообразных экземпляров отношений, что позволяет с большой вероятностью найти некоторый набор предложений, где они используются. Увеличивает данную вероятность то, что ресурс *Wikipedia*, в текстах которого осуществляется поиск, является источником информации для формирования *DBpedia*. В случае применения такого подхода для формирования лексического модуля для произвольной прикладной онтологии ввиду её сравнительно меньшего размера и возможного отсутствия экземпляров классов, а также использования небольшого текстового корпуса, включающего специализированные тексты, получение приемлемого результата маловероятно.

2 Применение *OntoLex-Lemon* для представления лексической информации

В качестве основы лексической онтологии предлагается использовать модель *OntoLex-Lemon*, имеющую широкие возможности для представления лингвистических ресурсов в виде *OWL*-онтологий. Она включает базовый модуль, содержащий основные понятия и отношения для описания лексем, их форм и связывания их с понятиями прикладных онтологий, а также набор дополнительных модулей, которые расширяют описательные возможности для представления специфических атрибутов и отношений лексем:

- *Syntax and Semantics (synsem)* представляет необходимые условия употребления лексемы в текстах;
- *Decomposition (decomp)* используется для описания словосочетаний и многословных терминов;
- *Linguistic Metadata (lime)* позволяет задавать метаописания для наборов лексем;
- *Lexicography Module (ontolex)* определяет словарь для представления различных морфологических и синтаксических атрибутов лексем, например, часть речи, падеж, залог, одушевлённость и т.д.

Основными понятиями базового модуля (рисунок 1) являются:

- Словарная единица (*Lexical Entry*) представляет собой слово, словосочетание или аффикс, которые рассматриваются в качестве лексического представлением некоторой онтологической сущности (*Ontology Entity*) – класса, отношения, атрибута и др.;
- Лексическое понятие (*Lexical Concept*) представляет собой мысленный образ, который вызывается в сознании (отношение «*evokes*») некоторой словарной единицей (лексическое понятие может быть связано с несколькими словарными единицами);
- Лексический смысл (*Lexical Sense*) определяет своего рода контекст соотношения словарной единицы с лексическим и/или онтологическим понятием (по сути, оно является реификацией отношения «*denotes*»);
- Онтологическая сущность (*Ontology Entity*) представляет собой некоторый компонент (класс, экземпляр, отношение, атрибут и др.) из внешней онтологии.

Данные понятия позволяют описать упомянутую триаду «знак-смысл-предмет» с использованием лишь данного набора при моделировании лексического представления с различной степенью детализации. Например, в простом случае можно связать отношением «denotes» онтологическую сущность со словарной единицей, представляющей её в тексте.

Далее можно дополнить такое описание лексическим смыслом, содержащим, например, словарную статью, и тем самым дать ответ на вопрос: почему данная словарная единица и онтологическая сущность соответствуют друг другу?

Отдельно следует рассмотреть представление смысла синонимов. Авторами *OntoLex-Lemon* указывается на то, что лексический смысл лексикализируется в одной словарной единице, поэтому он не может быть соотносён с несколькими единицами. В этом случае для объединения синонимов следует использовать лексическое понятие, которое может иметь несколько лексических смыслов, связанных непосредственно со словарными единицами, представляющими синонимы.

В контексте данного исследования важным является определение способа моделирования лексического представления онтологических понятий, которые имеют имена, состоящие из нескольких слов. Для этого предлагается использовать схему, представленную на рисунке 2. Согласно приведённой схеме ЕЯ наименование-словосочетание представляется экземпляром класса «Многословная словарная единица» (*MultiWordExpression*), который является подклассом *Lexical Entry*. Для каждого из составляющих его слов-частей создаётся экземпляр класса «Часть» (*Component*) и экземпляр класса *Lexical Entry*. Оба экземпляра связываются отношением «Соответствует» (*correspondsTo*). Такое представление слова-части в виде двух экземпляров обусловлено тем, что в составе словосочетания оно будет иметь конкретные характеристики (например, род, число, порядковый номер), которые будут не релевантны её общему представлению в виде *Lexical Entry*. На схеме также присутствует класс «Форма представления» (*Form*), экземпляры которого являются письменным представлением лексической единицы и/или её леммой.

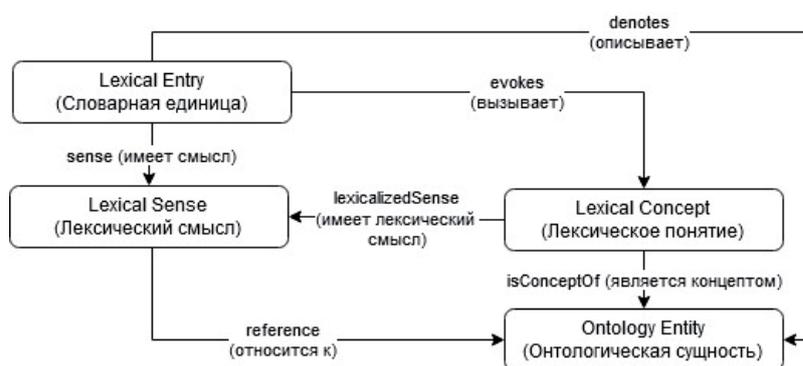


Рисунок 1 - Основные понятия онтологии *OntoLex-Lemon*

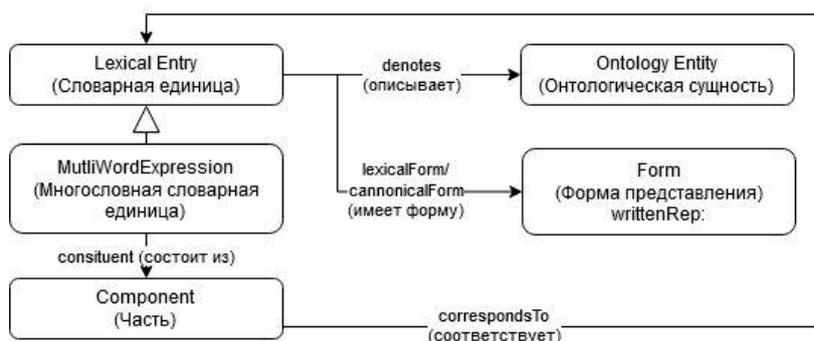


Рисунок 2 - Схема представления многословных наименований понятий с помощью *OntoLex-Lemon*

3 Процедура формирования лексического модуля

Формирование лексического модуля онтологии начинается с анализа её классов и экземпляров и последующего создания на основе их наименований исходных лексических пред-

ставлений. В результате лексический модуль будет включать множество экземпляров классов *Lexical Entry* и *MultiWordExpression*, соответствующих наименованиям, состоящим из одного или нескольких слов.

На следующем этапе производится расширение модуля путём добавления в него альтернативных лексических представлений понятий. Для этого выполняется автоматический анализ корпуса текстов ПрО, из которых извлекаются предложения, содержащие наименования понятий онтологии. Для каждого предложения с помощью программной библиотеки *spacy* [10] формируется дерево синтаксических зависимостей, которое является результатом синтаксического разбора предложения и отражает синтаксические отношения между его словами в виде древовидного графа. Его корневой (главной) вершиной обычно выступает сказуемое, к которому присоединяются подлежащее и другие члены предложения.

В ходе дальнейшего анализа такого дерева из соответствующего ему предложения извлекается именная группа, имеющая в качестве главного слова наименование понятия или, в случае наименования-словосочетания, главное слово этого словосочетания. При этом различия порядка и формы слов, а также наличие слов, не присутствующих в исходном наименовании, игнорируются.

Например, на рисунке 3 представлено синтаксическое дерево для предложения «Международный аэропорт Шереметьево является крупнейшим в России». В случае наименования понятия «аэропорт Шереметьево» в данном дереве находятся вершины, соответствующие словам «аэропорт» и «Шереметьево». Из них выбирается вершина, которая соответствует главному слову наименования - «аэропорт». В результате она и все её потомки, составляют результирующую именную группу «Международный аэропорт Шереметьево».



Рисунок 3 - Пример дерева синтаксических зависимостей предложения

Полученные таким образом именные группы включаются в лексический модуль как экземпляры *MultiWordExpression* (рисунок 4).

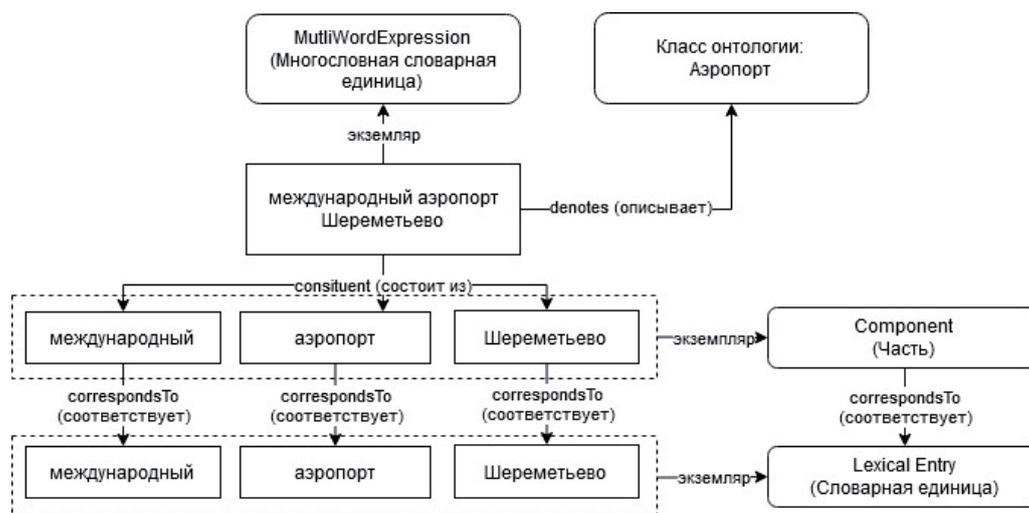


Рисунок 4 - Пример задания лексического представления для онтологической сущности - класса "Аэропорт" в лексическом модуле в виде экземпляра *MultiWordExpression*

На финальном этапе производится экспертная проверка расширенного модуля, в ходе которой удаляются и/или корректируются добавленные лексические представления.

4 Применение лексического модуля при обучении онтологии

Проверка целесообразности формирования лексического модуля онтологии проверялась путём его использования для решения задачи обучения онтологий с помощью технологии, предложенной в работе [11]. Её применение предполагает автоматизированное создание обучающего набора для тренировки нейросетевой языковой модели, ориентированной на решение задачи извлечения именованных сущностей. Обучающий набор строится на основе текстов ПрО путём представления предложений, содержащих наименования классов и экземпляров онтологии в виде троек: предложение, границы понятия, категория. Предполагается, что обученная с его помощью модель будет извлекать из текстов новые понятия на основе контекстов, сходных с теми, в которых употребляются понятия обучающего набора.

Важным является определение границ понятия в случаях, когда понятие задано в разных предложениях разным количеством слов. Ошибка в определении границ приводит к неверному определению контекста понятия, снижает качество обучения и способность модели правильно обнаруживать новые понятия для пополнения онтологии.

Для решения данной задачи на этапе создания обучающего набора был использован лексический модуль. В качестве исходного множества понятий обучаемой онтологии были приняты понятия, характерные для новостных текстов, такие как: президент, государство, событие, компания, персона и др. Формирование модуля осуществлялось на основе фрагмента специализированного текстового корпуса (корпус русскоязычных статей Интернет-издания *Lenta.ru*) [12]. В состав модуля вошли различные лексические представления понятий онтологии, например: президент страны, акции компании, акция протеста, президент компании, международная компания и др.

Применение лексического модуля на этапе формирования обучающего набора позволило в значительно большем числе предложений правильно определить границы для понятий с наименованиями-словосочетаниями, т.к. в модуле содержалось несколько лексических представлений, из которых выбиралось наиболее подходящее, тогда как использование только наименования понятия давало лишь одно.

Для последующего сравнения результатов был сформирован обучающий набор без использования лексического модуля, т.е. с учётом только наименований понятий. Было обучено две модели с применением лексического модуля и без него. Оценка эффективности обнаружения новых понятий моделями проводилась на основе сравнения результатов работы моделей с эталонным набором, сформированным экспертом ПрО и включающим понятия, которые должны быть извлечены языковой моделью из текстов.

Сравнение производилось по следующим критериям:

- полнота = R/N , где R - количество понятий эталонного набора, обнаруженных моделью, N – общее количество понятий в эталонном наборе;
- точность = R/M , где R - количество понятий эталонного набора, обнаруженных моделью, M – общее количество понятий, обнаруженных моделью.

Были получены следующие результаты работы моделей:

- модель, обученная без использования лексического модуля: точность 0.002, полнота 0.03;
- модель, обученная с использованием лексического модуля: точность 0.06, полнота 0.65.

Разница между полученными результатами позволяет сделать вывод о повышении эффективности обучения при использовании набора, полученного с применением информации из лексического модуля онтологии.

Наряду с использованием модуля для установления правильных границ понятия в предложении при формировании обучающего набора, его можно также применять, например, в задачах связывания именованных сущностей (*Named Entity Linking*) [13] или их разрешения (*Entity Resolution*) [14]. Эти задачи предполагают сопоставление сущности с некоторым фрагментом данных (текстом, строкой в таблице и т.п.). Для этого может быть использована информация из лексического модуля, например, лексические представления понятий.

Следует заметить, что для данных задач существуют специальные подходы с применением нейронных сетей [15, 16]. Однако их внедрение потребует создание и сопровождение соответствующих программных компонентов, тогда как использование лексического модуля в качестве источника данных о соответствии онтологических и текстовых знаков может обеспечить приемлемый уровень качества решения с меньшими затратами труда и времени.

Еще одним направлением использования лексического модуля может быть генерация так называемых затравок для больших языковых моделей [17], получивших распространение в области анализа ЕЯТ в последние годы. Ввиду существенных требований к аппаратной платформе для проведения их дообучения путём тонкой настройки [18] популярность приобрёл альтернативный способ, называемый контекстным обучением [19]. В этом способе вместе с входными данными передаётся некоторая дополнительная (подсказывающая) информация – затравка (*prompt*), которая может быть строкой ключевых слов, иногда включающей форматирование. Это позволяет направить модель на генерацию более точного и полного ответа. Для создания затравок в ряде работ рассматривается применение онтологий [19, 20] в качестве источника данных. В этом случае целесообразным является применение для их создания лексического представления понятия из лексического модуля онтологии в качестве дополнения или альтернативы онтологическим элементам (идентификатору *IRI*, аннотациям *rdfs:label*, *rdfs:comment*).

В этом контексте лексический модуль можно рассматривать уже как интерфейс между концептуальным уровнем, представленным понятийной системой онтологии, и большой языковой моделью, которая выступает в качестве некоторой замены огромного множества ЕЯТ, т.к. потенциально может сгенерировать их. Однако такая модель явным образом оперирует лишь элементами последовательностей – токенами, которые представляют собой упорядоченные множества символов, часто встречающихся вместе [21]. Таким образом, «понимание» моделью синтаксиса и семантики языка сводится к её способности предоставлять список наиболее вероятных токенов для их добавления в определённую позицию последовательности.

Заключение

В работе рассматривается задача автоматизации формирования лексического модуля для прикладной онтологии. Его создание представляет собой один из этапов разработки онтологии, который позволяет упростить её дальнейшее использование при решении задач, связанных с обработкой ЕЯТ, т.к. особенности сопряжения текстовых и онтологических знаков, характерных для ПрО, будут явно заданы разработчиком.

Применение такого модуля для обучения онтологии предполагает использование нейросетевой языковой модели. При обучении на наборе данных, подготовленном с применением лексического модуля, возрастает эффективность работы по критериям полноты и точности обнаружения новых понятий онтологии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Wong W., Liu W., Bennamoun M.** Ontology learning from text: A look back and into the future // ACM Comput. Surv. 2012. Vol.44(4). P.1-36. DOI:10.1145/2333112.2333115.
- [2] **Фреге Г.** Смысл и денотат. Пер. с нем. Е.Э. Разлоговой // Семиотика и информатика. 1977. Вып.8. С.181–210.
- [3] **Cimiano P. et al.** Linguistic linked open data cloud // Linguistic linked data: Representation, generation and applications. Cham: Springer International Publishing, 2020. P.29–41.
- [4] **Declerck T., Siegel M., Gromann D.** OntoLex-Lemon as a possible bridge between WordNets and full lexical descriptions. Conference: 10th Global WordNet Conference (GWC)At: Wroclaw, Poland. 2019. 7 p.
- [5] **Chen L.J., Hoon G.K.** Feature Expansion using Lexical Ontology for Opinion Type Detection in Tourism Reviews Domain: 8 // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). The Science and Information (SAI) Organization Limited, 2020. Vol.11(8). DOI:10.14569/IJACSA.2020.0110877.
- [6] Lexical Ontology Layer – A Bridge between Text and Concepts | SpringerLink. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-34624-8_20.
- [7] **Badra F.** Ontology and Lexicon: The Missing Link // 9th International Conference on Terminology and Artificial Intelligence, TIA 2011, Paris, 10 November 2011. P.16–18.
- [8] **Klimek B. et al.** Challenges for the representation of morphology in ontology lexicons. Proceedings of eLex 2019. P.570-591.
- [9] **Walter S., Unger C., Cimiano P.** M-ATOLL: A framework for the lexicalization of ontologies in multiple languages // The semantic web – ISWC 2014 / ed. Mika P. et al. Cham: Springer International Publishing, 2014. P.472–486. DOI:10.1007/978-3-319-11964-9_30.
- [10] **Honnibal M., Montani I.** spaCy 2: Natural language understanding with Bloom embeddings, convolutional neural networks and incremental parsing. 2017.
- [11] **Lomov P., Malozemova M., Shishaev M.** Training and Application of Neural-Network Language Model for Ontology Population // Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems / ed. Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. Cham: Springer International Publishing, 2020. P.919–926. DOI:10.1007/978-3-030-63319-6_85.
- [12] Корпус русскоязычных статей Интернет-издания Lenta.ru: <https://kaggle.com/yutkin/corpus-of-russian-news-articles-from-lenta>.
- [13] **Tedeschi S. et al.** Named Entity Recognition for Entity Linking: What Works and What’s Next // Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2021. Punta Cana, Dominican Republic: Association for Computational Linguistics, 2021. P.2584–2596. DOI:10.18653/v1/2021.findings-emnlp.220.
- [14] **Bhattacharya I., Getoor L.** Entity Resolution // Encyclopedia of Machine Learning / ed. Sammut C., Webb G.I. Boston, MA: Springer US, 2010. P. 321–326.
- [15] **Barlaug N., Gulla J.A.** Neural Networks for Entity Matching: A Survey // ACM Trans. Knowl. Discov. Data. 2021. Vol.15(3). P.52:1-52:37.
- [16] **Gottapu R.D., Dagli C., Ali B.** Entity Resolution Using Convolutional Neural Network // Procedia Computer Science. 2016. Vol.95. P.153–158. DOI:10.1016/j.procs.2016.09.306.
- [17] **Hadi M.U. et al.** Large Language Models: A Comprehensive Survey of its Applications, Challenges, Limitations, and Future Prospects. 2023. DOI:10.36227/techrxiv.23589741.
- [18] **Ly K. et al.** Full Parameter Fine-tuning for Large Language Models with Limited Resources: arXiv:2306.09782. arXiv, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.09782.
- [19] **Shin T. et al.** AutoPrompt: Eliciting Knowledge from Language Models with Automatically Generated Prompts: arXiv:2010.15980. arXiv, 2020. DOI:10.18653/v1/2020.emnlp-main.346.
- [20] **Li F., Hogg D.C., Cohn A.G.** Ontology Knowledge-enhanced In-Context Learning for Action-Effect Prediction: Proceedings Paper // Advances in Cognitive Systems. Arlington, Virginia: ACS-2022, 2022.
- [21] **Zouhar V. et al.** A Formal Perspective on Byte-Pair Encoding: arXiv:2306.16837. arXiv, 2023.

Сведения об авторе

Ломов Павел Андреевич, 1984 г. рождения, к.т.н., старший научный сотрудник Института информатики и математического моделирования имени В.А. Путилова Кольского научного центра Российской академии наук. Области научных интересов: представление знаний, онтологическое моделирование, семантическая сеть. AuthorID (РИНЦ): 8479-8320. Author ID (Scopus): 55350587100; ORCID: 0000-0002-0924-0188; Researcher ID (WoS): P-6627-2015. *lomov@iimm.ru*.



Поступила в редакцию 28.09.2023, после рецензирования 22.10.2023. Принята к публикации 01.11.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-520-530

Formation of the lexical module of applied ontology for its learning

© 2023, P.A. Lomov

*Kola Science Centre of the Russian Academy of Science,
Institute for Informatics and Mathematical Modeling named after V.A. Putilov, Apatity, Russia*

Abstract

The complexity of developing ontologies is associated with their learning, which involves the automation of solving problems related to the extraction of ontological concepts and relationships from natural language texts. For a created ontology used in an information system, there will most likely be a need to expand its conceptual system due to the complication or change in data processing. Subsequent application of text analysis to discover new concepts and incorporate them into the ontology, that is, linking them with existing concepts, will require identifying the latter in sentences of natural language texts. This paper considers the problem of automating the formation of the lexical module of applied ontology, which includes formalized representations of ontological concepts in natural language texts. A brief review of existing works devoted to the use of lexical information about ontology components in solving problems related to the analysis of textual data is presented. The ways of using the OntoLex-Lemon model for determining the structure of lexical representations of ontology concepts are considered. A procedure is proposed for the formation of lexical representations based on the analysis of texts in the subject area, taking into account the case when concepts have names consisting of several words. The results of applying the obtained module for the automatic formation of a training set of a neural network language model used in the ontology learning task for discovering new concepts in the corpus of subject texts are presented.

Key words: *lexical module, applied ontology, OntoLex-Lemon, ontology learning.*

For citation: *Lomov PA.* Formation of the lexical module of applied ontology for its learning [In Russian]. *Ontology of designing.* 2023; 13(4): 520-530. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-520-530.

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

List of figures

Figure 1 - Basic concepts of the OntoLex-Lemon ontology

Figure 2 - Scheme for representing multi-word concept names using OntoLex-Lemon

Figure 3 - An example of a syntax dependency tree

Figure 4 - An example of a lexical representation of an ontological entity: the "Airport" class in the lexical module as a MultiWordExpression instance

References

- [1] **Wong W, Liu W, Bennamoun M.** Ontology learning from text: A look back and into the future // ACM Comput. Surv. 2012; 44(4): 1-36. DOI:10.1145/2333112.2333115.

- [2] **Frege G.** Meaning and denotation [In Russian. Translation from German by E.E. Razlogova]. *Semiotics and computer science*. 1977; 8: 181–210.
- [3] **Cimiano P. et al.** Linguistic linked open data cloud // *Linguistic linked data: Representation, generation and applications*. Cham: Springer International Publishing, 2020. P.29–41.
- [4] **Declerck T, Siegel M, Gromann D.** OntoLex-Lemon as a possible bridge between WordNets and full lexical descriptions. 2019.
- [5] **Chen LJ, Hoon GK.** Feature Expansion using Lexical Ontology for Opinion Type Detection in Tourism Reviews Domain: 8 // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. The Science and Information (SAI) Organization Limited, 2020; 11(8). DOI:10.14569/IJACSA.2020.0110877.
- [6] Lexical Ontology Layer – A Bridge between Text and Concepts | SpringerLink [Electronic resource]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-34624-8_20 (accessed: 15.10.2023).
- [7] **Badra F.** Ontology and Lexicon: The Missing Link // 9th International Conference on 2011.
- [8] **Klimek B. et al.** Challenges for the representation of morphology in ontology lexicons. 2019.
- [9] **Walter S, Unger C, Cimiano P.** M-ATOLL: A framework for the lexicalization of ontologies in multiple languages // *The semantic web – ISWC 2014 / ed. Mika P. et al.* Cham: Springer International Publishing, 2014. P.472–486.
- [10] **Honnibal M., Montani I.** spaCy 2: Natural language understanding with Bloom embeddings, convolutional neural networks and incremental parsing. 2017.
- [11] **Lomov P, Malozemova M, Shishaev M.** Training and Application of Neural-Network Language Model for Ontology Population // *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems / ed. Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z.* Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 919–926. DOI:10.1007/978-3-030-63319-6_85.
- [12] Corpus of Russian-language articles of the online publication Lenta.ru - <https://kaggle.com/yutkin/corpus-of-russian-news-articles-from-lenta> (date of access: 05/12/2022).
- [13] **Tedeschi S. et al.** Named Entity Recognition for Entity Linking: What Works and What’s Next // *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2021*. Punta Cana, Dominican Republic: Association for Computational Linguistics, 2021. P. 2584–2596. DOI:10.18653/v1/2021.findings-emnlp.220.
- [14] **Bhattacharya I, Getoor L.** Entity Resolution // *Encyclopedia of Machine Learning / ed. Sammut C., Webb G.I.* Boston, MA: Springer US, 2010. P. 321–326.
- [15] **Barlaug N, Gulla JA.** Neural Networks for Entity Matching: A Survey // *ACM Trans. Knowl. Discov. Data*. 2021; 15(3): 52:1-52:37.
- [16] **Gottapu RD, Dagli C, Ali B.** Entity Resolution Using Convolutional Neural Network // *Procedia Computer Science*. 2016; 95: 153–158. DOI:10.1016/j.procs.2016.09.306.
- [17] **Hadi MU. et al.** Large Language Models: A Comprehensive Survey of its Applications, Challenges, Limitations, and Future Prospects. 2023. DOI:10.36227/techrxiv.23589741.
- [18] **Lv K. et al.** Full Parameter Fine-tuning for Large Language Models with Limited Resources: arXiv:2306.09782. arXiv, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.09782.
- [19] **Shin T. et al.** AutoPrompt: Eliciting Knowledge from Language Models with Automatically Generated Prompts: arXiv:2010.15980. arXiv, 2020. DOI:10.18653/v1/2020.emnlp-main.346.
- [20] **Li F, Hogg DC, Cohn AG.** Ontology Knowledge-enhanced In-Context Learning for Action-Effect Prediction: Proceedings Paper // *Advances in Cognitive Systems*. Arlington, Virginia: ACS-2022, 2022. <https://advancesincognitivesystems.github.io/acs2022/papers/> (accessed: 21.10.2023).
- [21] **Zouhar V. et al.** A Formal Perspective on Byte-Pair Encoding: arXiv:2306.16837. arXiv, 2023.

About the author

Pavel Andreevich Lomov (b.1984), PhD, a senior researcher of Institute for Informatics and Mathematical Modeling named after V.A. Putilov – Subdivision of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. The research interests include knowledge representation, ontological modeling, and semantic web. AuthorID (RSCI): 8479-8320. Author ID (Scopus): 55350587100; ORCID: 0000-0002-0924-0188; Researcher ID (WoS): P-6627-2015. lomov@iimm.ru.

Received September 28, 2023, Revised October 22, 2023. Accepted November 01, 2023.



Модели и методы онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений

© 2023, В.А. Семенова ✉, С.В. Смирнов

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН, Самара, Россия

Аннотация

Исследуется потенциал и демонстрируется эффективность применения некоторых моделей и методов онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений. В качестве рабочей методологии структурного проектирования рассматривается морфологический анализ и синтез компоновочных схем артефактов. Строится теоретико-множественная модель морфологического пространства решений для классической версии методологии, включающая функционально-структурные подсистемы проектируемого артефакта, варианты реализации этих подсистем и собственно потенциальные технические решения. Впервые в отличие от существующих версий такой формализации детально описываются отношения между сущностями предметной области морфологического анализа. Несовместимость вариантов реализации отдельно взятой функционально-структурной подсистемы проектируемого артефакта и ограниченную сочетаемость вариантов реализации различных функционально-структурных подсистем предлагается описывать в рамках единой модели, известной в онтологическом инжиниринге как «ограничения существования». Анализ одной из закономерностей, присущей этой модели, позволил строго обосновать распространенный в структурном проектировании подход к описанию ограниченной сочетаемости вариантов реализации различных функционально-структурных подсистем в форме запретов. Показываются преимущества использования ограничений существования для описания пространства решений, и строится «скелет» формальной онтологии предметной области морфологического анализа. Структурный синтез технического решения сопоставляется с методом семантической идентификации объекта, разработанным в рамках онтологического анализа данных для обработки неполной и противоречивой эмпирической информации о результатах измерения свойств объекта. Делается вывод о пригодности этого метода для решения задачи структурного синтеза при уточнении понятия «нормального» подмножества свойств и сведений об издержках и/или выгодах включения каждого отдельно взятого варианта реализации функционально-структурных подсистем проектируемого артефакта.

Ключевые слова: онтологический анализ данных, семантическая идентификация объекта, анализ и синтез технических решений, морфологическое пространство, ограничения существования, комбинаторная оптимизация.

Цитирование: Семенова В.А., Смирнов С.В. Модели и методы онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений // Онтология проектирования. 2023. Т. 13, №4(50). С. 531-547. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-531-547.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, код научной темы FMRW-2022-0030.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Онтологический анализ данных (ОАД; см., в частности, [1]) – ветвь инженерии знаний, формирующая научные основы одной из технологий искусственного интеллекта, направленных на обобщение объектно-признаковых данных (о фундаментальной роли таких данных см. в [2, 3]) об интересующей субъекта предметной области (ПрО) с целью получения их сжатого, но содержащего полезную информацию представления.

Важное место в ОАД занимает задача *семантической идентификации объекта* ПрО [4, 5], состоящая в получении однозначных оценок истинности – **True** или **False** – суждений вида «объекту g присуще свойство t » на основе неполных и противоречивых эмпирических данных, а также учета априорных *ограничений существования* [6, 7], сужающих комбинаторное множество возможных наборов свойств идентифицируемого объекта. Опыт показывает, что эта задача имеет самостоятельный интерес. Например, в [8] модели и методы ОАД, предложенные для решения этой задачи, использованы для поддержки формирования когнитивных карт при их коллективной разработке. В данной статье указанные модели получают применение и развитие для *структурного анализа и синтеза технических решений*.

1 Базовая модель методологии структурного анализа и синтеза технических решений

В часто цитируемой статье [9] отмечается, что большая часть работ по теории автоматизированного проектирования посвящена вопросам параметрического синтеза и геометрического моделирования технических систем, а структурному синтезу технических решений (ТР) уделяется несопоставимо меньшее внимание. Вместе с тем, нельзя сказать, что соответствующий этап проектирования, задачей которого является построение некоторой упрощенной функционально-структурной модели будущего артефакта, формирование его *облика* (*компоновочной схемы, эскиза* и т.п.), с позиций инженерии знаний «слабоструктурирован» или «слабодокументирован» [10]. Напротив, эти действия признаются актуальными для инженерного творчества в целом, и существует апробированный формализованный подход для их поддержки – *морфологический анализ и синтез* ТР.

Разъяснению, развитию и применению морфологического анализа и синтеза ТР посвящена обширная литература, и пионером подхода единодушно признается Ф. Цвикки [11]. Известными советскими протагонистами этой методологии стали В.М. Одрин [12], А.Д. Закревский [13], А.И. Половинкин [14]; позднее она в многочисленных публикациях А.В. и О.И. Андрейчиковых получила расширенную интерпретацию как специальный способ принятия решений в различных ПрО [15, 16].

В сжатом изложении *морфологический анализ* области, где предстоит выбрать решение, состоит в формировании таблицы, описывающей «*морфологическое пространство*» [17] выбора ТР как множество дискретных точек, каждая из которых определяет комбинацию *трансверсаль* [18] *вариантов реализаций* (ВР) каждой из функций (шире – *функциональных подсистем, функционально-структурных подсистем* – далее ФСП) проектируемого артефакта. А *морфологический синтез* ТР сводится к выполнению некоторой *процедуры рационального выбора* определённой точки морфологического пространства (рисунок 1).

Можно предложить следующее формальное описание морфологического пространства:

- множество ФСП $W = \{w_i\}_{i=1, \dots, n}$, где $n \geq 1$;
- множество ВР ФСП V такое, что $V = \cup_{i=1, \dots, n} V_i$, $V_i = \{v_{ij}\}_{j=1, 2, \dots, k_i}$, $k_i \geq 1$, и $\forall i, j, i \neq j$:
 $V_i \cap V_j = \emptyset$ (пример подхода к моделированию морфологического пространства, когда $\exists i, j, i = j: V_i \cap V_j \neq \emptyset$, есть в [17]);
- множество потенциальных ТР (т.е. множество точек-трансверселей морфологического пространства) T , у которого $|T| = \prod_{i=1, 2, \dots, n} k_i$;
- бинарное отношение *взаимобусловленности*, которое полно на множестве W – МС: $W \times W \rightarrow \mathbf{True}$. В морфологическом анализе и синтезе обычно это отношение явно не фиксируется, но фактически предполагается, что ТР состоятельно тогда и только тогда, когда реализованы все ФСП проектируемого артефакта. Взаимобусловленность ин-

дуцируется бинарным отношением *обусловленности* C [7] – здесь оно является полным $C: W \times W \rightarrow \mathbf{True}$, – и объект любой природы самообусловлен, точнее, формально «взаимообусловлен» (в рисунках далее это не отмечается);

- бинарное отношение *несовместимости* (попарной несовместимости) $E: V \times V \rightarrow \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$, – которое здесь конфигурируется так, что

$$\forall i \forall x \in V_i: E(x) = V_i \setminus \{x\}. \tag{1}$$

Именно такая несовместимость ВР каждой отдельно взятой ФСП характерна для классической версии морфологического анализа и синтеза ТР;

- бинарное отношение «*является вариантом реализации*» $R: V \times W \rightarrow \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$, – характерная особенность которого состоит в том, что $\forall i \forall x \in V_i: R(x) = w_i$ (т.е. R – отношение между каждым ВР некоторой ФСП и этой ФСП);
- бинарное отношение «*ТР включает ВР ФСП*» $S: T \times V \rightarrow \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$, – причем $\forall x \in T, \forall i: (|S(x)| = n) \wedge (|S(x) \cap V_i|) = 1$.



Рисунок 1 – Табличное описание морфологического пространства решений

Пример, представленный таблицей 1, упрощенно определяет возможные компоновки холодильной машины¹. Строка «Испаритель» свидетельствует о потенциальной полезности введения *многоуровневого описания* морфологического пространства: на нулевом (базовом) уровне (морфологической таблице холодильного устройства) в строке «Испаритель» можно оставить варианты его формы; на первом уровне описать одномерное в данном случае морфологическое пространство материалов, пригодных для изготовления испарителя.

Таблица 1 – Морфологическое пространство компоновок холодильной машины

Функциональная подсистема	Возможные способы реализации подсистемы					
1. <i>Хладагент</i>	1.1 Аммиак	1.2 Пропан	1.3 Пропилен	1.4 Изобутан	1.5 Тетрафторэтан	
2. <i>Компрессор</i>	2.1 Поршневой	2.2 Ротационный	2.3 Центробежный	2.4 Тепловой (абсорбер)		
3. <i>Конденсатор</i>	3.1 Жидкостного испарения		3.2 Воздушного испарения	3.3 Испарительного охлаждения		
4. <i>Дроссель</i>	4.1 Капиллярная трубка	4.2 Автоматический клапан	4.3 Терморегулируемый вентиль		4.4 Электронно-управляемый вентиль	
5. <i>Испаритель</i>	5.1 Трубчатый медный	5.2 Трубчатый стальной	5.3 Пластинчатый медный	5.4 Пластинчатый стальной	5.5 Ребристый медный	5.6 Ребристый стальной

Развитие морфологического анализа, осуществляющее идею многоуровневых морфологических описаний, достигается путём введения бинарного отношения между множеством

¹ https://eti.su/articles/over/over_1534.html; <https://studfile.net/preview/5125548/page:11/>

вами. Подобные обстоятельства в большинстве практических случаев могут быть интерпретированы как *ограниченная сочетаемость ВР различных ФСП в одном ТР*, которая проявляется либо как предусловие, либо как постусловие выбора ВР одной ФСП – $x \in V_i$, – на выбор ВР другой ФСП – $y \in V_j, j \neq i$ [9]:

- *принуждение*, когда выбор x влечет, *обуславливает* выбор y , т.е. $C(x, y)$;
- *необходимость*, когда условием выбора x служит выбор y , т.е. выбор x обусловлен выбором y , что означает $C(y, x)$;
- *запрет на сочетание*, когда x и y не могут входить в одно ТР, т.е. x и y несовместимы – $E(x, y)$;
- *двойное принуждение*, когда x и y могут входить в ТР лишь одновременно, т.е. x и y взаимнообусловлены – $C(x, y) \wedge C(y, x) = MC(x, y)$.

Рисунки 3а и 3б демонстрируют две версии описания ограниченной сочетаемости ВР ФСП холодильной машины.

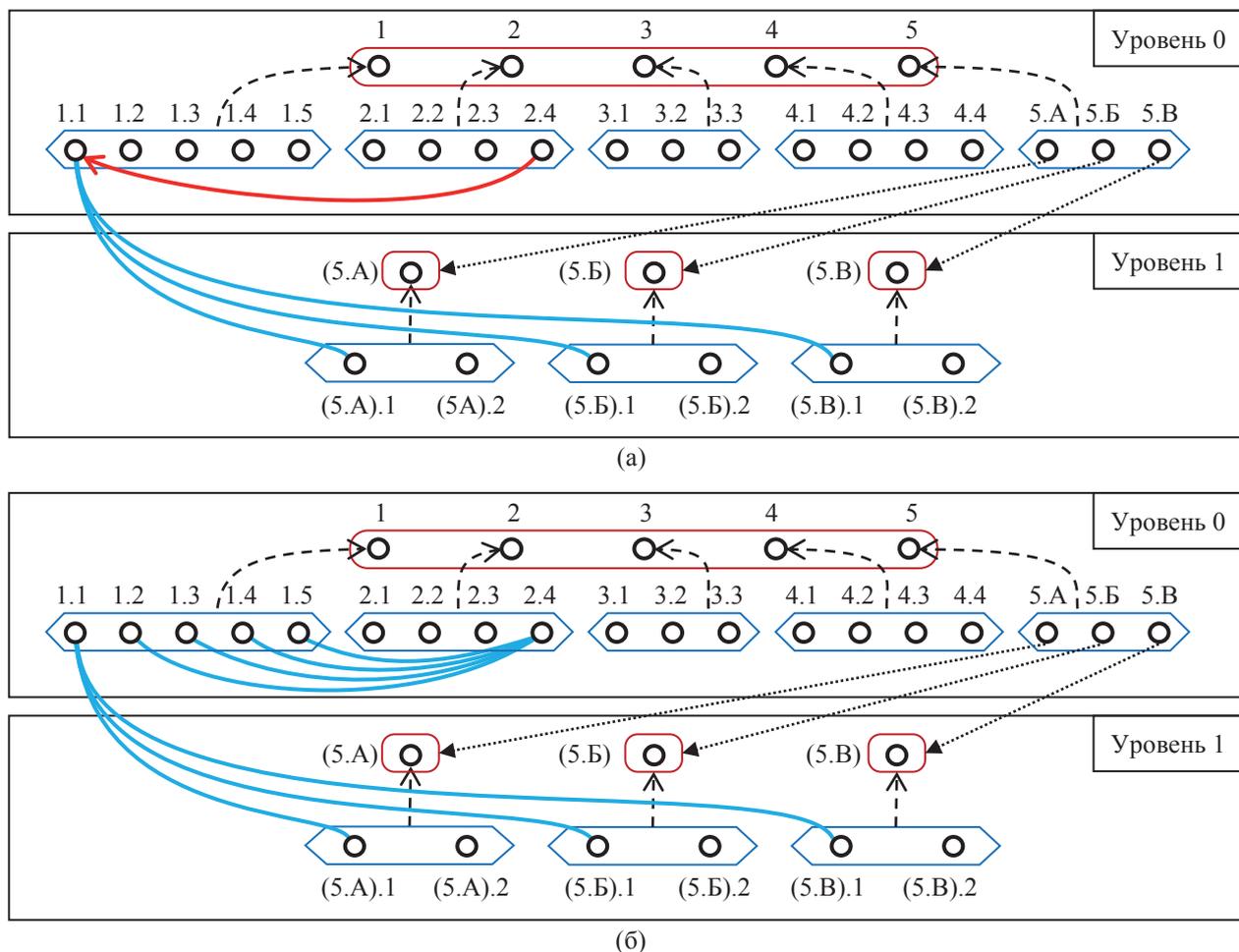


Рисунок 3 – Две версии многоуровневой морфологической модели холодильной машины при ограниченной сочетаемости вариантов реализации её различных функционально-структурных подсистем

Каждая версия одинаково учитывает знание о разрушительном действии аммиака на медную арматуру², но по-разному описывает то, что из хладагентов, указанных в таблице 1, только аммиак пригоден для постройки абсорбционного холодильника³. Для упрощения вос-

² <https://wihometals.com/ru/why-ammonia-is-not-compatible-with-copper>

³ <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/749776/>

приятия на этих рисунках взаимообусловленность ФСП отражена лишь охватывающим их контуром – скругленным прямоугольником. Аналогично – но шестиугольным контуром – показывается несовместимость вариантов реализации каждой ФСП, а связь этих вариантов с ФСП заменена соответствующей единичной связью контура и ФСП.

Обобщение формальной модели морфологического пространства, предложенной в разделе 1, для возможности описания ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП заключается в следующем.

Во-первых, для отражения возможной несовместимости ВР различных ФСП уточняется условие (1):

$$\forall i \forall x \in V_i: E(x) = V_i \setminus \{x\} \cup Y, \quad (2)$$

где $Y \subseteq V \setminus V_i$, т.е. в морфологическом пространстве ВР некоторой ФСП несовместим не только другими ВР этой ФСП, но, возможно, и с некоторыми ВР других ФСП.

Во-вторых, для описания потенциальной обусловленности ВР различных ФСП в модель вводится соответствующее отношение – $C: V \times V \rightarrow \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$. Это знаковый акт, т.к. определение на одной основе и отношения E , и отношения C устанавливает *ограничения существования* элементов этой основы – именно так описываются ограничения существования свойств у объектов исследуемой ПрО в инжиниринге онтологий [1, 6, 7].

Сосуществование «экзистенциональных» отношений E и C на единой основе (в рассматриваемом случае это множество ВР, или точек-трансверселей морфологического пространства, V) регулируется следующими двумя законами:

- естественный *запрет* одновременного включения в E и C любой пары элементов множества-основы:

$$\forall x, y \in V, x \neq y: \neg((E(x, y) = C(x, y)) \vee (E(x, y) = C(y, x)))$$

(в морфологическом пространстве этот запрет адресуется к любым двум ВР разных ФСП: $\forall i, j, i \neq j, x \in V_i, y \in V_j$, – поскольку обусловленность ВР может существовать лишь как вид ограниченной сочетаемости двух ВР разных ФСП);

- несовместимость характеризуется «*транзитивностью относительно обусловленности*» (рисунок 4):

$$\forall x, y, z \in V, x \neq z, y \neq z: C(x, y) \wedge E(y, z) \rightarrow E(x, z). \quad (3)$$

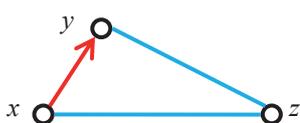


Рисунок 4 – Пример экзистенциональных зависимостей между вариантами реализации x, y, z функциональных подсистем проектируемого артефакта

На основании (3) следует констатировать, что пример на рисунке 3а некорректен. Формально верная морфологическая модель холодильной машины, учитывающая обнаруженную ограниченную сочетаемость ВР её ФСП – хладагента, компрессора и материала, из которого изготовлен испаритель, – получится при *совмещении* рисунков 3а и 3б.

Математически корректна в этом смысле морфологическая модель, показанная на рисунке 5. Используя введенную выше графическую нотацию, рисунок 5, информационно подерживаемый таблицей 2, демонстрирует морфологическое пространство с ограничениями существования ВР ФСП, сформированное для выбора облика реактивного самолёта. Пример построен по материалам [21], где описание морфологического пространства выбора ТР, сделанное в значительной степени неформально, уточнено введением варианта 232а для схемы донной части фюзеляжа самолёта. В [21] достоверность этого описания подтверждается, в частности, идентификацией на его основе облика реального выпускавшегося самолёта-истребителя (см. рисунки 5 и 6).

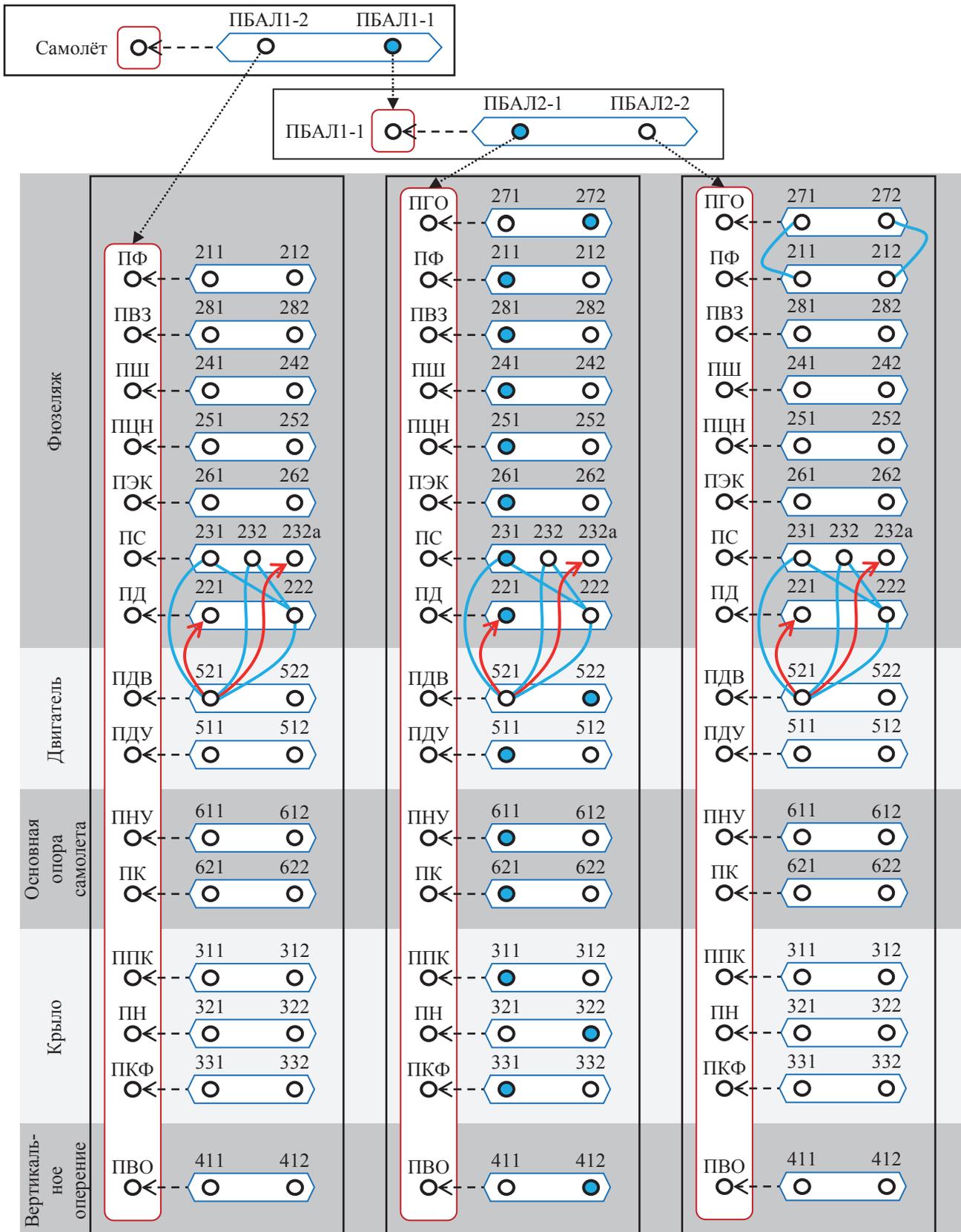
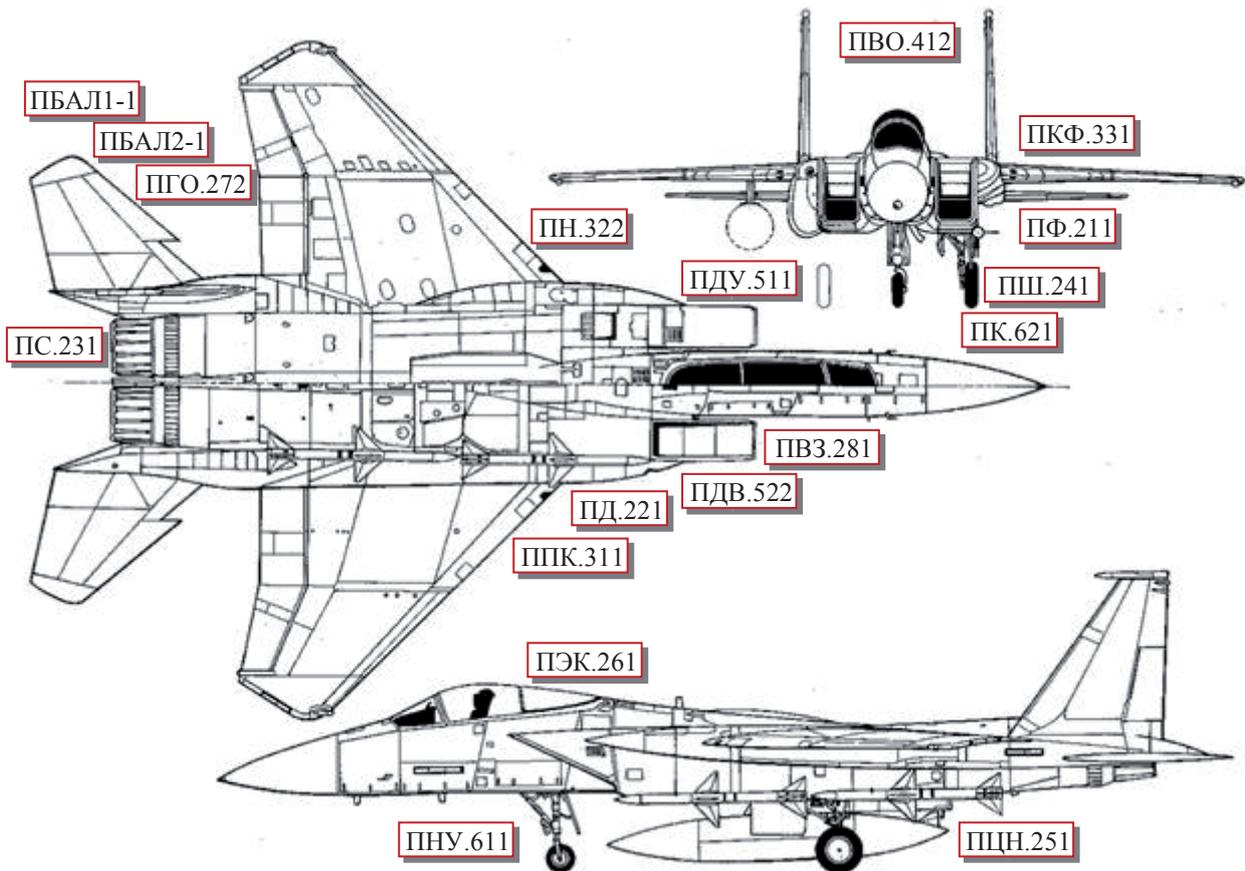


Рисунок 5 – Морфологическая модель признаков компоновочной схемы самолёта (по [21]; расшифровка оригинальных аббревиатур и цифровых кодов признаков представлена в таблице 2);
 ● - признаки компоновочной схемы истребителя F-15A (см. рисунок 6)

Таблица 2 – Признаки компоновочной схемы самолёта согласно [21]

Аббревиатура, код	Расшифровка
ПБАЛ1-1	Горизонтальное оперение имеется
ПБАЛ1-2	Горизонтальное оперение отсутствует
ПБАЛ2-1	Горизонтальное оперение располагается по оси X позади крыла
ПБАЛ2-2	Горизонтальное оперение располагается по оси X впереди крыла
ПГО	Размещение горизонтального оперения
271	На фюзеляже
272	На агрегатах, примыкающих к фюзеляжу
ПФ	Расположение воздухозаборников (ВЗ)
211	Сбоку фюзеляжа
212	Под фюзеляжем
ПВЗ	Схема воздухозаборников
281	Плоский воздухозаборник с горизонтальным клином торможения
282	Плоский воздухозаборник с вертикальным клином торможения
ПШ	Размещение колеса главной опоры относительно канала подвода воздуха к двигателю
241	Снизу-сбоку канала подвода воздуха к двигателю
242	Сверху-сбоку канала подвода воздуха к двигателю
ПЦН	Схема фюзеляжа по размещению целевой нагрузки
251	Наружная подвеска целевой нагрузки
252	Конформная подвеска целевой нагрузки
ПЭК	Размещение экипажа
261	Тандем
262	Рядом
ПС	Схема донной части фюзеляжа
231	Сопла двигателей разнесены
232	Сопла двигателей сомкнуты
232a	Сопло одного двигателя
ПД	Размещение двигателей
221	В едином отсеке фюзеляжа
222	В изолированных отсеках фюзеляжа
ПДВ	Число двигателей
521	Один
522	Два
ПДУ	Тип двигателей
511	ДТРДФ
512	ТРДФ
ПНУ	Направление уборки основной опоры самолёта
611	Вперёд (против полёта)
612	Назад (по полёту)
ПК	Число колёс
621	Одно
622	Два
ППК	Стреловидность передней кромки крыла
311	Прямая стреловидность
312	Обратная стреловидность
ПН	Конфигурация передней кромки крыла
321	С наплывом
322	Без наплыва
ПКФ	Расположение крыла относительно строительной горизонтали фюзеляжа
331	Высокоплан
332	Низкоплан
ПВО	Число килей вертикального оперения
411	Один
412	Два

Рисунок 6 – Компоновочная схема истребителя F-15A Eagle (корпорация «Макдоннел-Дуглас», США)⁴

2.2 Апология запретов и преимущества ограничений существования

При необходимости введения в морфологическую модель ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП проектируемого артефакта стараются обойтись «запретами на сочетания», т.е. ограничиться расширением (2) базовой модели морфологического пространства. Это объясняется тем, что в этом случае морфологический синтез ТР получает хорошую теоретическую поддержку, связанную с моделированием и анализом *многодольных* графов, а также методами и алгоритмами решения задачи о *независимом множестве* вершин графа [22]. Аргументация такого подхода, как правило, ограничивается экспертным мнением, что «запреты на сочетания» *чаще всего* встречаются в проектной практике инженеров различного профиля [9], что *во многих случаях* с помощью одних только запретов можно обосновать различные закономерности в природе и технике [23, 24].

Покажем, что моделирование ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП с помощью *ограничений существования* – используемой в ОАД фундаментальной модели сосуществования элементов некоего целого – позволяет строго обосновать *апологию запретов* в морфологическом анализе и синтезе ТР.

Прежде всего следует отметить, что за исключением запретов *все виды* ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП описываются в рамках бинарного отношения обусловленности *C* (см. подраздел 2.1). Поэтому достаточно установить, что на этапе синтеза ТР обусловленность одного отдельно взятого ВР *x* некоторой ФСП отдельно взятым ВР *y* другой ФСП *неизбежно* при включении в ТР *y* приведёт к включению в ТР *x* независимо от того, есть или

⁴ <http://www.airwar.ru/image/idop/fighter/f15a/f15a-1.gif>

отсутствует информация о рассматриваемой обусловленности (т.е. включение x будет осуществлено *независимо от знания* об этой в действительности существующей обусловленности благодаря другому механизму, и, забегая вперёд, его реализуют запреты).

Пусть $x \in V_i, y \in V_j, i \neq j$ и $C(y, x)$. Тогда согласно (3) $E(y) \supseteq V_i \setminus \{x\}$, т.е. в морфологической модели по меньшей мере имеют место несовместимости (запреты) вида

$$\forall z \in V_i \setminus \{x\}: E(y, z). \quad (4)$$

Следовательно, при включении в ТР y для реализации i -й ФСП для реализации j -й ФСП не остаётся никакого другого ВР кроме x . Если обусловленность $C(y, x)$ отсутствует (явно не зафиксирована), а несовместимости (4) всё-таки *определены*, произойдет то же самое. Поэтому *принципиально возможно* при описании ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП заместить обусловленность запретами.

В этом смысле морфологическая модель холодильной машины на рисунке 3б также корректна, как и модель, возникающая при совмещении схем на рисунках 3а и 3б.

Тем не менее описание морфологического пространства в задаче структурного анализа и синтеза ТР с использованием *ограничений существования* имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- *естественность* отображения всех разновидностей ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП, в частности, непосредственное описание 3-х из 4-х их видов с помощью отношения обусловленности;
- «автоматизм» *вскрытия закономерностей* ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП в форме запретов при фиксации в модели обусловленности некоторых таких ВР, который возникает при формировании морфологического пространства благодаря транзитивности несовместимости относительно обусловленности (3);
- возможность эффективной *редукции ограничений существования* [25, 26], которая здесь означает выявление классов эквивалентности во множестве точек-трансверселей морфологического пространства, что снижает размерность задачи синтеза ТР.

Таким образом, модель ограничений существования, получившая важное применение и развитие в ОАД, следует признать пригодной и предпочтительной для описания ограниченной сочетаемости ВР различных ФСП в задаче структурного анализа и синтеза ТР.

Модель ограничений существования в смысловом отношении «замыкает» базовое теоретико-множественное описание морфологического пространства выбора ТР, завершая определение остова *формальной онтологии* ПрО морфологического анализа ТР – соответствующая диаграмма «сущность-связь» приведена на рисунке 7.

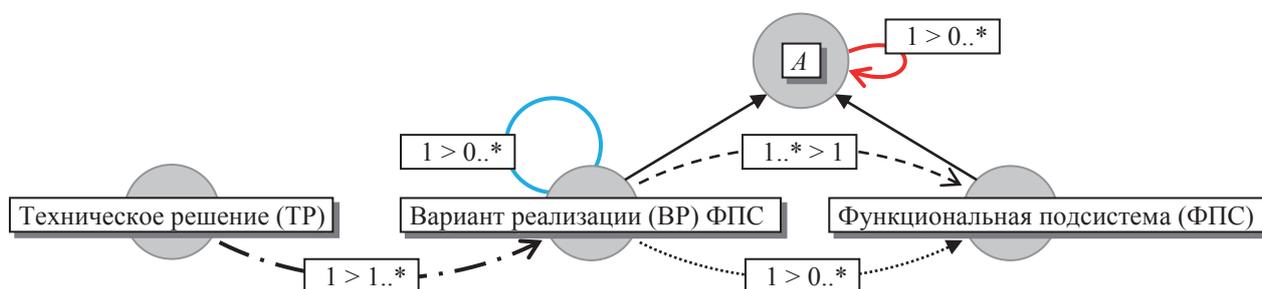


Рисунок 7 – Диаграмма «сущность-связь» онтологии предметной области морфологического анализа технических решений:

A – понятие о предметах, существование которых может и обуславливать существование, и обуславливаться существованием других таких же предметов;

\dashrightarrow – дуга отношения «ТР включает ВР ФСП»; \longrightarrow – дуга отношения «обобщает» между сущностями; легенды других отношений см. на рисунке 2

3 Структурный синтез технического решения как семантическая идентификация объекта проектирования

Преимущества использования ограничений существования в задаче структурного анализа и синтеза ТР будут состоятельны, если при этом способе описания в морфологическом пространстве можно осуществить эффективный поиск оптимальной точки-трансверсали (далее для определенности – *максимальной* по «весу» ВР ФСП, «включаемых» в ТР).

Поскольку, во-первых, задача поиска максимального по весу независимого множества вершин в графе, где вершины – компоненты решения, а ребра – свидетельства их несовместимости, является *NP*-полной [27], а, во-вторых, в подразделе 2.2 показана возможность *приведения* к такой постановке рассматриваемой поисковой задачи, где связи вершин описываются ограничениями существования, то последняя также *NP*-полна. Это означает, что трудоемкость решения задачи структурного синтеза ТР независимо от способа описания морфологического пространства (с помощью запретов или ограничений существования) экспоненциально зависит от параметров размерности исходных данных, и улучшить это положение можно лишь за счет эвристик и/или организации поиска приближенных решений.

Для задачи семантической идентификации объекта [4], к которой далее приводится задача структурного синтеза ТР, такой эффективный эвристический метод предложен в [5]. В его основу положены:

- понятие о *нормальном множестве свойств объекта* [6, 7]. Если на множестве всех измеряемых у объекта свойств M заданы ограничения существования, то лучшее признаковое описание объекта ищется лишь среди подмножеств $X \subseteq M$, которые замкнуты и совместимы, или *нормальны*, т.е. $\forall x \in X: (\exists y \in M: C(x, y) \rightarrow y \in X$ и $\forall x \in X: (\exists y \in M, x \neq y: E(x, y)) \rightarrow y \notin X$;
- эвристика, состоящая в том, что удовлетворить ограничения существования можно путем отказа от части эмпирической информации, имеющей *меньшую достоверность* при том, что эта информация состоит из эмпирических оценок истинности *базовых семантических суждений* (БСС) вида «объекту g присуще свойство m ».

В ОАД истинность БСС оценивается в рамках векторной логики V^{TF} [28], т.е. векторами $\langle True, False \rangle: \langle b_{gm}^+, b_{gm}^- \rangle, b_{gm}^+, b_{gm}^- \in [0, 1]$, где компонент истинности b_{gm}^+ формируется свидетельствами, подтверждающими истинность суждения, а компонент b_{gm}^- – его отрицающими. Достоверность БСС определяется величиной $(b_{gm}^+ - b_{gm}^-) \in [-1, 1]$ [28], которой в привычном диапазоне изоморфна величина $(b_{gm}^+ - b_{gm}^- + 1)/2 \in [0, 1]$.

Так как для выделения каждого нормального подмножества измеряемых у объекта g свойств требуется отбросить в общем случае некоторую группу свойств $M^\bullet \subseteq M$, то в качестве основного подлежащего минимизации критерия «весомости» анализируемого нормального множества выступает *агрегированный показатель достоверности* (АПД) эмпирических оценок истинности БСС о принадлежности объекту g свойств из M^\bullet .

Вспомогательным критерием качества рассматриваемого нормального множества служит его мощность: при прочих равных условиях желательно уменьшить отклонение от эмпирического признакового описания объекта и, следовательно, сохранить в этом описании как можно больше свойств, эмпирические свидетельства о наличии которых признаны в исходной постановке задачи достаточными. Явно выраженная разница важности частных критериев оправдывает применение для многокритериальной оптимизации *лексикографического метода* [29].

В качестве АПД в ОАД принят вектор

$$\langle \max_{m \in M^\bullet} \{b_{gm}^+\}, \min_{m \in M^\bullet} \{b_{gm}^-\} \rangle, \quad (5)$$

который *неубывает* с ростом количества аргументов $|M^*|$. В конечном итоге именно эта монотонность определяет преимущество разработанного эвристического метода, т.к. обеспечивает возможность отсека неперспективных ветвей конечного дерева решений, формируемого для каждого набора связанных клик [22] в M , или, другими словами, для каждой связанной группы попарно несовместимых свойств объекта g .

Соответствие элементов задачи семантической идентификации объекта и задачи структурного синтеза ТР состоит в следующем:

- объект \leftrightarrow ТР;
- измеряемое свойство объекта \leftrightarrow отдельно взятый ВР некоторой ФСП проектируемого артефакта;
- нормальное подмножество свойств объекта \leftrightarrow допустимое ТР;
- оценка истинности БСС «объекту g присуще свойство m » $\langle b_{gm}^+, b_{gm}^- \rangle \leftrightarrow$ оценка эффекта включения в ТР отдельно взятого ВР $x \in V$ некоторой ФСП, которая на практике часто имеет векторный вид $\langle b_x^+, b_x^- \rangle$, где b_x^+ – выгода, а b_x^- – издержки решения о включении x в ТР [16]. Величины выгод и издержек можно нормировать после их выявления для всех ВР из V , поэтому $b_x^+, b_x^- \in [0, 1]$. В случае нормированной скалярной оценки b_x эффекта включения ВР x в ТР (например, в [16] такой эффект оценивается величиной $b_x = b_x^+ / b_x^-$) можно оперировать векторной оценкой $\langle b_x, 0 \rangle$;
- достоверность БСС \leftrightarrow абсолютный «выигрыш» $(b_x^+ - b_x^-) \in [-1, 1]$ от включения в ТР отдельно взятого ВР $x \in V$ некоторой ФСП, который аналогично достоверности БСС может быть трансформирован в «приведенный выигрыш» в диапазоне $[0, 1]$;
- АПД (5) \leftrightarrow аналогично вычисляемый критерий эффективности ТР. Физический смысл этого критерия состоит в указании верхней оценки приведенного выигрыша, «теряемого» (как плата за корректность решения) с каждым отдельно взятым ВР, исключенным из ТР.

Вспомогательный критерий качества нормального подмножества свойств объекта, используемый в задаче семантической идентификации объекта, в задаче структурного синтеза ТР не имеет смысла, т.к. каждое допустимое ТР, если таковое найдётся, есть множество ВР по одному для каждой ФСП, которое всегда имеет мощность $n = |W|$.

То, что при заданных ограничениях существования решение задачи синтеза ТР *может не существовать* отличает её от задачи семантической идентификации свойств объекта, решение которой всегда существует [4]. Содержательно это объясняется тем, что в первой задаче не допускается исключение из ТР всех ВР некоторой ФСП. Формально же отличие заключается лишь в том, считается ли *пустое* множество нормальным. Опционный запрет квалифицировать пустое множество как нормальное делает метод семантической идентификации объекта более гибким и пригодным для решения задачи структурного синтеза ТР.

Рисунок 8 иллюстрирует решение задачи синтеза ТР на примере холодильной машины. Слева представлены ВР ФСП и ограничения существования: «линейная» форма морфологической таблицы 1 устанавливает несовместимость ВР каждой ФСП, а дуга и ребра описывают ограниченную сочетаемость ВР разных ФСП. В средней части рисунка 8 приведены нормированные значения выгод и издержек, связанных с включением в ТР отдельных ВР ФСП (в процентах), справа демонстрируются ВР ФСП – компоненты ТР, найденного методом семантической идентификации объекта при запрете считать пустое множество нормальным.

Заключение

В работе применительно к задаче структурного анализа и синтеза технических решений показана пригодность и преимущества использования фундаментальной модели, применяе-

мой в онтологическом инжиниринге и известной как «ограничения существования», для описания морфологического пространства всех возможных вариантов реализации функционально-структурных подсистем у проектируемого артефакта.

Предложенная с использованием ограничений существования теоретико-множественная модель морфологического пространства позволила объяснить широкое распространение и корректность подхода к описанию ограниченной сочетаемости вариантов реализации функционально-структурных подсистем артефакта на основе запретов, а также построить «скелет» онтологии предметной области морфологического анализа.

Установлено, что совместно модель ограничений существования и метод семантической идентификации объектов, разработанный как внутренняя процедура онтологического анализа данных, способны обеспечить эффективную методологическую поддержку морфологического анализа и синтеза технических решений.

Исследование потенциала применения моделей и методов онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений показало возможность определенного обобщения метода семантической идентификации объекта и позволило увидеть связь этого метода с классическими задачами теории графов.



Рисунок 8 – Пример решения задачи синтеза облика артефакта, полученного методом семантической идентификации объекта на основе учета ограниченной сочетаемости вариантов реализации функционально-структурных подсистем в форме ограничений существования

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Самойлов Д.Е., Семенова В.А., Смирнов С.В.** Анализ неполных данных в задачах построения формальных онтологий // Онтология проектирования. 2016. Т. 6, №3(21). С. 317-339. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-317-339.
- [2] **Загоруйко Н.Г.** Когнитивный анализ данных. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2013. 186 с.
- [3] **Барсегян А.А., Куприянов М.С., Холод И.И., Тесс М.Д., Елизаров С.И.** Анализ данных и процессов. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.
- [4] **Смирнов С.В.** О семантической идентификации объекта по эмпирическим данным // Знания – Онтологии – Теории: Материалы Всероссийской конф. с международным участием (2-6 октября 2017 г., Новосибирск, Россия). Т. 2. Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2017. С. 125-133.
- [5] **Seменова V., Smirnov S.** Revealing attributes of an object based on incomplete and inconsistent empirical data // VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology ITNT-2022 (May 23-27, 2022, Samara, Russia). IEEE Xplore. 2022. P. 1-5. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848601.
- [6] **Lammari N., Metals E.** Building and maintaining ontologies: a set of algorithms // Data & Knowledge Engineering. 2004. Vol. 48(2). P. 155-176.
- [7] **Пронина В.А., Шипилина Л.Б.** Использование отношений между атрибутами для построения онтологии предметной области // Проблемы управления. 2009. №1. С. 27-32.
- [8] **Смирнов С.В.** Онтологический анализ экспертных данных в задаче формирования нечетких когнитивных карт // Труды ИСА РАН. 2019. Т.69. Вып. 4. С. 79-86. DOI: 10.14357/20790279190410.
- [9] **Божко А.Н., Толпаров А.Ч.** Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. №5. <http://technomag.edu.ru/doc/44191.html>
- [10] **Гаврилова Т. А., Кудряцев Д. В., Муромцев Д. И.** Инженерия знаний. Модели и методы. СПб.: Лань, 2016. 324 с.
- [11] **Zwicky F.** Discovery Invention, Research Through the Morphological Approach. McMillan, 1969. 276 p.
- [12] **Одрин В.М.** Метод морфологического анализа технических систем. М.: ВНИИПИ, 1989. 312 с.
- [13] **Закревский А.Д.** Алгоритмы синтеза дискретных автоматов. М.: Наука, 1971. 512 с.
- [14] **Половинкин А.И.** Основы инженерного творчества. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.
- [15] **Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н.** Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2000. 368 с.
- [16] **Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н.** Наука и искусство принятия решений. Кн. 3: Подходы к решению задач коллективного выбора. Методы генерации решений. М.: Ленанд, 2021. 248 с.
- [17] **Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н.** Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. М.: Наука, 1986. 296 с.
- [18] **Каазик Ю.А.** Математический словарь. М.: Физматлит, 2007. 334 с.
- [19] **Райнишке К., Ушаков И.А.** Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
- [20] **Люгер Дж.Ф.** Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. М.: Вильямс, 2003. 864 с.
- [21] **Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С.** Основы автоматизированного проектирования самолетов. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
- [22] **Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И.** Лекции по теории графов. М.: Наука, Физматлит, 1990. 384 с.
- [23] **Закревский А.Д.** Логика распознавания. Мн.: Наука и техника, 1988. 118 с.
- [24] **Закревский А.Д., Поттосин Ю.В., Черемисинова Л.Д.** Логические основы проектирования дискретных устройств. М.: Физматлит, 2007. 592 с.
- [25] **Семенова В.А., Смирнов С.В.** Алгоритмизация формирования и прагматической трансформации ограниченный существования свойств предметной области // Онтология проектирования. 2020. Т. 10, №3(37). - С. 361-379. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-361-379.
- [26] **Смирнов С.В., Семенова В.А.** Эффективность редукции ограничений существования свойств в задаче идентификации признаков объекта // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. №2(30). С. 5-13. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.001.
- [27] **Клейнберг Дж., Тардос Е.** Алгоритмы: разработка и применение. Классика Computers Science. - СПб.: Питер, 2016. 800 с.
- [28] **Аршинский Л.В.** Векторные логики: основания, концепции, модели. Иркутск: Иркутский гос. ун-т, 2007. 228 с.
- [29] **Лотов А.В., Поспелова И.И.** Многокритериальные задачи принятия решений. М.: МАКС Пресс, 2008. 197 с.

Сведения об авторах

Семенова Валентина Андреевна, 1994 г. рождения. Бакалавр прикладной математики и информатики (Самарский государственный аэрокосмический университет, 2015), магистр механики и математического моделирования (Самарский университет, 2017), аспирант информатики и вычислительной техники (Самарский государственный технический университет, 2022). Младший научный сотрудник Института проблем управления сложными системами Самарского федерального исследовательского центра РАН. Автор и соавтор 27 научных трудов в области интеллектуального анализа данных и проектирования программных систем. ORCID: 0000-0002-0557-3890; Author ID (Scopus): 57204366624. queenbfjr@gmail.com ✉



Смирнов Сергей Викторович, 1952 г. рождения. Выпускник Куйбышевского авиационного института (1975), д.т.н. (2002). Главный научный сотрудник Института проблем управления сложными системами Самарского федерального исследовательского центра РАН, профессор Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Член РАИИ, ИАОА. В списке научных трудов более 200 работ в области прикладной математики, компьютерного моделирования, создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений. ORCID: 0000-0002-3332-5261; Author ID (РИНЦ): 17628; Author ID (Scopus): 57205017287. smirnov@iccs.ru

Поступила в редакцию 05.10.2023, после рецензирования 28.11.2023. Принята к публикации 01.12.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-531-547

Models and methods of ontological data analysis in the problem of structural analysis and synthesis of technical decisions

© 2023, V.A. Semenova ✉, S.V. Smirnov

*Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Science,
Institute for the Control of Complex Systems of the Russian Academy of Science, Samara, Russia*

Abstract

The article explores the potential and demonstrates the effectiveness of using some models and methods of ontological data analysis in the problem of structural analysis and synthesis of technical decisions. Morphological analysis and synthesis of layout diagrams of artifacts are considered as a working methodology for structural design. A set-theoretic model of the morphological decision space is constructed for the classical version of the methodology. The model includes the functional subsystems of the designed artifact, implementation options for these subsystems, and potential technical decisions themselves. Moreover, in contrast to existing versions of such formalization, the emphasis is on the description of binary relationships between the entities of the knowledge domain of morphological analysis. It is proposed to describe the incompatibility of implementation options for a single functional subsystem of a designed artifact and the restricted compatibility of implementation options for various functional subsystems within the framework of a single model, known in ontological engineering and, in particular in ontological data analysis as “existence constraints”. Analysis of one of the regularities inherent in this model made it possible to strictly substantiate the approach common in structural design to describing the restricted compatibility of implementation options for various functional subsystems in the form of prohibitions. The advantages of using existence constraints to describe the morphological decision space are shown, and the frame of a formal ontology for the knowledge domain of morphological analysis is constructed. The structural synthesis of a technical decision is compared with the method of semantic identification of an object, developed within the framework of ontological data analysis for processing incomplete and inconsistent empirical information about the results of measuring object properties. A conclusion is made about the suitability of the latter for solving the problem of structural synthesis when correcting the concept of a “normal” subset of properties and information about the costs and/or benefits of including each individual implementation option for the functional subsystems of the designed artifact.

Key words: ontological data analysis, semantic identification of an object, analysis and synthesis of technical decisions, morphological space, existence constraints, combinatorial optimization.

For citation: Semenova VA, Smirnov SV. Models and methods of ontological data analysis in the problem of structural analysis and synthesis of technical decisions [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 531-547. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-531-547.

Financial Support: The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research theme code FMRW-2022-0030.

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

List of figures and tables

- Figure 1 - Tabular description of the morphological decision space
- Figure 2 - Multi-level morphological model of a refrigeration device in the form of an AND/OR graph detailing the relationships between the elements of the morphological space (see Table 1; here: 5.A, 5.B, 5.B – tubular, plate and finned implementations of the evaporator, respectively; 5.*.1 – material suitable for the manufacture of evaporator “*”; 5.*.1.1 – copper; 5.*.1.2 – steel)
- Figure 3 - Two versions of a multi-level morphological model of a refrigeration machine with restricted compatibility of options for implementing its various functional and structural subsystems
- Figure 4 - An example of existential dependencies between implementation options x, y, z of the functional subsystems of the designed artifact (self-conditionality of x, y, z is omitted)
- Figure 5 - Morphological model of aircraft layout features (according to [21]; decoding of original abbreviations and digital feature codes is presented in Table 2); ● - signs of the layout of the F-15A fighter (see Figure 6)
- Figure 6 - F-15A Eagle fighter layout (McDonnell-Douglas Aircraft Co., USA)
- Figure 7 - Entity-relationship ontology diagram of knowledge domain of morphological analysis of technical solutions: A – the concept of objects, the existence of which can both condition the existence and be conditioned by the existence of other similar objects; $\text{---} \cdot \text{---}$ – arc of the relationship “technical decision includes implementation option for functional subsystem”; $\text{---} \rightarrow$ – the arc of the relationship “generalizes” between entities; for legends of other relations, see Figure 2
- Figure 8 - An example of solving the problem of synthesizing the appearance of an artifact obtained by the method of semantic identification of an object based on a description of the morphological space for choosing decisions and taking into account the restricted compatibility of options for implementing functional subsystems in the form of existence constraints
- Table 1 - Morphological space of refrigeration device layouts
- Table 2 - Aircraft layout features according to [21]

References

- [1] **Samoilov DE, Semenova VA, Smirnov SV.** Incomplete data analysis of for building formal ontologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(3): 317-339. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-317-339.
- [2] **Zagoruyko NG.** Cognitive data analysis [In Russian]. Novosibirsk: Geo publ.; 2013. 186 p.
- [3] **Barsegyan AA, Kupriyanov MS, Holod II, Tess MD, Elizarov SI.** Data and Process Analysis [In Russian]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2009. 512 p.
- [4] **Smirnov SV.** On semantic identification of an object based on empirical data [In Russian]. In: Knowledge – Ontologies – Theories: Proc. of the all-Russian conf. with int. part. (October 2-6, 2017, Novosibirsk, Russia). T. 2. Novosibirsk: Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the RAS, 2017: 125-133.
- [5] **Semenova V, Smirnov S.** Revealing attributes of an object based on incomplete and inconsistent empirical data. In: Proc. VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology ITNT-2022 (May 23-27, 2022, Samara, Russia). IEEE Xplore. 2022: 1-5. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848601.
- [6] **Lammari N, Metais E.** Building and maintaining ontologies: a set of algorithms. *Data & Knowledge Engineering*. 2004; 48(2): 155-176.
- [7] **Pronina VA, Shipilina LB.** Using the relationships between attributes to build domain ontology [In Russian]. *Control Science*. 2009; 1: 27-32.
- [8] **Smirnov SV.** Ontological analysis of expert data in the problem of forming fuzzy cognitive maps [In Russian]. *Proc. of ISA RAS*. 2019; 69(4): 79-86. DOI: 10.14357/20790279190410.

- [9] **Bozhko AN, Tolparov ACh.** Structural synthesis on elements with restricted compatibility [In Russian]. Science and education: scientific publication of BMSTU. 2004; 5. <http://technomag.edu.ru/doc/44191.html>
- [10] **Gavrilova TA, Kudryavtsev DV, Muromtsev DI.** Knowledge Engineering. Models and methods [In Russian]. St. Petersburg: Lan publ.; 2016. 324 p.
- [11] **Zwicky F.** Discovery Invention, Research Through the Morphological Approach. McMillan; 1969. 276 p.
- [12] **Odrin VM.** Method of morphological analysis of technical systems [In Russian]. Moscow: VNIPI; 1989. 312 p.
- [13] **Zakrevsky AD.** Algorithms for the synthesis of discrete automata [In Russian]. Moscow: Science; 1971. 512 p.
- [14] **Polovinkin AI.** Fundamentals of engineering creativity [In Russian]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1988. 368 p.
- [15] **Andreichikov AV, Andreichikova ON.** Analysis, synthesis, planning decisions in economics [In Russian]. Moscow: Finance and Statistics publ., 2000. 368 p.
- [16] **Andreichikov AV, Andreichikova ON.** The Science and Art of Decision Making. V. 3: Approaches to solving collective choice problems. Methods for generating decisions [In Russian]. Moscow: Lenand publ.; 2021. 248 p.
- [17] **Dubov YuA, Travkin SI, Yakimets VN.** Multicriteria models for the formation and selection of system options [In Russian]. Moscow: Science publ.; 1986. 296 p.
- [18] **Kaazik YuA.** Mathematical dictionary [In Russian]. Moscow: Fizmatlit publ.; 2007. 334 p.
- [19] **Reinschke K, Ushakov IA.** Graphs using in systems reliability estimation [In Russian]. Moscow: Radio and Communication publ.; 1988. 208 p.
- [20] **Luger GF.** Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving, 6th Edition. Pearson Education publ.; 2011. 784 p.
- [21] **Eger SM, Liseyev NK, Samoilovich OS.** Basics of computer-aided aircraft design [In Russian]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1986. 232 p.
- [22] **Emelichev VA, Melnikov OI, Sarvanov VI, Tyshkevich RI.** Lectures on graph theory [In Russian]. Moscow: Science, Fizmatlit publ.; 1990. 384 p.
- [23] **Zakrevsky AD.** The logic of recognition [In Russian]. Minsk: Science and Technology publ.; 1988. 118 p.
- [24] **Zakrevsky AD, Pottosin YuV, Cheremisinova LD.** Logical foundations of discrete device design [In Russian]. Moscow: Fizmatlit publ.; 2007. 592 p.
- [25] **Semenova VA, Smirnov SV.** Algorithms for the formation and pragmatic transformation of Existence Constraints [In Russian]. Ontology of designing. 2020; 10(3): 361-379. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-361-379.
- [26] **Smirnov SV, Semenova VA.** Efficiency of properties existence constraints reduction in the problem of object attributive identification [In Russian]. Information and mathematical technologies in science and management. 2023; 2(30): 5-13. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.001.
- [27] **Kleinberg J, Tardos E.** Algorithm design. Pearson Education publ.; 2005. 864 p.
- [28] **Arshinsky LV.** Vector logics: foundations, concepts, models. [In Russian]. Irkutsk: Irkutsk State university publ.; 2007. 228 p.
- [29] **Lotov AV, Pospelova II.** Multicriteria decision-making problems. [In Russian]. Moscow: MAX Press; 2008. 197 p.

About the authors

Semenova Valentina Andreevna (b. 1994). Bachelor in Applied Mathematics and Computer Science (Samara State Aerospace University, 2015), master in Mechanics and Mathematical Modeling (Samara University, 2017), postgraduate student in Computer science and Engineering (Samara State Technical University, 2022). Junior researcher at Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences. Author and co-author of 27 scientific papers in the field of data mining and software engineering. ORCID: 0000-0002-0557-3890; Author ID (Scopus): 57204366624. queenbfjr@gmail.com ✉

Sergey Victorovich Smirnov (b. 1952) graduated from the Korolyov aerospace Institute (Kuibyshev-city) in 1975, D. Sc. Eng. (2002). Chief Researcher at Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, professor at Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics. Hi is member of Russian Association of Artificial Intelligence and International Association for Ontology and its Applications. His list of scientific works includes more than 200 publications in the field of applied mathematics, complex systems simulation and development knowledge based decision support systems in control and management. ORCID: 0000-0002-3332-5261; Author ID (RSCI): 17628; Author ID (Scopus): 57205017287; Researcher ID (WoS): AAB-2013-2021. smirnov@iccs.ru

Received October 5, 2023. Revised November 28, 2023. Accepted December 1, 2023.

ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

УДК 004.82:004.89

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561



Разработка онтологий для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем энергетики

© 2023, В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко ✉, Д.В. Соколов, Г.С. Майоров

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

Аннотация

Проектирование трубопроводных систем энергетики (тепло-, водо-, нефте-, газоснабжения и др.) представляет сложную задачу, требующую при её решении применения специализированного программного обеспечения. Предлагается использовать онтологии для структуризации знаний, которые применяются в процессах автоматизации разработки программного обеспечения, организации вычислительного процесса и информационного наполнения пользовательского интерфейса. Предложенный методологический подход включает следующие составляющие: состав онтологий, инструментальные средства реализации онтологий, методики построения онтологий (метаонтологии, онтологии конкретных классов, онтологии проектных задач, онтологии программного обеспечения). Показано, что применение онтологий позволяет получить следующие результаты: единую платформу для исследования и разработки новых методов, алгоритмов, математических моделей трубопроводных систем и их элементов; возможность автоматизации доступа к данным для разных типов систем и решаемых задач; автоматизированное построение программной системы. Представлен пример применения онтологий при разработке программного обеспечения. Приведена архитектура программной системы для решения задач проектирования трубопроводных систем различных типов и назначений.

Ключевые слова: онтологии, энергетика, автоматизация, программное обеспечение, трубопроводные системы, проектирование.

Цитирование: Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С. Разработка онтологий для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем энергетики // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №4(50). С.548-561. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561.

Финансирование: исследование выполнено в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-01611).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В настоящее время трубопроводные системы (ТПС) энергетики (тепло-, водо-, нефте-, газоснабжения и др.) представляют собой инженерные сооружения, отличающиеся большими размерами и сложностью. В работах [1, 2] заложены основы теории гидравлических цепей (ТГЦ). Один из основных принципов ТГЦ заключается в том, что разрабатываемые методы и алгоритмы должны допускать применение их для расчёта ТПС различных типов и назначений. Возможность создания таких методов и алгоритмов обусловлена общностью топологических свойств ТПС и законами сохранения массы и энергии. Объектом исследования ТГЦ в основном являются следующие типы ТПС: централизованные теплоснабжающие си-

стемы (ТСС), системы холодоснабжения, системы водоснабжения, системы газоснабжения, системы нефтеснабжения.

Сети, как объект исследования, характеризуются большим количеством трубопроводов, источников, активных элементов (насосов, регуляторов давления и расхода) и разнородных потребителей. Для проектирования сетей необходимо использовать математические модели (ММ), методы и алгоритмы оптимизации, позволяющие находить технологически и экономически обоснованные решения, средства информационной поддержки процессов принятия решений, специализированное программное обеспечение (ПО).

В ИСЭМ СО РАН разрабатываются методические подходы к построению ПО для компьютерного моделирования ТПС. Применение ПО в процессе проектирования требует высокой гибкости его построения, что обусловлено необходимостью моделирования широкого набора оборудования, а также методов и алгоритмов, настраиваемых на конкретную задачу. Знания о различных типах ТПС необходимо сохранить в форме, пригодной для многократного использования при автоматизации построения ПО и управлении вычислительным процессом при решении проектных задач. Для этого необходимо организовать хранение знаний в виде онтологий. В настоящей статье излагается новый подход к построению системы онтологий и приведено описание его составляющих, представлена архитектура программной системы для решения задач проектирования ТПС различных типов и назначений.

1 Постановка задачи

ТПЦ является базой для решения задач проектирования ТПС. В данном исследовании модель ТПС – это иерархически построенный объект, в котором какая-либо подсистема на одном уровне рассматривается как совокупность связанных элементов, а на более высоком уровне – как единый элемент с агрегированными характеристиками. Для решения задач проектирования ТПС применяется специализированное математическое и ПО. Математическое обеспечение включает математические постановки задач проектирования, модели элементов ТПС, методы и алгоритмы. ПО включает программные компоненты, которые реализуют методики проектирования ТПС, модели элементов ТПС, а также решатели – готовые программные разработки, предназначенные для решения конкретных классов задач.

Проектирование осуществляется на основе интеграции представленных на рисунке 1 составляющих в рамках единого процесса моделирования ТПС. Вследствие различия ТПС и их подсистем возникает необходимость автоматизации организации вычислительного процесса для достижения необходимой гибкости в адаптации на особенности конкретной ТПС.

Построение ПО, предназначенного для моделирования ТПС, является завершающим этапом разработки методов, ММ, методик и алгоритмов. Применение этого ПО при решении научно-исследовательских и практических задач приводит к накоплению опыта, который позволяет разрабатывать более точные ММ, уточнять справочную информацию, повышать быстродействие алгоритмов, улучшать сходимость методов, получать оригинальные решения задач. Накопленный опыт фиксируется путём внесения изменений в ПО, что повышает его качество и соответствие реальным инженерным системам. В результате ПО становится единственным средством формализации и хранения накопленного опыта, который недоступен для изучения и использования широкому кругу специалистов.

Описание методических и программных разработок необходимо выполнить в форме, пригодной для многократного использования. Для этого необходимо перейти к парадигмам разработки ПО, которые позволят однажды формализованные знания использовать многократно. Авторами предложено выполнить формальное описание знаний о предметной области

(ПрО) в виде онтологий, что позволит многократно их использовать при построения прикладного ПО.

Сформулирована новая задача разработки подхода к построению системы онтологий, который объединит в онтологическом пространстве описание методического и ПО, используемых для автоматизации построения ПО и решения комплекса задач проектирования ТПС.

Применение онтологий обеспечит получение следующих результатов:

- структуризация задач проектирования ТПС различных типов и назначений, создание единого универсального описания ПрО;
- возможность использования знаний, как активного ресурса при автоматизации построения ПО;
- обеспечение разработки единой платформы для исследования и разработки новых методов, методик, алгоритмов, ММ ТПС и их элементов;
- обеспечение универсальности интерфейсов программной реализации методов, алгоритмов и моделей элементов ТПС, упрощение поддержки этих программных компонентов;
- возможность автоматизации доступа к данным для разных типов ТПС и решаемых задач;
- автоматизированное построение программной системы;
- информационное наполнение пользовательского интерфейса.



Рисунок 1 – Составляющие моделирования ТПС

2 Обзор литературы

В настоящее время онтологии находят применение в энергетике для описания сложных объектов. В работе [3] рассматривается идея разработки онтологии открытой энергетики для анализа энергетических систем. Исследование в [4] посвящено разработке онтологии, которая содержит описание объектов, относящихся к структурам энергетических сетей и цепочкам спроса и предложения. Предлагаемая онтология описывается с использованием синтаксиса дискрипционной логики, а для её реализации используется язык *OWL2*. Основным результатом работы [5] является разработка онтологии, которая объединяет основные концепции, необходимые для интерпретации всей доступной информации, связанной с рынками электроэнергии. Особенности применения онтологии как основы для формирования информационных моделей в составе цифровых двойников объектов управления интеллектуальной распределённой энергетике представлены в работе [6]. Онтологическое моделирование при управлении децентрализованными данными в интеллектуальных энергетических системах

рассмотрено в статье [7]. Статья [8] описан фрактальный подход к структурированию знаний, активно используемый для разработки онтологического пространства знаний в области энергетики. В статье [9] представлены онтологии, отражающие основные понятия ситуационного управления, включая ситуационный анализ и ситуационное моделирование, а также вариант онтологии ситуации, рассмотренной с позиции исследования проблемы энергетической безопасности.

В обзоре [10] обсуждаются вопросы проектирования ПО под управлением онтологий. Показано, что в настоящее время направления исследований и разработок смещаются из области технологий программирования в сторону моделирования процессов проектирования ПО.

В программной инженерии активно развиваются концепции, в которых модели ПрО рассматриваются как информационные ресурсы, позволяющие автоматически создавать и развивать программные системы (*Model-Driven Engineering, MDE*) [11]. В статье [12] представлен детальный обзор *MDE*, в котором даны определения модели, метамодели, языка моделирования, программной платформы и программного продукта. Предметно-ориентированные языки (*Domain-Specific Language, DSL*) позволяют создавать детальные описания ПрО, которые можно использовать при автоматизации этапов построения ПО [13, 14]. В методологии программной инженерии (*Ontology Driven Software Engineering, ODSE*) [15, 16] онтология используется на каждом этапе разработки ПО. Использование онтологий на разных этапах отличается по полезности и простоте. В работе [17] показана возможность комплексного использования онтологий. Использование онтологий на всех этапах разработки ПО даёт стратегическое преимущество в расширении обмена и поиске знаний.

В работе [18] предлагается подход к построению ПО для проектирования ТСС на основе концепции *MDE*. Используются технологии метапрограммирования и знания о ПрО в виде онтологий. Приведено описание программного комплекса СОСНА, разработанного на базе изложенного подхода. Программная система строится в автоматизированном режиме с использованием знаний из онтологической системы на основе программных компонентов, реализующих методы и элементы моделируемой ТСС.

3 Подход к построению онтологий

Предложенная схема процесса автоматизированного построения ПО и проведения вычислений при решении задачи проектирования ТПС показана на рисунке 2.

Иерархическая модель ТПС, описание решаемой проектной задачи и программные компоненты, реализующие методы и модели, интегрируются в контексте моделирования конкретной ТПС. Для автоматизации интеграции модели ТПС используется описание класса моделируемой ТПС из соответствующей этому классу онтологии ТПС. Используемое описание позволяет определить: из каких типовых элементов состоит ТПС данного класса, какими параметрами они обладают, из какого оборудования они строятся. Описание задачи из онтологии задач позволяет определить: какую методику необходимо использовать для решения задачи проектирования, какие методы используются в процессе решения. Описание программных компонентов из онтологии ПО позволяет определить: какие программные компоненты будут использоваться, с помощью каких технологий они реализованы, как обеспечить доступ к этим компонентам. Концепция *MDE* позволяет выполнить реализацию предлагаемого решения при автоматизации построения ПО для проектирования ТПС.

Предложенный подход включает в себя следующие составляющие:

- состав онтологий;
- инструментальные средства реализации онтологий;
- методику построения метаонтологии;
- методику построения онтологий ТПС конкретных классов;
- методику построения онтологий задач;
- методику построения онтологий ПО.

В состав онтологий входят следующие: метаонтология, онтологии ТПС конкретных классов, онтологии проектных задач и онтологии ПО.

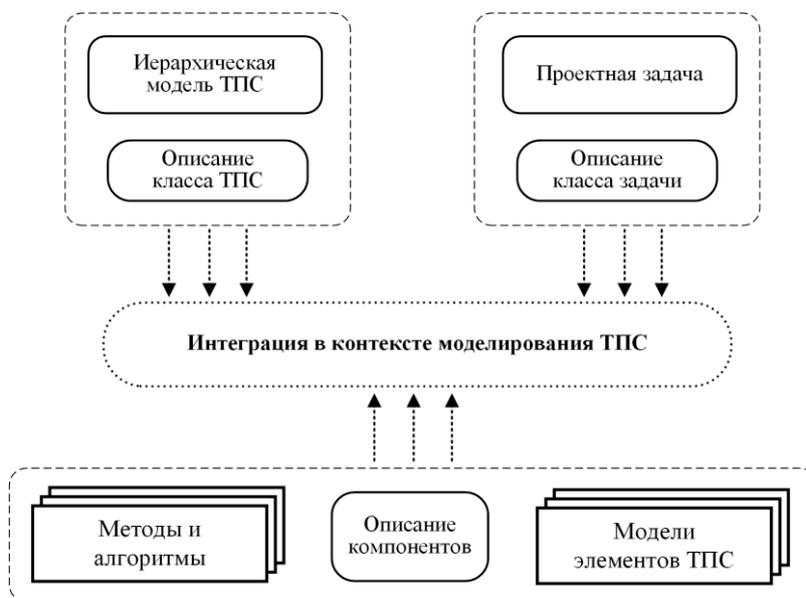


Рисунок 2 – Схема процесса автоматизированного построения ПО

Метаонтология вводит

единое пространство для создания языка описания прикладных онтологий и содержит описание иерархической структуры построения ТПС.

Онтологии ТПС конкретных классов включают следующие составляющие: описание отдельных классов ТПС (тепло-, газо-, водоснабжения и т.д.), классификацию используемого оборудования и его технические характеристики, описание подсистем и элементов ТПС и их свойств (технических характеристик, рабочих параметров и граничных условий), классификацию и описание используемых ММ (например, уравнения, описывающие законы падения напора на ветвях сети, формулы расчёта сопротивлений и др.).

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

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

- программных компонентов, реализующих методики, методы и алгоритмы;
- программных компонентов, реализующих модели элементов ТПС;
- программных компонентов, предназначенных для решения конкретных классов задач;
- технологий и интерфейсов доступа к программным компонентам.

Система онтологий реализуется на базе предметно-ориентированного языка, что в соответствии с предлагаемым подходом позволяет автоматизировать процесс программирования при построении ПО, организации вычислительного процесса и информационного наполнения пользовательского интерфейса.

Методика построения метаонтологии включает следующие этапы.

- 1) вводится понятие «Тип данных» и определяются конкретные используемые при моделировании ТПС типы данных.

- 2) определяются базовые для ТПС классы «Трубопроводная система», которая состоит из «Элементов», обладающих «Атрибутами».
- 3) вводятся определения классов «Узлы» и «Ветви», на которые подразделяются «Элементы» ТПС.
- 4) вводится определение класса «Параметр», который в ТГЦ соответствует «Атрибуту».
- 5) вводится определение класса «Иерархическая модель» ТПС, которая отражает «Структурную конфигурацию» и может быть «Древовидной» или «Кольцевой». «Иерархическая модель» описывает набор «Элементов» конкретной моделируемой ТПС.
- 6) вводится определение класса «Проектная задача», обладающего «Входными данными» и «Выходными данными», которые включают в себя «Параметры» элементов моделируемой ТПС.
- 7) вводится определение класса «Модель», реализующего один из «Элементов» ТПС.
- 8) вводится определение класса «Метод».
- 9) вводится определение класса «Методика», которая решает «Проектную задачу» и использует «Метод».
- 10) вводится определение класса «Программный компонент», который может реализовать один из следующих классов: «Методик», «Метод» или «Модель» элемента ТПС.

В соответствии с предложенной методикой вводятся базовые понятия ПрО (см. рисунок 3). Концепт «Трубопроводная система» состоит из «Элементов», обладающих «Атрибутами», которые в ТГЦ называются «Параметрами». Для автоматизации работы с параметрами вводится описание их «Типов данных», включающих «Целые числа», «Числа с плавающей точкой», «Текстовые данные» и др. Решаемая «Проектная задача» имеет «Входные данные» и «Выходные данные», включающие «Параметры» элементов моделируемой системы. Для решения «Проектной задачи» используется «Методика», реализованная в «Программном компоненте».

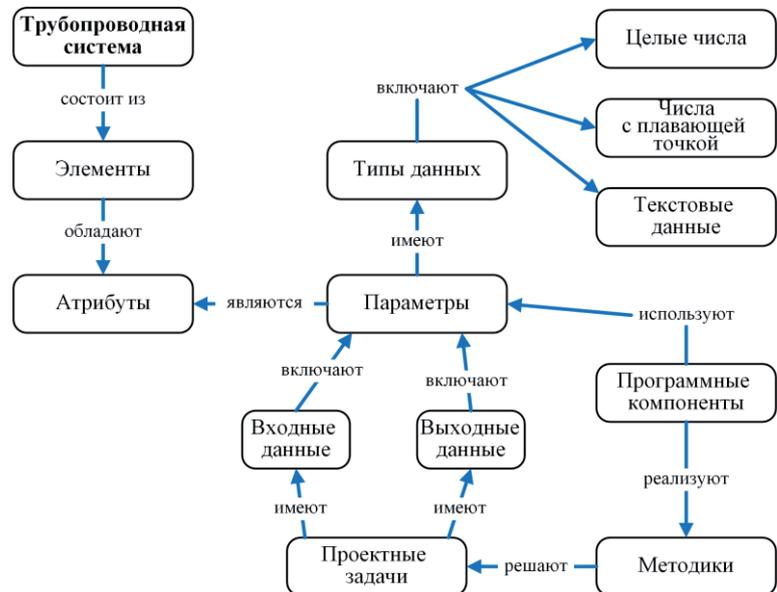


Рисунок 3 – Базовые понятия предметной области

«Трубопроводная система» состоит из «Элементов», которые подразделяются на «Узлы» и «Ветви» (см. рисунок 4). «Трубопроводная система» представляется «Иерархической моделью», отражающей «Структурную конфигурацию», которая может быть «Древовидной» или «Кольцевой». «Программные компоненты» включают программные реализации «Моделей», соответствующих «Элементам», и «Методов», используемых «Методиками». «Проектные задачи» учитывают «Структурную конфигурацию».

Методика построения онтологии ТПС конкретного типа включает следующие этапы.

- 1) вводится определение класса с названием, соответствующим конкретному типу ТПС.
- 2) вводятся определения классов, соответствующих составу «Узлов» для описываемого типа ТПС.

- 3) вводятся определения классов, соответствующих составу «Ветвей» для описываемого типа ТПС.
- 4) для каждого из классов, определённых на этапах 2 и 3, определяются его «Параметры», для которых указываются «Название», «Тип данных», «Ограничения».
- 5) для каждого из классов, определённых на этапах 2 и 3, определяется «Перечень оборудования», используемого при построении определяемого типа ТПС, и описываются его «Характеристики».

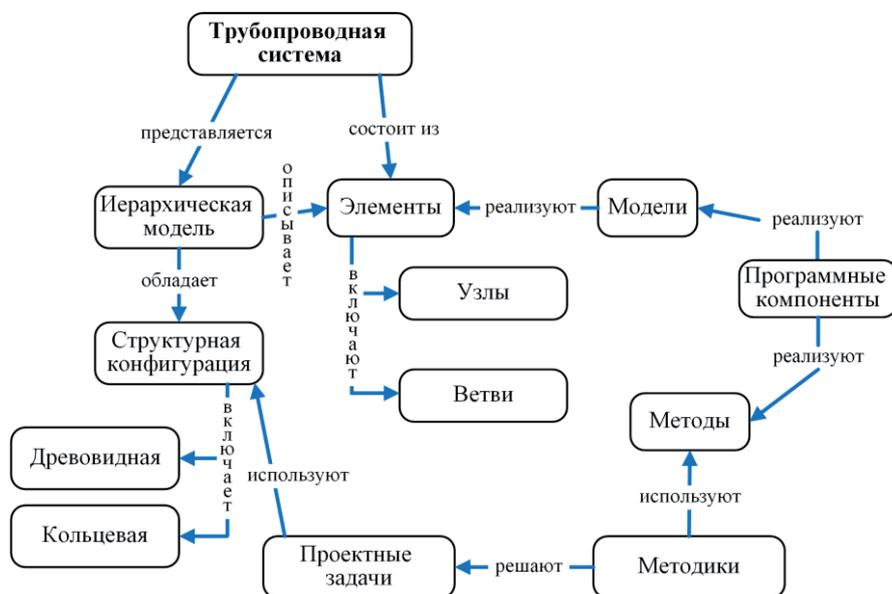


Рисунок 4 – Фрагмент метаонтологии теплоснабжающей системы

Методику построения онтологий ТПС конкретного типа можно показать на примере онтологии ТСС (см. рисунок 5). Эта онтология предназначена для описания построения иерархической модели ТСС и позволяет получить информацию о том, какие типы элементов образуют «Теплоснабжающую систему», какими «Параметрами» обладают «Элементы» и какие «Типы данных» соответствуют «Параметрам». Например, таким элементом является «Источник», обладающий «Напором», «Расходом» и «Геодезической высотой»; «Трубопроводный участок» является «Ветвью» и обладает такими параметрами, как «Потеря напора», «Расход» и «Диаметр».

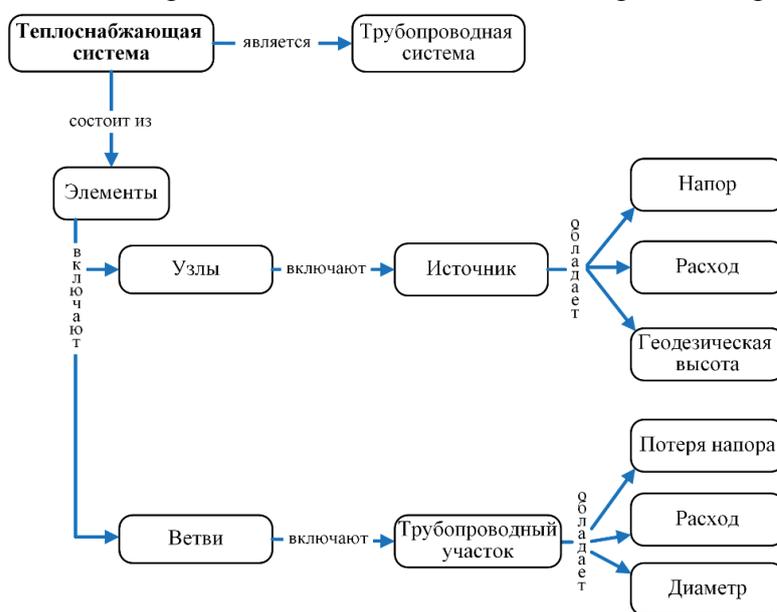


Рисунок 5 – Фрагмент онтологии теплоснабжающей системы

Методика построения онтологии проектных задач включает следующие этапы.

- 1) вводится определение класса задачи с соответствующим ей названием.
- 2) вводится описание «Входных данных» задачи с указанием «Параметров» и их принадлежности конкретным «Элементом» ТПС.

- 3) вводится описание «Выходных данных» задачи с указанием «Параметров» и их принадлежности конкретным «Элементом» ТПС.
- 4) вводятся определения классов, описывающих «Методики» решения определяемой задачи.
- 5) вводятся описания созданных на предыдущем этапе классов, описываются «Методы», используемые каждой из «Методик», и устанавливаются их «Условия применения».
- 6) выполнение этапов 1–5 повторяется, пока не будут определены все классы решаемых задач.

На рисунке 6 приведён фрагмент онтологии задач, который содержит описание задачи оптимизации диаметров трубопроводов ТПС. Вводится концепт задачи «Оптимизация диаметров». «Входными данными» для её решения является «Модель ТПС», а «Выходными данными» – «Диаметры трубопроводов». «Модель ТПС» отражает «Структурную конфигурацию», которая определяет «Метод решения» задачи.

Методика построения онтологии ПО включает следующие этапы.

- 1) вводятся определения классов, соответствующих «Программным компонентам», реализующим «Методики» решения «Проектных задач».
- 2) для каждого из определённых на предыдущем этапе классов описываются необходимые для использования соответствующего компонента характеристики: «Версия», «Технология доступа» и «Язык реализации».
- 3) вводятся определения классов, соответствующих «Программным компонентам», реализующим «Методы» решения «Проектных задач».
- 4) для каждого из определённых на предыдущем этапе классов описываются необходимые для использования соответствующего компонента характеристики: «Версия», «Технология доступа» и «Язык реализации».
- 5) реализуется иерархическое описание классов «Модели» ТПС. Для этого исходное множество реализаций «Моделей» разбивается на подмножества в соответствии с типом ТПС.
- 6) для каждого из полученных на предыдущем этапе подмножеств выполняется определение соответствующих им классов «Программных компонентов», для каждого из которых задаются «Формула», «Технология доступа» и «Язык реализации».

На рисунке 7 представлен фрагмент онтологии ПО, содержащий описание программных компонентов. «Программные компоненты» включают «Реализации моделей ТПС» и «Реализации методов». «Реализации моделей ТПС» включают реализацию моделей «Стальных трубопроводов». Модель «Стального трубопровода» обладает «Формулой», «Технологией доступа» и «Языком реализации». «Реализации методов» включают реализацию «Линейного

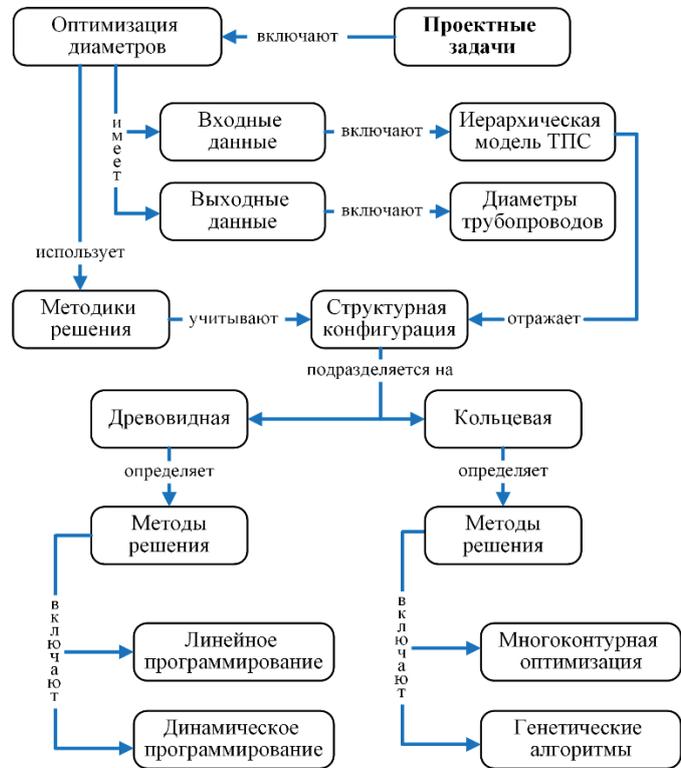


Рисунок 6 – Фрагмент онтологии задач

программирования» в виде компонента «*LpSolve*». Этот компонент обладает «Версией», «Технологией доступа» и «Языком реализации».

4 Практическое применение

Основными составляющими разрабатываемой программной платформы являются следующие: компоненты, управляющие работой других программных компонентов; компоненты, реализующие математические методы и алгоритмы; компоненты для доступа к базам данных; онтологии (метаонтология, онтологии конкретных типов ТПС, онтологии ПО, онтологии задач). *Java* является основным языком программирования для реализации платформы. Отдельные программные компоненты могут быть реализованы на языках *C/C++*, *Fortran*, *Python* и др. Для хранения онтологий используется предметно-ориентированный язык, разработанный на основе языка описания данных *XML*.

Предложенная для реализации программной платформы архитектура многопользовательской сетевой программной системы представлена на рисунке 8.

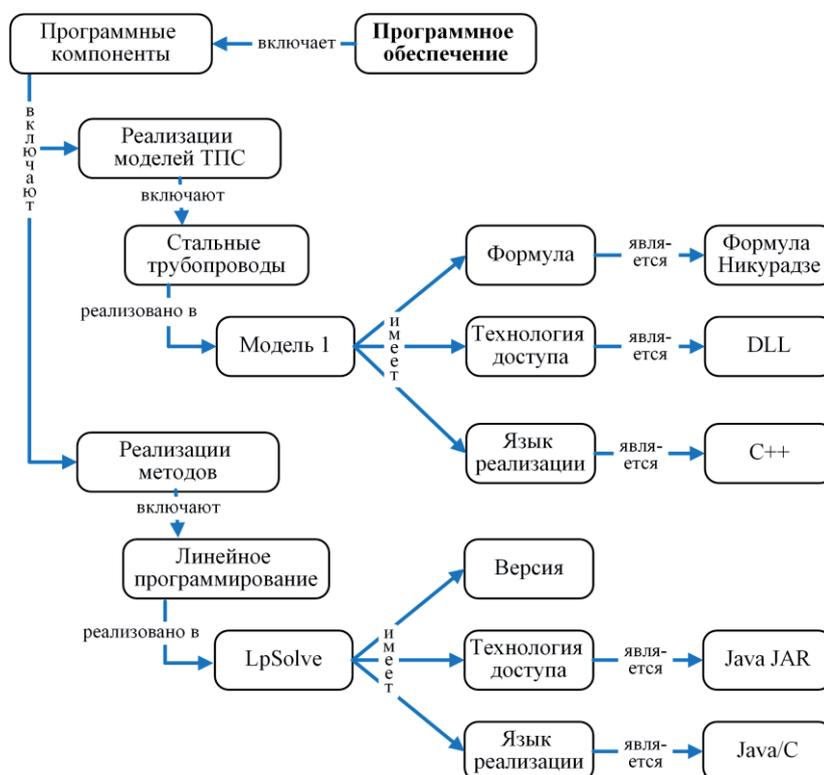


Рисунок 7 – Фрагмент онтологии программного обеспечения

Основные подсистемы разрабатываемой программной системы.

- *Графическая подсистема* обеспечивает создание компьютерной модели ТПС, отражающей структурную конфигурацию системы, исходные характеристики элементов, технические ограничения и проектные рекомендации по построению ТПС. Эта подсистема позволяет пользователю просматривать данные в удобном для восприятия виде и вносить необходимые изменения.
- *Подсистема хранения данных* обеспечивает организацию работы с различными базами данных, применяемыми для хранения и многократного использования компьютерных моделей ТПС, исходных данных и результатов расчётов.

- **Вычислительная подсистема**, которая строится на базе вычислительного ядра в автоматизированном режиме, обеспечивает решение прикладной задачи проектирования ТПС.

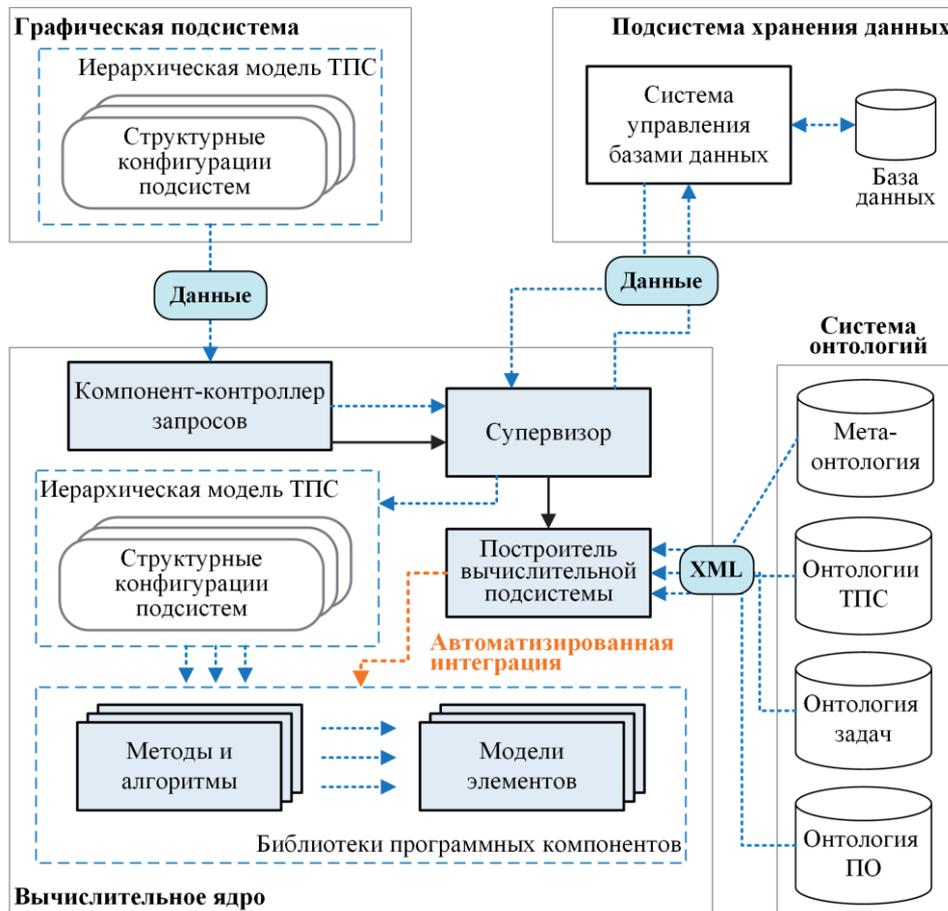


Рисунок 8 – Архитектура многопользовательской сетевой программной системы

Использование онтологий при решении конкретной проектной задачи рассмотрено на примере оптимизации диаметров трубопроводов ТСС. На основе онтологии ТСС автоматически определяется: из каких элементов состоит моделируемая система (см. рисунок 5); какие данные по её параметрам необходимо загрузить из базы данных. После загрузки данных автоматически строится иерархическая модель ТСС. По описанию решаемой задачи из онтологии задач определяется необходимая для использования методика. По описанию методики устанавливается связь между структурной конфигурацией ТСС и необходимым для решения задачи методом (см. рисунок 6). Далее загружается описание необходимых программных компонентов из онтологии ПО (см. рисунок 7), на основе которого определяются необходимые программные компоненты (реализации методики, методов и моделей элементов) и автоматически интегрируются в программную систему. После построения вычислительной подсистемы организуется вычислительный процесс решения прикладной задачи (см. рисунок 1).

Заключение

Построение и практическое применение онтологий позволяет автоматизировать разработку ПО и организацию вычислительных процессов, информационное наполнение пользо-

вательского интерфейса, обеспечить эффективную работу с иерархической моделью ТПС при решении задач проектирования ТПС. Предложен подход к построению онтологий для описания знаний о ТПС энергетики различных типов и назначений. Представлен пример применения онтологий при разработке ПО. Приведена архитектура программной системы, которая позволяет выполнять компьютерное моделирование ТПС энергетики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] *Хасилев В.Я.* Элементы теории гидравлических цепей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1964. №1. С.69-88.
- [2] *Меренков А.П., Хасилев В.Я.* Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 280 с.
- [3] *Booshehri M., Emele L., Flugel S., Forster H., Frey J., Frey U. et al.* Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis // Energy and AI, 2021. Vol. 5. 100074. DOI: 10.1016/j.egyai.2021.100074.
- [4] *Devanand A., Karmakar G., Krdzavac N., Rigo-Mariani R., Eddy Y.S., Karimi, I.A. Kraft M.* OntoPowSys: A Power System Ontology for Cross Domain Interactions in an Eco Industrial Park // Energy and AI, 2020. Vol. 1. 100008. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100008.
- [5] *Santos G., Pinto T., Vale Z., Praca I., Morais H.* Electricity markets ontology to support MASCEM's simulations // International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, Springer, 2016. P.393–404.
- [6] *Непша Ф.С., Андриевский А.А., Красильников М.И.* Онтология как основа для создания цифровых двойников объектов управления интеллектуальной распределённой энергетики // Автоматизация в промышленности. 2021. № 1. С.27–33. DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04.
- [7] *Wu J., Orlandi F., AlSkaif T., O'Sullivan D., Dev S.* Ontology Modeling for Decentralized Household Energy Systems // 2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Vaasa, Finland, 2021. P.1–6. DOI: 10.1109/SEST50973.2021.9543327.
- [8] *Массель Л.В.* Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // Онтология проектирования. 2016. Т.6, №2(20). С.149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
- [9] *Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И.* Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Онтология проектирования. 2017. Т.7, №1(23). С.66–76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
- [10] *Хорошевский В.Ф.* Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации // Онтология проектирования. 2019. Т.9, №4(34). С.429–448. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [11] *Parreiras F.S., Gröner G., Walter T., Friesen A., Rahmani T., Lemcke J., Schwarz H., Miksa K., Wende C., Afßmann U.* Model-Driven Software Development. Ontology-Driven Software Development. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-31226-7_2.
- [12] *Silva da A.R.* Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model // Comput. Lang. Syst. Struct., 2015. Vol. 43. P. 139–155. DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
- [13] *Fowler M., White T.* Domain-Specific Languages. Addison-Wesley Professional, Denver, 2010.
- [14] *Voelter M.* DSL Engineering: Designing, Implementing and using Domain-Specific Languages. Dslbook, 2013.
- [15] Ontology Driven Architectures and Potential Uses of the Semantic Web in Systems and Software Engineering. <https://www.w3.org/2001/sw/BestPractices/SE/ODA/060103/>.
- [16] *Pan J.Z., Staab S., Afßmann U., Ebert J., Zhao Y.* Ontology-Driven Software Development, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-31226-7.
- [17] *Gonzalez-Perez C.* How Ontologies Can Help in Software Engineering. Lecture Notes in Computer Science, 2017. Vol.10223. DOI: 10.1007/978-3-319-60074-1_2.
- [18] *Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В.* Применение онтологий при реализации концепции модельно-управляемой разработки программного обеспечения для проектирования теплоснабжающих систем // Онтология проектирования. 2014. № 4(14). С.54–68.

Сведения об авторах

Стенников Валерий Алексеевич, 1954 г. рождения, доктор технических наук (2002 г.), профессор. Академик РАН (2022 г.). Окончил Иркутский политехнический институт. Специалист в области теоретических основ, моделирования, расчёта, оптимизации, управления развитием и функционированием систем энергетики, автор более 250 научных работ, из них 14 монографий. Заслуженный деятель науки Российской Федерации (2011 г.). Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники (2016 г.). AuthorID (РИНЦ): 442880, Author ID (Scopus): 6508326526, ORCID: 0000-0001-6219-0354. sva@isem.irk.ru.



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

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



Майоров Глеб Сергеевич, 1994 г. рождения. Окончил Иркутский национальный исследовательский технический университет в 2018 г., м.н.с. ИСЭМ СО РАН. Область научных интересов: интегрированные энергетические системы и методы для решения задач их проектирования, мультиагентный подход и его применение. В списке научных трудов более 20 работ. Author ID (РИНЦ): 1001072; Author ID (Scopus): 57211071672; ORCID: 0000-0002-7405-1965. mayorovgs@isem.irk.ru.

Поступила в редакцию 13.11.2023, после рецензирования 24.11.2023. Принята к публикации 1.12.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561

Development of ontologies for automating computational processes in the energy pipeline system design

© 2023, V.A. Stennikov, E.A. Barakhtenko✉, D.V. Sokolov, G.S. Mayorov

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

Abstract

Designing pipeline energy systems (heat, water, oil, gas supply, etc.) is a complex task that requires the use of specialized software to solve it. It is proposed to use ontologies to structure knowledge that is used in the processes of software development automation and organization of the computing process and user interface content. The proposed methodological approach includes the following components: the composition of ontologies, tools for implementing ontologies, and the methods for constructing ontologies (metaontologies, ontologies of specific classes, ontologies of design tasks, software ontologies). It is shown that the use of ontologies allows one to obtain the following results: a single platform

for research and development of new methods, algorithms, mathematical models of pipeline systems and their elements; the ability to automate access to data for different types of systems and tasks; and automated software system construction. An example of ontology system application in software development is presented. The architecture of a software system for solving problems of designing pipeline systems of various types and purposes is given.

Keywords: *ontologies, energy, automation, software, pipeline systems, designing.*

For citation: *Stennikov VA, Barakhtenko EA, Sokolov DV, Mayorov GS.* Development of ontologies for automating computational processes in the energy pipeline system design [In Russian]. *Ontology of designing.* 2023; 13(4): 548-561. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561.

Financial Support: The research was performed at the Melentiev Energy Systems Institute of Siberia Branch of the Russian Academy of Sciences under the support of Russian Science Foundation (Grant number 22-29-01611).

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

List of figures

- Figure 1 - Components of the methodology for the energy pipeline system design
- Figure 2 - Illustration of the automated software development
- Figure 3 - Basic concepts of the subject area
- Figure 4 - Fragment of the metaontology of the heat supply system
- Figure 5 - Fragment of the ontology of the heat supply system
- Figure 6 - Fragment of the task ontology
- Figure 7 - Fragment of the software ontology
- Figure 8 - Architecture of a multi-user network software system

References

- [1] **Khasilev VYa.** Elements of the theory of hydraulic circuits [In Russian]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport.* 1964; 1: 69-88.
- [2] **Merenkov AP, Khasilev VYa.** Theory of hydraulic circuits [In Russian]. *Nauka*, 1985. 280 p.
- [3] **Booshehri M, Emele L, Flugel S, Forster H, Frey J, Frey U. et al.** Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis. *Energy and AI.* 2021; 5: 100074. DOI: 10.1016/j.egyai.2021.100074.
- [4] **Devanand A, Karmakar G, Krdzavac N, Rigo-Mariani R, Eddy YS, Karimi IA, Kraft M.** OntoPowSys: A Power System Ontology for Cross Domain Interactions in an Eco Industrial Park. *Energy and AI.* 2020; 1: 100008. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100008.
- [5] **Santos G, Pinto T, Vale Z, Praca I, Morais H.** Electricity markets ontology to support MASCEM's simulations. *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, Springer.* 2016. P.393–404.
- [6] **Nepsha FS, Andrievsky AA, Krasilnikov MI.** Ontology as a development framework for digital twins of control plants in intelligent distributed power generation [In Russian]. *Automation in industry.* 2021; 1: 27–33. DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04.
- [7] **Wu J, Orlandi F, AlSkaif T, O'Sullivan D, Dev S.** Ontology Modeling for Decentralized Household Energy Systems. *2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Vaasa, Finland.* 2021: 1–6. DOI: 10.1109/SEST50973.2021.9543327.
- [8] **Massel LV.** Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application [In Russian]. *Ontology of designing.* 2016; 6(2): 149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
- [9] **Massel LV, Vorozhtsova TN, Pjatkova NI.** Ontology engineering to support strategic decision-making in the energy sector [In Russian]. *Ontology of designing.* 2017; 7(1): 66–76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
- [10] **Khoroshevsky VF.** Ontology Driven Software Engineering: Models, Methods, Implementations [In Russian]. *Ontology of designing.* 2019; 9(4): 429–448. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [11] **Parreiras FS, Gröner G, Walter T, Friesen A, Rahmani T, Lemcke J, Schwarz H, Miksa K, Wende C, Aßmann U.** Model-Driven Software Development. *Ontology-Driven Software Development.* Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-31226-7_2.
- [12] **Silva da AR.** Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model. *Comput. Lang. Syst. Struct.* 2015; 43: 139–155. DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
- [13] **Fowler M, White T.** Domain-Specific Languages. Addison-Wesley Professional, Denver, 2010.

- [14] **Voelter M.** DSL Engineering: Designing, Implementing and using Domain-Specific Languages. Dslbook, 2013.
 - [15] Ontology Driven Architectures and Potential Uses of the Semantic Web in Systems and Software Engineering. <https://www.w3.org/2001/sw/BestPractices/SE/ODA/060103/>.
 - [16] **Pan JZ, Staab S, Afmann U, Ebert J, Zhao Y.** Ontology-Driven Software Development, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-31226-7.
 - [17] **Gonzalez-Perez C.** How Ontologies Can Help in Software Engineering. Lecture Notes in Computer Science. 2017; 10223. DOI: 10.1007/978-3-319-60074-1_2.
 - [18] **Stennikov VA, Barakhtenko EA, Sokolov DV.** Usage of ontologies in the implementation of the concept of model-driven engineering for the design of heat supply systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2014; 4(14): 54–68.
-

About the authors

Valery Alekseevich Stennikov (b. 1954), Doctor of Technical Sciences (2002), Professor. Academician of the Russian Academy of Sciences (2022). Graduated from the Irkutsk Polytechnic Institute. He is a specialist in the field of theoretical foundations, modelling, calculation, optimization, management of development and functioning of energy systems, author of more than 250 scientific papers, including 14 monographs. Honoured Scientist of the Russian Federation (2011). Laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation in the field of science and technology (2016). AuthorID (RSCI): 442880, Author ID (Scopus): 6508326526, ORCID: 0000-0001-6219-0354. sva@isem.irk.ru.

Evgeny Alekseevich Barakhtenko (b. 1982) graduated from the Irkutsk State Technical University in 2005, PhD (2011). He is a Senior Researcher at the Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation in the field of science and technology for young scientists (2016). His scientific interests include mathematical models and methods for expansion planning of energy pipeline systems and integrated energy systems, and digital design. Evgeny Barakhtenko is the author and a coauthor of more than 150 scientific papers. Author ID (RSCI): 670523; Author ID (Scopus): 55229371000; Researcher ID (WoS): Q-7173-2016. barakhtenko@isem.irk.ru. ✉.

Dmitry Vitalyevich Sokolov (b. 1984) graduated from the Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky (Irkutsk, Russia) in 2008, PhD (2013). Laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation in the field of science and technology for young scientists (2016). The list of scientific works includes more than 100 works in the field of development of algorithms for optimisation of pipeline systems and automation of programming. Author ID (RSCI): 710020; Author ID (Scopus): 57190607698; Researcher ID (WoS): K-6737-2018. sokolov_dv@isem.irk.ru.

Gleb Sergeevich Mayorov (b. 1994) graduated from the Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) in 2018, a junior researcher in MESI SB RAS. The research interests are integrated energy systems and methods for solving their design problems, multi-agent approach and its application. The list of scientific works includes more than 20 works. Author ID (RSCI): 1001072; Author ID (Scopus): 57211071672; ORCID: 0000-0002-7405-1965. mayorovgs@isem.irk.ru.

Received November 13, 2023. Revised November 24, 2023. Accepted December 1, 2023.



Комплексный подход к анализу аргументативных отношений в текстах научной коммуникации

© 2023, Е.А. Сидорова✉, И.Р. Ахмадеева, Ю.А. Загоруйко, И.С. Кононенко, А.С. Серый, П.М. Чагина, В.К. Шестаков

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация

Рассматривается задача автоматического анализа аргументации в текстах научной коммуникации. Под аргументацией понимается упорядоченная совокупность аргументов, используемых для подтверждения некоторого тезиса. Аргумент включает как минимум одну посылку и одно заключение, связанные аргументативным отношением. Цель работы – экспериментальное исследование нейросетевых подходов к решению задачи поиска и извлечения аргументативных отношений между утверждениями, расположенными близко в тексте. Исследование проводилось на корпусе текстов с аргументативной разметкой, созданной с помощью разработанной веб-платформы. Корпус включал тексты научных новостей, аналитические статьи с сайта Хабр, научные статьи и рецензии. На основе этих текстов построены наборы данных для машинного обучения. Для повышения качества обучения нейросетевых моделей эти наборы дополнены путём применения автоматических методов перефразирования и двойного перевода. Рассмотрено два подхода к обучению моделей: с маркированием индикаторов в текстах и с предварительным обучением языковой модели на задаче предсказания индикаторов. Для оценивания результатов работы моделей предложен подход на основе оценок согласия между экспертами, применяемый для сравнения разметок текстов, созданных вручную. Сравнение коэффициентов согласия между экспертами и обученными моделями показало, что порог качества для извлечения аргументативных связей достигнут на модели с маркированными индикаторами. Анализ ошибок модели проведён путём визуализации полученных результатов. Новизна работы заключается в применении комплексного подхода к созданию наборов данных, обучению моделей и оцениванию результатов, полученных при автоматическом извлечении аргументативных отношений.

Ключевые слова: аргументация, автоматический анализ, разметка текста, аргументативные отношения, индикатор аргументации, согласованность разметки, набор данных.

Цитирование: Сидорова Е.А., Ахмадеева И.Р., Загоруйко Ю.А., Кононенко И.С., Серый А.С., Чагина П.М., Шестаков В.К. Комплексный подход к анализу аргументативных отношений в текстах научной коммуникации // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №4(50). С.562-579. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-562-579.

Финансирование: Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-11-00261, <https://rscf.ru/project/23-11-00261/>.

Введение

Аргументация – это упорядоченная совокупность аргументов, используемых для подтверждения некоторого тезиса. С этой целью формулируются суждения, которые обосновывают главный тезис непосредственно или с помощью промежуточных шагов. Каждый шаг такого обоснования рассматривается как аргумент, а способы объяснения – как типовые схемы рассуждений.

Анализ аргументации – это междисциплинарная область исследований, посвященная разработке теории аргументации, построению формальных моделей аргумента, выявлению сценариев рассуждений, типовых доводов за или против какого-либо утверждения и т.п. Появление таких формализмов, как модель С. Тулмина [1], схемы аргументации Д. Уолтона [2]

и Х. Перельмана [3], периодическая таблица аргументов Ж. Вагеманса [4], формат представления аргументации [5] и построенная на его основе онтология аргументации [6] позволило развить прикладные исследования аргументации в области компьютерной лингвистики.

Интеллектуальный анализ аргументации *AM* (от англ. *Argument Mining*) – это направление исследований в области автоматической обработки текстов на естественном языке. Целью такого анализа является автоматическая идентификация и извлечение аргументативных структур из текста на естественном языке с помощью компьютерных программ [7]. К аргументативным структурам относятся: посылки, заключения, аргументы, отношения между компонентами аргументации, а также схемы рассуждений и типовые сценарии.

Модель аргументации влияет на выбор методов анализа аргументации, подготовку данных, оценку качества и на область применимости результатов анализа. Так, выбор простой модели, например модели абстрактной аргументации [8], не учитывающей структуры аргументов, существенно упрощает анализ, но сужает область применения результатов анализа, а выбор более сложной модели [1] не позволяет решить задачу извлечения аргументации, поскольку требуется привлечение средств семантического и прагматического анализа текста.

Известной моделью аргументации, используемой в практических системах анализа, является модель [9]. Эта модель позволяет описывать типовые модели рассуждений, используемые людьми, в виде схем аргументации, каждая из которых задаёт структуру одного аргумента. Около 60 схем аргументации приведено в [2], и список таких схем постоянно пополняется [10]. Важным достоинством модели [9] является наличие её формального описания в виде онтологии, что позволяет ускорить разработку программных компонент и использовать предшествующий опыт исследований.

Текст, коммуникативная задача которого не сводится только к информированию (объяснительный текст), несёт функцию убеждения аудитории в справедливости высказываемых в нём положений (аргументативный текст). Такими являются тексты, относящиеся к научной сфере общения, или функциональному стилю – Ф-стилю [11]. К научному Ф-стилю относятся научная и научно-популярная коммуникации. В данной работе к научно-популярной коммуникации отнесены новостные статьи (научные новости) и статьи с сайта *habr.com/ru* (*habr*-статьи). Целевой аудиторией таких текстов является широкая публика, которую автор текста считает необходимым убедить в истинности информации, изложенной в тексте. К научной коммуникации относятся научные статьи, рецензии и статьи с комментариями рецензента. Их целевая аудитория – это специалисты в научной области, к которой относится тематика текстов. Задача автора – убедить коллег в справедливости излагаемых им результатов научных исследований и/или высказать своё мнение.

При анализе аргументации, представленной в тексте на естественном языке, требуется не только извлекать аргументы и цепочки аргументов, подтверждающие или опровергающие некий тезис (абстрактная аргументация), но и исследовать структуру каждого аргумента, её роль и значимость для аргументации в целом (структурная аргументация). Таким образом, анализ аргументации направлен на автоматическое извлечение структурированных аргументов из неструктурированных текстов [7].

Задача анализа структурированной аргументации включает решение следующих подзадач, которые могут быть сформулированы как задачи классификации.

- Поиск утверждений – фрагментов текста, являющихся компонентами аргументации.
- Классификация утверждений в соответствии с набором ролей, используемых моделью представления аргументации.
- Поиск аргументативных связей между утверждениями, образующими аргументы.
- Классификация аргументов в соответствии с заданным набором классов.

Целью данной работы является экспериментальное исследование различных подходов на основе нейросетевых (НС) моделей к решению задачи поиска и выделения аргументативных отношений между утверждениями, расположенными на относительно небольшом расстоянии друг от друга. Эксперименты проводились на русскоязычных текстовых корпусах с аргументативной разметкой, созданных группой специалистов-филологов.

1 Обзор связанных работ

Модели глубокого обучения *DL* (от англ. *Deep Learning models*) являются одними из инструментов в компьютерной лингвистике. Результаты современных *DL*-моделей извлечения аргументативных отношений сравнимы с результатами других моделей (см., например, метод опорных векторов *SVM*, от англ. *Support Vector Machine*). В работе [12] показано, что, несмотря на превосходство в классификации аргументативных утверждений модели *BERT* (от англ. *Bidirectional Encoder Representations from Transformers*), она уступает в эффективности извлечения аргументативных связей. В [13] рассматривается задача нахождения отношений между компонентами аргументов в эссе, написанных на английском языке не носителями языка. Определяются связи между предложениями, и на их основе формируется древовидная структура аргументации в тексте при помощи последовательного применения языковой модели *BERT* и нейронной сети *BiLSTM* (от англ. *Bidirectional Long-Short Term Memory*).

В данном исследовании используется гипотеза о важности роли индикаторов аргументации при автоматическом обнаружении аргументативных отношений в тексте. Это связано с влиянием, которое оказывают различные дискурсивные маркеры в структуризации текста [14], и с положительным опытом применения индикаторов. Так, в [15] исследована роль индикаторов в аргументативном дискурсе на материале немецкого корпуса, аргументы в котором аннотированы в соответствии с общей моделью аргументации «утверждение-предположение». Для определения различий между индикаторами, предсказывающими наличие посылок и заключений, ранжирования индикаторов по характеристике прироста информации проведены эксперименты с целью изучения характера индикаторов для заключений и посылок, в частности тест Фишера [16]. Эксперименты показали, что определённые семантические группы индикаторов аргументации указывают либо на заключения, либо на посылки и представляют достаточно точные признаки для их различения.

В [17] предложен подход к классификации компонентов аргументов на уровне токенов-слов. Классификация на уровне токенов улучшила результаты классификации предложений по сравнению с современными моделями, такими как *Longformer*, *BERT* и *Legal-BERT*, и показала, что определённые токены, являющиеся индикаторами аргументации, оказывают значительное влияние на результаты.

В [18] рассматривается задача маскированного языкового моделирования *MLM* (от англ. *Masked Language Modeling*), для предсказания выбираются индикаторы аргументации (*Selective MLM*, *sMLM*), и модель обучается распознавать роли в аргументе различных фрагментов текста. Эксперименты показали, что модель *Longformer*, настроенная при помощи предложенного *sMLM* подхода, превосходит другие модели и для извлечения компонента аргументов, и для предсказания отношений.

Таким образом, можно заключить, что значимые результаты достигаются с применением различных НС-моделей, а улучшение результатов работы моделей достигается при уточнении сегментации и использовании дополнительных данных для обучения.

2 Подготовка данных

При решении задач анализа аргументации в работе принят НС-подход, в котором объём обучающих данных напрямую влияет на качество результатов. Основой для создаваемого набора данных послужили корпуса текстов, аннотированных специалистами на платформе *ArgNetBank Studio* (<https://uniserv.iis.nsk.su/arg>) [19].

2.1 Корпусы с аргументативной разметкой

Разметка текстов проводилась в соответствии с моделью и набором схем аргументации, созданных на её основе [2]. В данной модели, аргумент – это структура, связывающая набор посылок с заключением, а тип связи каждой посылки с аргументом определяется схемой аргументации. Разметка каждого текста заключалась в моделировании его аргументационной структуры согласно стандарту *AIF* (от англ. *Argument Interchange Format*) [5, 20] посредством построения ориентированного связного графа с двумя типами вершин: информационными, которые соответствуют утверждениям, и вершинами-отношениями, представляющими связи между утверждениями.

Для создания корпуса научной коммуникации отобраны тексты, относящиеся к следующим жанровым категориям:

- научно-популярная коммуникация: научные новости (30 текстов), *habr*-статьи (30 статей с комментариями);
- научная коммуникация: научные статьи (50 статей), научные рецензии (30 текстов), научные статьи с комментариями рецензентов (10 текстов).

Корпус обладает следующими особенностями:

- при сборе корпуса соблюдался принцип максимальной тематической нейтральности жанровых категорий;
- тексты каждой категории характеризуются собственными жанровыми особенностями: средний размер, наличие и расположение главного тезиса, длина связей, типовые индикаторы, соотношение конфликтных и поддерживающих отношений;
- количество конфликтных аргументов в корпусе невелико по сравнению с аргументами поддержки.

Размеченный корпус содержит 133 текста, аннотированные комментарии не учитывались. Создано 217 аннотаций и размечено 9783 аргумента. Под аннотацией здесь понимается разметка текста в виде графа аргументации, включающего множество утверждений и аргументативных связей (аргументов).

2.2 Построение наборов данных для машинного обучения

Для применения методов машинного обучения к задаче извлечения аргументативных связей необходимо:

- создать наборы данных, содержащих положительные и отрицательные примеры пар утверждений на основе имеющейся разметки текста;
- предложить дополнительные признаки, которые будут учитываться моделью при обучении и классификации;
- разработать механизм предварительного построения гипотез по заданному тексту, т.е. определить, каким образом поданный на вход текст будет разбиваться на утверждения, и какие пары утверждений будут проверяться моделью.

Для решения данных задач предложено несколько подходов.

Для сегментации текста использованы три метода разбиения: на предложения; на клаузы на основе индикаторов; на клаузы на основе синтаксического разбора предложения. Под

клаузой понимается простое предложение в составе сложного. Здесь, в связи с несовершенством программных реализаций, под клаузой понимаются фрагменты текста, выделенные автоматически на основе заданных формальных критериев – разделителей и найденных глагольных групп. Каждый такой фрагмент рассматривается в качестве гипотетического утверждения. Так, при сегментации на основе индикаторов каждый индикатор, найденный в середине предложения, рассматривался как разделитель на клаузы, а индикаторы со сложной структурой, включающие в своё определение разрыв, задавали дополнительные границы для выделения утверждений [21]. Для синтаксического анализа предложений использовался синтаксический анализатор из библиотеки *spaCy* (*spacy.io*). Результатом этого анализа является синтаксическое дерево разбора предложения, из которого выделялись глагольные группы и зависимые от них части предложения, каждая такая группа считалась отдельной клаузой.

Рассмотрено несколько вариантов использования индикаторов аргументации для дополнительного выделения значимой лексики в наборах данных. Используются два варианта тегирования, т.е. пометки в тексте найденных индикаторов с помощью дополнительных символов [22]. Словарь индикаторов составлялся вручную или полуавтоматически на основе индикаторов, выделенных экспертами при разметке [23] (доступен на платформе *ArgNetBank Studio*).

В качестве механизма подбора пар утверждений для классификации выбран подход на основе скользящего окна, включающего два подряд идущих сегмента (предложение и/или клауза). Для каждой пары сегментов проверялось, являются ли они утверждениями одного аргумента и какое место занимают в структуре данного аргумента. На основе полученной информации принималось решение о наличии и направленности аргументативной связи. Поскольку в аргументах может быть несколько посылок, то каждому аргументу может быть сопоставлено несколько аргументативных связей.

Для апробации предложенных подходов подготовлено пять наборов данных, на которых проведены эксперименты с различными НС-моделями.

2.3 Статистическая оценка характера аргументативных связей

В наборы данных помещались только контактные утверждения, поэтому проведено дополнительное исследование с целью оценки степени попадания размеченных аннотаторами связей в выборку. Рассмотрено несколько вариантов взаиморасположения утверждений, относящихся к одному аргументу (посылка и заключение).

Статистическая оценка встречаемости аргументативных связей в корпусе «Научная коммуникация» показала следующие результаты: внутри предложения 29.6%, внутри абзаца 30.6%, соседние абзацы 15.5%, дальние связи 24.3%.

На основе проведённого анализа можно сделать следующие выводы.

- Почти 30% аргументативных связей – это связи между фрагментами одного предложения, что говорит о том, что сегментация текста по предложениям слишком грубая и необходимо разделение предложений на более мелкие сегменты.
- Около 30% случаев относятся к связям между утверждениями внутри одного абзаца (исключая первую группу связей внутри одного предложения), а в соседних абзацах находится почти 16% связанных утверждений.
- Дальние связи, т.е. связи между утверждениями, которые разделены больше чем одним абзацем, составляют четверть всех утверждений.

В целом, полученные оценки свидетельствуют о том, что аргументы расположены компактно и предложенные стратегии выбора пар утверждений для проверки на наличие аргументативной связи покрывают большинство случаев.

2.4 Автоматическое расширение наборов данных

В настоящее время существуют способы автоматически перефразировать имеющийся текст. Автоматическое перефразирование позволяет увеличить набор обучающих данных. В работе применены методы двойного перевода и прямого автоматического перефразирования для увеличения объёма наборов данных, построенных из пар предложений. Для двойного перевода применялись трансформерные модели [24], а для прямого перефразирования использовалась модель [25]. Параметры моделей установлены таким образом, чтобы перефразированные тексты не содержали n -граммы из оригинала длиной более трёх. Каждое предложение было перефразировано двумя методами. Для повышения качества прямого перефразирования для каждого оригинального предложения генерировалось до пяти альтернативных вариантов, из которых выбирался ближайший по смыслу к оригиналу. Смысловое сходство предложений оценивалось с помощью модели *LaBSE* (от англ. *Language-agnostic BERT Sentence Embedding*), которая обучена векторизовать предложения так, чтобы векторы близких по смыслу предложений были близки геометрически.

В результате первоначальный набор данных расширен в три раза. Для оценки качества текстовых данных, полученных автоматически, было выполнено сравнение их с оригиналом по ключевым характеристикам [26]:

- S_m – смысловое сходство перефразированных предложений с оригинальными;
- S_m^R – среднее случайное смысловое сходство;
- *BLEU* – широко применяемая мера визуального сходства текстов;
- P_x – характеристика осмысленности полученных предложений.

Характеристики наборов данных, полученных методами автоматического перефразирования, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Качественные характеристики наборов данных, полученных автоматически

Метрика	Метод		
	<i>RuT5-based</i> (модель трансформера для русского языка)	Двойной перевод	
P_x^O	3,954158		
S_m^R	0,30477	0,30716	
S_m	max	1,0	1,0
	min	0,061837	0,060978
	mean	0,939011	0,901177
	$\alpha_{0.5}$	0,859084	0,751589
<i>BLEU</i>	max	1,0	1,0
	min	0,0	0,0
	mean	0,556067	0,491569
P_x	max	9,22531	9,3763
	min	0,42986	0,2573
	mean	4,59661	3,99337
	$\alpha_{0.95}$	6,1016	5,5902

Из таблицы 1 видно, что оба полученных набора обладают сходным смысловым разнообразием (близкие значения S_m^R) и заметными визуальными отличиями от оригинала (средние показатели *BLEU*). Тексты, полученные прямым перефразированием, в среднем ближе по смыслу к оригинальным. Квантиль $\alpha_{0.5}$ характеристики S_m показывает, что смысловое

сходство 95% автоматически сгенерированных фраз превосходит 0,85 и 0,75 соответственно. Сгенерированные наборы данных достаточно близки по смыслу к оригиналу. При этом полученные данные отличаются от исходных достаточно, чтобы их можно было считать новыми и сходными по стилистике и языку.

3 Извлечение аргументативных отношений

Для извлечения аргументативных отношений использовался метод машинного обучения на основе глубоких НС с привлечением больших языковых моделей. Данные для экспериментов были представлены в следующем формате:

left_statement | right_statement | left_arg | right_arg | relation | pattern, где

- два утверждения, идущих подряд (*left_statement*, *right_statement*), в зависимости от способа построения набора данных могут быть предложениями либо клаузами, полученными одним из двух способов, описанных в подразделе 2.2;
- левый (*left_arg*) и правый (*right_arg*) аргументы – признаки наличия компонентов аргументации в соответствующем утверждении; принимают значения от 0 до 3, где 0 соответствует отсутствию аргумента, 1 – наличию посылки в утверждении, 2 – наличию заключения и 3 – наличию посылки и заключения одновременно;
- отношение (*relation*) – признак наличия аргументативного отношения между левым и правым утверждениями; принимает значения 1, если утверждения являются компонентами одного аргумента и связь направлена от левого утверждения к правому (т.е. в левом утверждении находится посылка, а в правом – заключение), 2 – связь направлена от правого утверждения к левому, 0 – отсутствие связи;
- индикатор (*pattern*) – название найденного индикатора аргументации (при наличии).

3.1 Сценарий экспериментального исследования

Для представления русского текста использовалась модель *ruRoberta* (*ai-forever/ruRoberta-large*) [27], на основе которой строились эмбединги утверждений. На вход модели подавались два утверждения, разделённые специальным токеном *</s>*, выходное представление токена *<s>* использовалось в качестве векторного представления отношения между двумя утверждениями. Был применён классификатор с двумя полносвязными слоями и активационной функцией *ReLU* между ними. Для получения вероятности наличия аргументативной связи применялась функция *Softmax*.

При обучении моделей рассмотрены два подхода: маркирование индикаторов в утверждениях; предварительное обучение языковой модели на вспомогательной задаче предсказания индикаторов.

Первый подход заключался в модификации набора данных (см. подраздел 2.2.). Было проверено два варианта тегирования индикаторов: специальным знаком пунктуации «*» и специальным новым токеном *<marker>*, который добавлен в словарь токенизатора.

Второй подход отличается тем, что токены маскируются не случайно, а выбираются слова и конструкции, указывающие на наличие аргументации в тексте, т.е. индикаторы аргументации. Правильное предсказание пропущенного индикатора аргументации предполагает «понимание» аргументативной связи между фрагментами текста, являющимися контекстами этого индикатора [18]. В этом подходе модель *ruRoberta* дополнительно обучена предсказывать пропущенные индикаторы на корпусе научно-популярных текстов, содержащих 2913 предложений.

3.2 Результаты экспериментов

При обучении моделей использованы следующие параметры: коэффициент скорости обучения (*learning rate*) = 1.0e-06, размер пакета (*batch size*) = 16, количество эпох = 15, вероятность исключения (*dropout*) = 20%. При использовании расширенного набора данных количество эпох было сокращено до 8. Предобучение на задаче предсказания индикаторов проводилось в течение 15 эпох со скоростью обучения 3.0e-05.

Качество моделей оценивалось по значениям полноты, точности, *F1*-меры и площади под *ROC*-кривой (*ROC-AUC*) с помощью процедуры перекрестной проверки (*cross-validation*) с разбиением на пять частей. Результаты представлены в таблице 2.

В таблице использованы обозначения: *baseline* – базовая модель, *indicators* – модель, использующая информацию об индикаторах. В скобках уточняется использованный подход: *indicators* (*), *indicators (new token)* – тегирование индикаторов, *indicators (pretrain)* – предобучение на вспомогательной задаче предсказания индикаторов. Модели, обученные на расширенном наборе данных: *baseline + augmentation* и *indicators* (*) + *augmentation*.

Таблица 2 – Результаты экспериментов по предсказанию наличия аргументативной связи

Модель	Полнота	Точность	<i>F1</i> -мера	<i>ROC-AUC</i>
Предложения				
<i>baseline</i>	66,84	35,07	46,00	74,37
<i>indicators</i> (*)	65,98	36,39	46,91	74,65
<i>indicators (new token)</i>	64,10	35,18	45,43	73,34
<i>indicators (pretrain)</i>	64,52	35,27	45,61	73,85
<i>baseline + augmentation</i>	58,10	38,00	45,95	74,70
<i>indicators</i> (*) + <i>augmentation</i>	64,44	36,94	46,96	74,49
Предложения и клаузы				
<i>baseline</i>	56,30	30,72	39,75	68,72
<i>indicators</i> (*)	56,33	31,86	40,70	69,57
<i>indicators (pretrain)</i>	65,02	28,94	40,05	68,81
Предложения и контексты индикаторов				
<i>baseline</i>	52,05	44,23	47,82	74,16
<i>indicators</i> (*)	51,99	43,86	47,58	73,94
<i>indicators (pretrain)</i>	50,41	41,81	45,71	72,53

Тегирование индикаторов в предложениях увеличило точность предсказания аргументативной связи. Токен «*» показал себя лучше, чем введение нового токена, улучшив также и *F1*-меру. Предобучение на задаче предсказания индикаторов, в отличие от работы [18], не показало значительного улучшения. Причина этого, возможно, заключается в том, что для данной задачи использовался корпус небольшого объема. Согласно значению *F1*-меры лучшие результаты показала модель, обученная на расширенном наборе данных с тегированием индикаторов специальным символом «*».

Сегментация на клаузы с помощью синтаксического анализа предложения породила большое количество вариантов пар соседних утверждений, что негативно сказалось на качестве обученного на таких парах классификатора. При предсказании наличия связей между утверждениями, полученными сегментацией с помощью индикаторов, дополнительное тегирование индикаторов не дало прироста качества.

3.3. Оценка согласованности аннотаций

Другой подход к оценке качества полученного решения – это сравнение аннотаций, построенных экспертом и классификатором. Обычно данный подход применяется для оценки согласия между экспертами-аннотаторами. Его можно использовать и для оценки степени расхождения между графами аргументации, построенными автоматически и вручную.

Для сравнения текстовых аннотаций используются различные оценки согласованности, основанные на статистических и вероятностных моделях. Под согласованностью понимается степень, в которой процесс может быть повторен разными исследователями [28], что определяет надёжность и воспроизводимость результатов. В работе [29] указано, что выбор метода оценки сильно зависит от специфики данных, а для текстового контента показатели обычно занижены из-за невозможности формального выделения границ.

Специфика анализа разногласий аннотаторов при аргументативной разметке текста рассмотрена для англоязычных юридических текстов, размеченных по модели аргументов [30], а также при разметке политических текстов на шведском языке по стандарту *AIF* и схемам [31]. Расхождения между разметчиками на трёх уровнях аргументационной структуры анализировались при: выделении тезисов, построении связей и определении моделей рассуждения. Для данного исследования актуальны только первые две оценки.

Для оценки согласованности аннотаций текстов с аргументативной разметкой, выполненных разными аннотаторами, разработан алгоритм на основе подхода из [32], который был усовершенствован для получения объективной оценки корпуса «Научная коммуникация». Предложенный алгоритм опирается на следующие понятия. Каждая аннотация состоит из множества утверждений S и множества аргументов, построенных на этих утверждениях. Каждый аргумент включает в себя несколько дуг (начало – одна из посылок, конец – заключение). Если заключением текущего аргумента является другой аргумент, то в качестве конца дуги берётся заключение этого аргумента (примером такого аргумента является схема типа «конфликт»). Таким образом получено множество дуг E для аннотации.

Если у текста есть несколько аннотаций, то они сравниваются попарно. В итоге для каждой пары аннотаций получают два коэффициента согласия для утверждений и дуг. Эти коэффициенты рассчитываются по следующим формулам.

Коэффициент согласия по утверждениям:

$$agreement_S(S_1, S_2) = \frac{\min(|\hat{S}_1|, |\hat{S}_2|)}{\max(|\hat{S}_1|, |\hat{S}_2|) + |S_1 \setminus \hat{S}_1| + |S_2 \setminus \hat{S}_2|}$$

где $\hat{S}_1 = \{s_1 | s_1 \in S_1, \exists s_2 \in S_2, sim(s_1, s_2) \geq T\}$, $\hat{S}_2 = \{s_2 | s_2 \in S_2, \exists s_1 \in S_1, sim(s_1, s_2) \geq T\}$,
 $sim(s_1, s_2) = \max\left(\frac{|s_1|}{|s_1'|}, \frac{|s_2|}{|s_2'|}\right)$, $\hat{s} = s_1 \cap s_2$.

В нашем подходе каждое утверждение представляются интервалом (или набором интервалов в случае разрывного утверждения), границами которого являются позиции в тексте, поэтому пересечение утверждений вычисляется как пересечение интервалов. Порог схожести T выбран равным 0,75. Это похоже на стандартную меру: мощность пересечения двух множеств, делённая на мощность их объединения. Усложнение формулы возникает из-за того, что мощности пересечений в этих двух множествах могут не совпадать, т.к. один интервал из одного множества может пересекаться с несколькими интервалами из другого множества. Это может возникать как из-за выбранного порога схожести, так и из-за того, что один аннотатор разметил часть текста как одно утверждение, а другой на этой же части текста выделил несколько утверждений.

Коэффициент согласия по дугам:

$$agreement_E(E_1, E_2) = \frac{\min(|\hat{E}_1|, |\hat{E}_2|)}{\max(|\hat{E}_1|, |\hat{E}_2|)}$$

где $E_i = \{e | e = (s_1, s_2), s_1, s_2 \in S'_i\}$, $\hat{E}_1 = \{e_1 | e_1 \in E_1, \exists e_2 \in E_2, e_1 \equiv e_2\}$, $\hat{E}_2 = \{e_2 | e_2 \in E_2, \exists e_1 \in E_1, e_1 \equiv e_2\}$, $e_1 \equiv e_2 \leftrightarrow e_1 = (s_1^1, s_2^1), e_2 = (s_1^2, s_2^2), sim(s_1^1, s_1^2) \geq T, sim(s_2^1, s_2^2) \geq T$.

Суть та же, что и для формулы выше: мощность множества совпадающих дуг, делённая на мощность множества всех дуг, соединяющих утверждения из пересечения. Одна дуга из первой аннотации может соответствовать нескольким дугам из второй аннотации, т.к. одно утверждение может соответствовать нескольким.

Для сравнения аннотаций экспертов и аннотаций, полученных с помощью машинного обучения, введён дополнительный коэффициент согласия по контактным дугам – $agreement_{EC}$. Контактная дуга – это дуга, у которой между утверждениями, являющимися её вершинами, нет слов, не входящих в эти утверждения. Этот коэффициент вычисляется как и $agreement_E$, только в расчёте не принимают участия дуги, не являющиеся контактными.

После расчёта коэффициентов согласия для всех текстов из корпуса вычисляется среднее арифметическое для каждого типа коэффициента.

Вначале была вычислена общая оценка согласия между экспертами для текстов, в которых имелось несколько аннотаций (22 текста из корпуса «Научная коммуникация»), а затем получены оценки согласия между экспертами и двумя моделями (средние коэффициенты по парам аннотаций эксперт – модель). Обе модели обучены на наборе данных с разбивкой по предложениям и с выделенными в тексте индикаторами (*indicators* (*)). Первая модель (*AI-1*) использовала все размеченные данные, присутствующие на платформе *ArgNetBank*, а вторая (*AI-2*) – только наборы данных, полученные по корпусу «Научная коммуникация».

Приведённые в таблице 3 оценки показывают, что:

- при выделении аргументативных утверждений ($agreements$) согласие между экспертами ($\langle expert \rangle : \langle expert \rangle$) и экспертами и моделями ($\langle expert \rangle : \langle AI \rangle$) отличаются на 33,28% и 19,65% соответственно, это, по-видимому, означает, что используемые способы сегментации были недостаточны;
- при выделении контактных аргументативных связей ($agreement_{EC}$) модели машинного обучения уступают экспертам значительно в меньшей степени (на 6,06% и 0,3% соответственно), что говорит об адекватности работы моделей для близко расположенных утверждений;
- модель *AI-1* уступает *AI-2*, что, по-видимому, связано с лучшим качеством разметки на корпусе «Научная коммуникация»: отсутствуют неполные разметки, разметки, сделанные студентами, а также разметки, сделанные на основе абстрактной модели аргументации.

Таблица 3 – Усреднённая оценка согласованности аннотаций

Тип аннотаций	$agreements, \%$	$agreement_E, \%$	$agreement_{EC}, \%$
$\langle expert \rangle : \langle expert \rangle$	58,4	32,27	30,31
$\langle expert \rangle : \langle AI-1 \rangle$	25,12	-	24,25
$\langle expert \rangle : \langle AI-2 \rangle$	38,75	-	30,01

Оценка согласия между экспертами по сути задаёт максимальный порог качества, который можно достигнуть на текущих наборах данных. На практике это означает, что после того, как модели достигнут тех же оценок согласия с экспертами, что и сами эксперты, дальнейшее их улучшение будет невозможным, пока не будут получены лучшие оценки согласия между экспертами. В случае контактных отношений такой порог практически достигнут.

3.4. Анализ результатов

Анализ расхождения между аннотациями, построенными автоматически и вручную, проводился независимым экспертом. С этой целью на платформу были загружены графы аргументации, полученные с помощью модели AI-1. Анализ результатов выявил следующие типовые ошибки, которые делает модель AI-1.

3.4.1 Ошибки сегментации на предложения

- Заголовки новостных текстов, не имеющих в конце точки, не были рассмотрены моделью как отдельные предложения и потому не включались в аргументацию.
- Недоработка правил выделения предложений при сегментации: имеются неучтённые сокращения с точкой, такие как инициалы и сокращения, наличие которых может привести к неполноте утверждения и неадекватности соответствующих связей.

AI-1: [*Молодые люди до 25 лет также чаще других указывают на тех, кто имеет нарушения опорно-двигательного аппарата, и членов их семей – 19% vs.*] → [*частные благотворители и НКО занимают второе и третье места у молодежи 18-24 лет (26% и 21%)...*].

3.4.2 Ошибки, связанные с отсутствием сегментации на клаузы

Поскольку модель при сегментации выделяет предложения, но не выходит на уровень клауз, то большое количество ошибок связано именно с этим: не генерируются связи, которые аннотаторы формируют между клаузами.

- В исходном предложении,
AI-1: [*Другое исследование, проведённое в том же году, показало, что кофе связан с вероятным снижением риска развития нескольких форм рака, а также сердечно-сосудистых заболеваний, болезни Паркинсона и диабета второго типа.*],
которое модель связывает с другими целиком, аннотатор видит несколько фрагментов, утверждений и связей.
Аннотатор: [*Другое исследование, проведённое в том же году, показало, что*] → [*кофе связан*] → [*с вероятным снижением риска развития нескольких форм рака, а также сердечно-сосудистых заболеваний, болезни Паркинсона и диабета второго типа.*].
- Однако многие уникальные для AI-1 связи фактически моделируют те же отношения, которые построил аннотатор, но без выделения в утверждении посылки и/или заключения фрагментов, соответствующих вложенным простым предложениям или клаузам в составе целого предложения. Это нельзя в полной мере признать ошибкой.
AI-1: [*Эта разработка имеет важное значение для обеспечения точных и своевременных данных о погоде, что поможет в принятии решений и планировании в различных сферах жизни, от сельского хозяйства до экологии.*] → [*Так, в настоящий момент молодой ученый, постдок и ведущий научный сотрудник кафедры океанологии ЮФУ Денис Кривогуз занимается разработкой программного обеспечения с применением искусственного интеллекта, которое облегчит долгосрочное прогнозирование температуры воздуха и уровня атмосферных осадков в Ростовской области.*].
Аннотатор: [*что поможет в принятии решений и планировании в различных сферах жизни, от сельского хозяйства до экологии.*] → [*Так, в настоящий момент молодой ученый...*].
- Анализ аннотатора часто отличается ввиду разделения предложения-посылки, имеющего в составе перечисление (однородные члены), на отдельные утверждения.
AI-1: [*Эти источники играют важнейшую роль в вопросах информированности граждан о данном заболевании, остальные звучат в ответах гораздо реже.*] → [*Чаще всего информацию о несовершенном остеогенезе россияне встречают в СМИ (68% от числа осведомленных), треть опрошенных видели объявления о сборах на помощь «хрустальным» людям (32%).*].
Аннотатор: [*Чаще всего информацию о несовершенном остеогенезе россияне встречают в СМИ*] → [*Эти источники играют важнейшую роль в вопросах информированности граждан о данном заболевании*]

- Отсутствие более мелкой сегментации, чем предложение, вызывает очевидные грубые ошибки в случае подчинительных предлогов (*чтобы, потому что, так как* и пр.).
AI-1: [**Чтобы** спрогнозировать будущее фирмы – **например** определить, сколько прибыли она принесет владельцам в следующем году, – экономисты обычно используют регрессионные модели.] → [Рентабельность торговых компаний зависит от многих факторов: их размера, стратегии управления, умения выстраивать хорошие взаимоотношения с клиентами, а также глобальных кризисов].
Предлог в данном случае вводит посылку, неважно, находится ли клауза-заключение до или после клаузы с предлогом. Это пример того, как, наряду с сегментацией на клаузы, работают индикаторы аргументации.

3.4.3 Ошибки неправильного определения направления связи

Часто модель находит связь между утверждениями, но неправильно осуществляет выбор ролей «посылка» – «заключение».

- Во многих случаях порядок утверждений в тексте таков, что посылка предшествует заключению (непосредственное следование необязательно, т.к. возможна не одна посылка), допускается и переход через абзац. Кажется, что модель твёрдо выучила это правило.
AI-1: [Таким людям нужно себя беречь, «как хрустальную вазу», **поэтому** их называют «хрустальными».] → [Это редкая генетическая болезнь, при которой не вырабатывается кальций, **поэтому** кости становятся хрупкими и ломкими.]
Эксперт считает такую связь возможной. У аннотатора не так, ввиду разделения сложных предложений на причинные и главные (следствия), но в целом направление связи верное: посылка до заключения, иногда с переходом через абзац.
- Правило действует далеко не всегда, например, детализирующие посылки (пример, признак, классификация) следуют после заключения, и модель в некоторых случаях следует этому правилу.
AI-1: [Шимпанзе, **например**, в тестах на склонность к обману, всегда показывают гораздо лучшие результаты, чем люди.] → [А если бы эгоизм и агрессия каким-то образом были источниками человеческого успеха, было бы трудно объяснить неудачу наших собратьев-приматов].
Хотя она почти всегда его нарушает, что особенно заметно на посылках, которые начинаются словами *например, к примеру* и пр. Очевидно, что примеры всегда приводятся после основного утверждения (заключения), но модель этого не предусматривает.
AI-1: [Вся коллекция занимает скромные 12,6 ТБ, хотя в неё вошли почти все компакт-диски и дискеты 90-х годов, которые удалось достать коллекционерам.] → [**К примеру**, файловый архив Discmaster содержит 133,7 млн файлов с десятка тысяч CD и дискет из коллекции Internet Archive].
- Индикаторы *поэтому, следовательно* возможны на уровне целых предложений: они вводят заключение, которое находится справа от посылки. И с такой задачей модель успешно справляется.
AI-1: [Банки были заинтересованы в том, чтобы выдавать как можно больше ипотечных кредитов, при этом их качество роли не играло.] → [**Поэтому** вскоре банки стали заключать субстандартные договоры – по ним заемщики получали кредит на жилье, которое де-факто не могли себе позволить].
Из анализа ошибок AI-1 и их расхождений с анализом аннотатора можно сделать вывод, что, помимо сегментации, при установлении аргументативных связей необходимо учитывать положение утверждений в тексте относительно друг друга и положение индикаторов относительно соответствующих текстовых фрагментов.

Заключение

Рассмотрен комплексный подход к экспериментальному исследованию автоматического извлечения аргументативных отношений из текстов научной коммуникации, который включает методы генерации наборов данных, обучения НС-моделей и анализ результатов их работы. К особенностям предлагаемого подхода можно отнести применение его к исследованию русскоязычных текстов, принадлежащих к различным жанрам научного и научно-популярного стилей, интеграцию индикаторного подхода с методами глубокого обучения, использование методов перефразирования для пополнения наборов данных, комплексный подход к оценке результатов.

Проведённые исследования показали лучшие решения у модели, использующей индикаторы аргументации. Полученные результаты согласуются с результатами других исследований в данной области, подтверждают гипотезы о полезности индикаторов, а средняя оценка согласованности по связям аннотаций, построенных моделями, и экспертными аннотациями практически не отличается от согласованности аннотаций разных экспертов.

Следует отметить низкую согласованность между разметками разных аннотаторов, на основе которых генерируются наборы данных для обучения моделей. По-видимому, это связано с высокой вариативностью представления рассуждений и субъективностью их восприятия. Введение строгих формальных требований к аннотаторам должно улучшить ситуацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] *Toulmin S.* The Uses of Argument. Cambridge University Press, 2003. 262 p.
- [2] *Walton D., Reed C., Macagno F.* Argumentation schemes. Cambridge University Press, 2008.
- [3] *Perelman C., Olbrechts-Tyteca L.* The new rhetoric. A treatise on argumentation. Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1969. 576 p. DOI: 10.2307/j.ctvpj74xx
- [4] *Wagemans J.H.M.* Constructing a Periodic Table of Arguments // In: L. Benacquista, & P. Bondy (ed.): Argumentation, Objectivity and Bias: Proceedings of the Ontario Society for the Study of Argumentation Conference, vol. 11. University of Windsor, 2016.
- [5] *Rahwan I., Reed C.* The argument interchange format // In: G. Simari, I. Rahwan (ed.): Argumentation in Artificial Intelligence. Boston: Springer, 2009. P.383-402.
- [6] *Cerutti F., Toniolo A., Norman T.J., Bex F., Rahwan I., Reed C.* AIF-EL – an OWL2-EL compliant AIF ontology // In: Computational Models of Argument. Proc. of COMMA 2018. Vol. 305. IOS Press, 2018. P. 455–456.
- [7] *Lippi M., Torroni P.* Argumentation Mining: State of the Art and Emerging Trends. ACM Transactions on Internet Technology. 2016. Vol. 16, Issue 2, Article No. 10. P. 1-25. DOI: 10.1145/2850417.
- [8] *Besnard P., Garcia A., Hunter A., Modgil A., Prakken H., Simari G., Toni F.* Introduction to structured argumentation. Argument & Computation 2014, 5(1). P. 1-4.
- [9] *Walton D.* Argumentation theory: A very short introduction // In: G. Simari, I. Rahwan (ed.): Argumentation in Artificial Intelligence. Boston: Springer, 2009. P.1-22.
- [10] *Конonenko И.С., Загорюлько Ю.А., Серый А.С., Сидорова Е.А., Шестаков В.К.* Классификация типовых моделей рассуждения и их применение для исследования аргументации в текстах научной коммуникации // “Знания – Онтологии – Теории”: Труды IX Международной конф. ЗОНТ-2023. Новосибирск: Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирский государственный университет, 2023. С.178-187.
- [11] *Кибрик А.А.* Модус, жанр и другие параметры классификации дискурсов // Вопросы языкознания. 2009. № 2. С.3-21.
- [12] *Chen T.* BERT Argues: How Attention Informs Argument Mining. Honors Theses, vol. 1589. 2021.
- [13] *Putra J.W.G., Teufel S., Tokunaga T.* Multi-Task and Multi-Corpora Training Strategies to Enhance Argumentative Sentence Linking Performance // In: Proc. of the 8th Workshop on Argument Mining. Punta Cana: Association for Computational Linguistics, 2021. P.12-23.
- [14] *Prasad R., Miltsakaki E., Dinesh N., Lee A., Joshi A.* The Penn Discourse Treebank 2.0 Annotation Manual. Pennsylvania: Institute for Research in Cognitive Science, University of Pennsylvania, 2007. 99 p.
- [15] *Eckle-Kohler J., Kluge R., Gurevych I.* On the role of discourse markers for discriminating claims and premises in argumentative discourse // In: Proc. of the Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing. Lisbon: Association for Computational Linguistics, 2015. P.2236-2242.

- [16] **Fisher R.A.** Statistical Methods for Research Workers. London: Oliver and Boyd, 1932.
- [17] **Xu H., Ashley K.** Multi-Granularity Argument Mining in Legal Texts // Legal Knowledge and Information Systems. IOS Press, 2022. P.261-266.
- [18] **Dutta S., Juneja J., Das D., Chakraborty T.** Can Unsupervised Knowledge Transfer from Social Discussions Help Argument Mining? // In: Proc. of the 60th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Vol. 1: Long Papers. Dublin: Association for Computational Linguistics, 2022. P.7774-7786.
- [19] **Сидорова Е.А., Ахмадеева И.Р., Загорулько Ю.А., Серый А.С., Шестаков В.К.** Платформа для исследования аргументации в научно-популярном дискурсе // Онтология проектирования. 2020. Т. 10, №4 (38). С. 489-502. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-489-502.
- [20] **Загорулько Ю.А., Гаранина Н.О., Боровикова О.И., Доманов О.А.** Моделирование аргументации в научно-популярном дискурсе с использованием онтологий // Онтология проектирования. 2019. Т. 9, № 4(34). С. 496-509. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-496-509.
- [21] **Sidorova E.A., Akhmadeeva I.R., Kononenko I.S., Chagina P.M.** Argument Extraction Based on the Indicator Approach // Pattern Recognition and Image Analysis. Vol.33(3). 2023. P.498–505. DOI: 10.1134/S1054661823030410.
- [22] **Alibaeva K., Loukachevitch N.** Analyzing COVID-related Stance and Arguments using BERT-based Natural Language Inference // In: Proc. of the Int. Conf. on Computational Linguistics and Intellectual Technologies “Dialogue 2022”. Issue 21. 2022. P.8-17.
- [23] **Кононенко И.С., Ахмадеева И.Р., Сидорова Е.А.** Лингвистические аспекты исследования аргументации на основе онтологии // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. №4 (20). С. 44-55. DOI: 10.38028/ESI.2020.20.4.004
- [24] **Ng N., Yee K., Baevski A., Ott M., Auli M., Edunov S.** Facebook FAIR's WMT19 news translation task submission // arXiv preprint: 1907.06616. 2019.
- [25] **Fenogenova A.** Russian paraphrasers: Paraphrase with transformers // In: Proc. of 8th Workshop on Balto-Slavic Natural Language Processing. Ukraine. 2021.
- [26] **Сидорова Е.А., Загорулько Ю.А., Кононенко И.С., Серый А.С., Чагина П.М.** Подход к построению датасета для задачи извлечения аргументативных отношений // Двадцать первая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2023: Труды конф. (Смоленск, 16–20 октября 2023 г.). Т.1. Смоленск: Принт-Экспресс, 2023. С.211-222.
- [27] **Zmitrovich D., Abramov A., Kalmykov A., Tikhonova M., Taktasheva E., Astafurov D., Baushenko M., Snegirev A., Shavrina T., Markov S., Mikhailov V., Fenogenova A.** A Family of Pretrained Transformer Language Models for Russian. 2023. ArXiv, abs/2309.10931.
- [28] **Krippendorff K.** Content Analysis: An Introduction to Its Methodology. SAGE, Thousand Oaks, 2004.
- [29] **Олейник А.Н., Попова И.П., Курдина С.Г., Шаталова Т.Ю.** Надежность и достоверность в контент-анализе текстов: выбор показателей // Психологический журнал. 2014. Т. 35, №6. С. 99-113.
- [30] **Teruel M., Cardellino C., Cardellino F., Alemany L., Villata S.** Increasing Argument Annotation Reproducibility by Using Inter-annotator Agreement to Improve Guidelines // In: Proc. of the 11th Int. Conf. on Language Resources and Evaluation (LREC 2018). Miyazaki, Japan, 2018.
- [31] **Lindahl A., Borin L., Rouces J.** Towards Assessing Argumentation Annotation – A First Step // In: Proc. of the 6th Workshop on Argument Mining (Floreny, Italy, 2019). 2019. P. 177-186.
- [32] **Пименов И.С.** Анализ расхождений в аргументационной разметке научных статей на русском языке // Вестник НГУ. Серия: Лингвистика и межкультурная коммуникация. 2023. Т.21, №2. С.89-104. DOI 10.25205/1818-7935-2023-21-2-89-104.
-

Сведения об авторах



Сидорова Елена Анатольевна, 1977 г. рождения. Окончила Новосибирский государственный университет (НГУ) в 2000 г., к.ф.-м.н. (2006). Старший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института систем информатики им. А.П. Ершова (Новосибирск), доцент кафедры программирования и кафедры систем информатики НГУ, член Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 160 работ в области компьютерной лингвистики, онтологического инжиниринга и разработки интеллектуальных систем. Author ID (РИНЦ): 146000; ORCID: 0000-0001-8731-3058; Author ID (Scopus): 41961707000; Researcher ID (WoS): K-2432-2018. lsidorova@iis.nsk.su. ✉

Ахмадеева Ирина Равильевна, 1991 г. рождения. Окончила НГУ в 2015 г. Младший научный сотрудник Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, ассистент кафедры программирования НГУ. В списке научных трудов около 30 работ в области искусственного интеллекта, разработки интеллектуальных систем и компьютерной лингвистики. Author ID (РИНЦ): 874172; ORCID: 0000-0002-7371-1087; Author ID (Scopus): 57188681471; Researcher ID (WoS): K-3145-2018. i.r.akhmadeeva@iis.nsk.su.



Загоруйко Юрий Алексеевич, 1957 г. рождения. Окончил Новочеркасский политехнический институт им. С. Орджоникидзе (1979), к.т.н. (1989). Заведующий лабораторией Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, доцент кафедры программирования и кафедры систем информатики НГУ. Член Российской и Европейской ассоциаций искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 290 публикаций в области искусственного интеллекта, разработки интеллектуальных систем, инженерии знаний, онтологического моделирования и компьютерной лингвистики. Author ID (РИНЦ): 4015; ORCID: 0000-0002-7111-6524; Author ID (Scopus): 23394231500; Researcher ID (WoS): R-1826-2016. zagor@iis.nsk.su.

Конonenko Ирина Семеновна, 1953 г. рождения. Окончила НГУ в 1975 г. Научный сотрудник Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН. В списке научных трудов более 100 работ в области компьютерной лингвистики, представления знаний, разработки интеллектуальных систем, мультиагентных систем. ORCID: 0000-0001-5057-6807; Author ID (РИНЦ): 108210; Author ID (Scopus): 41961368100; Researcher ID (WoS): AAO-1317-2020. irina_k@cn.ru.



Серый Алексей Сергеевич, 1987 г. рождения. Окончил НГУ в 2010 г. Младший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН. В списке научных трудов более 30 работ в области представления знаний и компьютерной лингвистики. Author ID (РИНЦ): 714554; ORCID: 0000-0001-8275-4700; Author ID (Scopus): 56403204900; Researcher ID (WoS): K-1557-2018. alexey.seryj@iis.nsk.su.

Чагина Полина Максимовна, 1999 г. рождения. Окончила НГУ в 2023 г. Программист 2 категории Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН. В списке научных трудов 7 работ в области компьютерной лингвистики и онтологического инжиниринга. ORCID: 0000-0002-1595-7695; Author ID (РИНЦ): 1178371. p.chagina@gmail.com.



Шестаков Владимир Константинович, 1986 г. рождения. Окончил НГУ в 2009 г. Младший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН. В списке научных трудов более 30 работ в области разработки информационных систем, в том числе с использованием вики-технологий и онтологий. Author ID (РИНЦ): 711994; ORCID: 0000-0001-5976-1048; Author ID (Scopus): 56439120800; Researcher ID (WoS): J-8288-2018. shestakov@iis.nsk.su.

Поступила в редакцию 21.11.2023, после рецензирования 30.11.2023. Принята к публикации 02.12.2023.



An integrated approach to the analysis of argumentative relationships in scientific communication texts

© 2023, E.A. Sidorova✉, I.R. Akhmadeeva, Yu.A. Zagorulko I.S. Kononenko, A.S. Sery, P.M. Chagina, V.K. Shestakov

A.P. Ershov Institute of Informatics Systems of Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract

The problem of automatic analysis of argumentation in scientific communication texts is considered. Argumentation is understood as an ordered set of arguments used to support a certain thesis. An argument includes at least one premise and one conclusion, connected by an argumentative relation. The purpose of the work is an experimental study of neural network approaches to solving the problem of searching and extracting argumentative relations between statements located closely in the text. The study was conducted on a corpus of texts with argumentative markup created using the previously developed web platform. The corpus included texts of scientific news, analytical articles from the Habr website, scientific articles and reviews. Datasets for machine learning were built based on these texts. To improve the quality of neural network models training, these sets were supplemented with new data by using automatic paraphrasing and double translation methods. Two approaches to training models were considered: the first one with labeling of indicators in texts and the second one with preliminary training of a language model on the task of predicting indicators. To evaluate the models performance, an approach was proposed based on estimates of agreement between experts, usually used to compare markups of manually created texts. A comparison of agreement coefficients between experts and trained models showed that the quality threshold for extracting argumentative relations was almost reached on the model with labeled indicators. A manual analysis of model errors was carried out by visualizing the obtained results. Thus, the novelty of the work lies in the application of an integrated approach to creating data sets, training models and evaluating the results obtained from the automatic extraction of argumentative relations.

Keywords: *argumentation, automatic analysis, text markup, argumentative relations, argumentation indicator, markup consistency, dataset.*

For citation: *Sidorova EA, Akhmadeeva IR, Zagorulko YuA, Kononenko IS, Sery AS, Chagina PM, Shestakov VK. An integrated approach to the analysis of argumentative relationships in scientific communication texts [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 562-579. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-562-579.*

Financial Support: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-11-00261, <https://rscf.ru/project/23-11-00261/>.

List of tables

Table 1 - Qualitative characteristics of automatically obtained datasets

Table 2 - Results of experiments on predicting the presence of an argumentative relation

Table 3 - Average annotation agreement estimate

References

- [1] *Toulmin S.* The Uses of Argument. Cambridge University Press; 2003. 262 p.
- [2] *Walton D, Reed C, Macagno F.* Argumentation schemes. Cambridge University Press; 2008.
- [3] *Perelman C, Olbrechts-Tyteca L.* The new rhetoric. A treatise on argumentation. Notre Dame: University of Notre Dame Press; 1969. 576 p. DOI: 10.2307/j.ctvpj74xx
- [4] *Wagemans JHM.* (2016). Constructing a Periodic Table of Arguments. In: L. Benacquista, & P. Bondy (ed.): Argumentation, Objectivity and Bias, proc. of the Ontario Society for the Study of Argumentation Conference. University of Windsor; 2016; 11.
- [5] *Rahwan I, Reed C.* The argument interchange format. In: G. Simari, I. Rahwan (ed.): Argumentation in Artificial Intelligence. Boston: Springer, 2009: 383-402.

- [6] **Cerutti F, Toniolo A, Norman TJ, Bex F, Rahwan I, Reed C.** AIF-EL – an OWL2-EL compliant AIF ontology. In: Computational Models of Argument, proc. of COMMA 2018. IOS Press, 2018; 305: 455-456.
- [7] **Lippi M, Torroni P.** Argumentation Mining: State of the Art and Emerging Trends. ACM Transactions on Internet Technology. 2016; 16(2); No. 10: 1-25. DOI: 10.1145/2850417
- [8] **Besnard P, Garcia A, Hunter A, Modgil A, Prakken H, Simari G, Toni F.** Introduction to structured argumentation. Argument & Computation. 2014, 5(1): 1-4.
- [9] **Walton D.** Argumentation theory: A very short introduction. In: G. Simari, I. Rahwan (ed.): Argumentation in Artificial Intelligence. Boston: Springer, 2009: 1-22.
- [10] **Kononenko IS, Zagorulko YuA, Sery AS, Sidorova EA, Shestakov VK.** Classification of typical models of reasoning and their application to the study of argumentation in scientific communication texts [In Russian]. In: Knowledge-Ontology-Theory, proc. of Russian Conf. KNOTH 2023. Novosibirsk. Sobolev Institute of Mathematics; Novosibirsk State University, 2023: 178-187.
- [11] **Kibrik AA.** Modus, genre and other parameters of discourse classification [In Russian]. Topics in the study of languages. 2009; 2: 3-21.
- [12] **Chen T.** BERT Argues: How Attention Informs Argument Mining. Honors Theses; 1589, 2021.
- [13] **Putra JWG, Teufel S, Tokunaga T.** Multi-Task and Multi-Corpora Training Strategies to Enhance Argumentative Sentence Linking Performance. In: Argument Mining, proc. of the 8th Int. Workshop. Punta Cana: Association for Computational Linguistics, 2021: 12-23.
- [14] **Prasad R, Miltasaki E, Dinesh N, Lee A, Joshi A.** The Penn Discourse Treebank 2.0 Annotation Manual. Pennsylvania: Institute for Research in Cognitive Science, University of Pennsylvania; 2007. 99 p.
- [15] **Eckle-Kohler J, Kluge R, Gurevych I.** On the role of discourse markers for discriminating claims and premises in argumentative discourse. In: Empirical Methods in Natural Language, proc. of the Conf. 2015. Lisbon: Association for Computational Linguistics, 2015: 2236-2242.
- [16] **Fisher RA.** Statistical Methods for Research Workers. London: Oliver and Boyd, 1932.
- [17] **Xu H, Ashley K.** Multi-Granularity Argument Mining in Legal Texts. In: Legal Knowledge and Information Systems. IOS Press; 2022: 261-266.
- [18] **Dutta S, Juneja J, Das D, Chakraborty T.** Can Unsupervised Knowledge Transfer from Social Discussions Help Argument Mining? In: Proc. of the 60th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, vol. 1: Long Papers. Dublin: Association for Computational Linguistics, 2022: 7774-7786.
- [19] **Sidorova EA, Akhmadeeva IR, Zagorulko YuA, Sery AS, Shestakov VK.** Research platform for the study of argumentation in popular science discourse [In Russian]. *Ontology of designing*. 2020; 10(4): 489-502. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-489-502
- [20] **Zagorulko YuA, Garanina NO, Borovikova OI, Domanov OA.** Argumentation modeling in popular science discourse using ontologies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 496-509. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-496-509.
- [21] **Sidorova EA, Akhmadeeva IR, Kononenko IS, Chagina PM.** Argument Extraction Based on the Indicator Approach. Pattern Recognition and Image Analysis. 2023; 33(3): 498-505. DOI: 10.1134/S1054661823030410
- [22] **Alibaeva K, Loukachevitch N.** Analyzing COVID-related Stance and Arguments using BERT-based Natural Language Inference. In: Computational Linguistics and Intellectual Technologies, proc. of the Int. Conf. "Dialogue 2022". 2022: 8-17.
- [23] **Kononenko IS, Akhmadeeva IR, Sidorova EA.** Linguistic Aspects of Ontology-based Argumentation Study [In Russian]. In: Information and mathematical technologies in science and management. 2020; 4(20): 44-55. DOI: 10.38028/ESI.2020.20.4.004
- [24] **Ng N, Yee K, Baevski A, Ott M, Auli M, Edunov S.** Facebook FAIR's WMT19 news translation task submission. arXiv preprint: 1907.06616. 2019.
- [25] **Fenogenova A.** Russian paraphrasers: Paraphrase with transformers. In: Balto-Slavic Natural Language Processing, proc. 8th Workshop, Ukraine. 2021.
- [26] **Sidorova EA, Zagorulko YuA, Kononenko IS, Sery AS, Chagina PM.** Approach to building a dataset for the problem of extracting argumentative relations [In Russian]. In: Artificial Intelligence, proc. of XXI Russian Conf. RCAI-2023 (Smolensk, October 16-20, 2023). Smolensk: Print-Express, 2023; 1: 211-222.
- [27] **Zmitrovich D, Abramov A, Kalmykov A, Tikhonova M, Taktasheva E, Astafurov D, Baushenko M, Snegirev A, Shavrina T, Markov S, Mikhailov V, Fenogenova A.** (2023). A Family of Pretrained Transformer Language Models for Russian. ArXiv, abs/2309.10931.
- [28] **Krippendorff K.** Content Analysis: An Introduction to Its Methodology. Thousand Oaks: SAGE, 2004.
- [29] **Oleinik AN, Popova IP, Kirdina SG, Shatalova TY.** Reliability and validity in content text analysis: selection of indicators [In Russian]. In: Psychological Journal, 2014; 35(6): 99-113.

- [30] **Teruel M, Cardellino C, Cardellino F, Alemany L, Villata S.** Increasing Argument Annotation Reproducibility by Using Inter-annotator Agreement to Improve Guidelines. In: Language Resources and Evaluation. Proc. of the 11th Int. Conf. LREC 2018 (Miyazaki, Japan, 2018). 2018.
- [31] **Lindahl A, Borin L, Rouces J.** Towards Assessing Argumentation Annotation – A First Step. In: Argument Mining, proc. of the 6th Workshop (Floreny, Italy, 2019), 2019: 177-186.
- [32] **Pimenov IS.** Analysis of discrepancies in the argumentative markup of scientific articles in Russian [In Russian]. In: NSU Vestnik. Series: Linguistics and Intercultural Communication. 2023; 21(2): 89-104. DOI 10.25205/1818-7935-2023-21-2-89-104.
-

About the authors

Elena Anatolievna Sidorova (b. 1977) graduated from the Novosibirsk State University in 2000, PhD (2006). She is a Senior Researcher of the Laboratory of Artificial Intelligence at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems (Novosibirsk, Russia), Associate Professor at Novosibirsk State University. She is a member of Russian and European Associations for Artificial Intelligence. Dr. Sidorova has more than 160 peer-reviewed publications in the field of Computational Linguistics, Intelligent System Development, Knowledge and Ontology Engineering. Author ID (RSCI): 146000; ORCID: 0000-0001-8731-3058; Author ID (Scopus): 41961707000; Researcher ID (WoS): K-2432-2018. lsidorova@iis.nsk.su. ✉

Irina Ravilevna Akhmadeeva (b.1991) graduated from the Novosibirsk State University in 2015. She is a Junior Researcher at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems of the Siberian Branch of Russian Academy of Science, Assistant Lecturer at the Novosibirsk State University. She is the author of about 30 publications in the fields of AI, Intelligent System Development and NLP. ORCID: 0000-0002-7371-1087; Author ID (RSCI): 874172; Author ID (Scopus): 57188681471; Researcher ID (WoS): K-3145-2018. i.r.akhmadeeva@iis.nsk.su.

Yury Alekseevich Zagorulko (b.1957) graduated from the Novocheerkassk Polytechnic Institute in 1979, PhD (1989). He is the Head of Laboratory at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems of the Siberian Branch of RAS, Associate Professor at Novosibirsk State University. He is a member of Russian and European Associations for Artificial Intelligence. He is the author of more than 290 publications in the fields of AI, Knowledge and Ontology Engineering, Intelligent System Development, and Computational Linguistics. Author ID (RSCI): 4015; ORCID: 0000-0002-7111-6524; Author ID (Scopus): 23394231500; Researcher ID (WoS): R-1826-2016. zagor@iis.nsk.su. ✉

Irina Semenovna Kononenko (b. 1953) graduated from the Novosibirsk State University in 1975. She is a Senior Researcher in the Laboratory of Artificial Intelligence at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems (Novosibirsk, Russia). She has more than 100 peer-reviewed publications in the field of Computational Linguistics, Intelligent System Development, Multi-agent Systems, and Knowledge Representation.. ORCID: 0000-0001-5057-6807; Author ID (RSCI): 108210; Author ID (Scopus): 41961368100; Researcher ID (WoS): AAO-1317-2020. irina_k@cn.ru.

Alexey Sergeevich Sery (b.1987) graduated from the Novosibirsk State University (2010) and hold the position of Junior Researcher at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems of the Siberian Branch of RAS. He is the author of more than 30 papers in the fields of Knowledge Representation and Computational Linguistics. Author ID (RSCI): 714554; ORCID: 0000-0001-8275-4700; Author ID (Scopus): 56403204900; Researcher ID (WoS): K-1557-2018. alexey.seryj@iis.nsk.su.

Polina Maksimovna Chagina (b. 1999) graduated from the Novosibirsk State University in 2023. She is a programmer of the 2nd category at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS. The list of scientific works includes 7 works in the field of computational linguistics and ontological engineering. ORCID: 0000-0002-1595-7695; Author ID (RSCI): 1178371. p.chagina@gmail.com.

Vladimir Konstantinovich Shestakov (b. 1986) graduated from the Novosibirsk State University in 2009. He is a Junior Researcher of the Artificial Intelligence Laboratory at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems (Novosibirsk, Russia). He is the author of more than 30 publications in the field of developing information systems, including using wiki technologies and ontologies. Author ID (RSCI): 711994; ORCID: 0000-0001-5976-1048; Author ID (Scopus): 56439120800; Researcher ID (WoS): J-8288-2018. shestakov@iis.nsk.su.

Received November 21, 2023. Revised November 30, 2023. Accepted December 2, 2023.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 519.816

Научная статья

DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-580-596



Метод косвенных предпочтений формирования весов критериев с многоуровневой структурой

© 2023, В.П. Корнеенко

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

Аннотация

Представлен метод формирования весов критериев в задачах многокритериального оценивания объектов с многоуровневой структурой показателей, представленных в виде иерархического дерева. Значения весов вычисляются на основе косвенного измерения предпочтений смежных пар локальных весов критериев, входящих в вершины более высокого уровня иерархического дерева, в виде экспертных оценок в количественной шкале отношений. Вычисление количественных весов вначале сводится к лексикографическому упорядочению по убыванию важности критериев на каждом уровне иерархии, входящих в вершины более высокого уровня, вследствие чего сокращается число экспертных сравнений смежных пар в шкале отношений. Формирование локальных коэффициентов важности критериев математически обосновано и базируется на матрице, обладающей особыми свойствами. Дан сравнительный анализ предлагаемого метода формирования количественных весов с методом анализа иерархий, методом наименьших квадратов и методом аппроксимационной матрицы, базирующимися на матрице парных сравнений. Приводится пример решения задачи многокритериального оценивания боевых самолётов, принимавших участие в тендере, по тактико-техническим характеристикам, представленным в различных шкалах измерения.

Ключевые слова: важность критериев, матрица парных сравнений, иерархическое дерево, шкала измерения, упорядочение критериев.

Цитирование: Корнеенко В.П. Метод косвенных предпочтений формирования весов критериев с многоуровневой структурой // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №4(50). С.580-596. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-580-596.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Принятие управленческих решений часто сопряжено с решением прикладных задач оценивания и выбора эффективных объектов (вариантов решений, альтернатив, стратегий), которые относятся к классу многокритериальных задач. На практике к этому классу относятся задачи: построения рейтингов компаний, банков; оценки эффективности деятельности коллективов в организационных системах; синтеза сложной технической системы.

Для объектов с многоуровневой структурой характерно представление системы критериев в виде иерархического дерева [1–3]. При этом возникает проблема оценки количественной важности локальных критериев, входящих в вершину более высокого уровня.

Обзору и классификации методов формирования весовых коэффициентов посвящено большое число работ [4–9]. Известно более двадцати различных методов определения весов, часть из которых подробно рассмотрена в статье [8].

Настоящая статья посвящена развитию методов косвенного измерения предпочтений критериев в шкале отношений [10].

1 Определение важности критериев

Одна из первых методик решения многокритериальных задач с многоуровневой структурой была разработана для оценки эффективности вариантов прогнозирования и планирования при разработке сложных научных и научно-технических программ (ПАТТЕРН, PATTERN¹, США) [2]. Методика включает построение дерева целей, которое служит для оценки относительной важности критериев, и применение прямого метода экспертного оценивания количественных весов критериев.

Оценки количественной важности локальных критериев, входящих в вершины более высокого уровня, эксперты проставляют на бланке (в долях единицы). Процедура определения коэффициентов проходит в несколько туров, пока не будет согласована со всеми экспертами. Пересчет их в глобальные веса для концевых (висячих) вершин дерева осуществляется перемножением весов всех вершин, лежащих на пути, ведущем к данной вершине. Для каждой альтернативы (объекта, проекта, варианта) находится агрегированная оценка, равная сумме произведений глобальных весов и оценок критериев в концевых вершинах дерева.

В соответствии с теорией измерений [11] веса важности критериев могут быть измерены в градациях различных шкал, например: в номинальных шкалах с двумя градациями «равноважны» и «неравноважны»; в количественных (разности, отношений) с различными весами важности (предпочтительности) по числу критериев.

Понятие важности критериев с точки зрения теории измерений можно рассмотреть следующим образом. Пусть объекты множества $A = \{a_q: q = \overline{1, n_A}\}$ оцениваются по $f_j \in F = \{f_1, \dots, f_m\}$ критериям.

Определение 1. В количественной шкале отношений критерий $f_i, i = \overline{1, m}$, считается более важным, чем критерий f_j (обозначение $f_i > f_j$), если количественный вес $w_i = w(f_i)$ критерия f_i будет превосходить количественный вес $w_j = w(f_j)$ критерия f_j в $\frac{w_i}{w_j} > 1$ раз, т.е.

$$f_i > f_j \Leftrightarrow w(f_i) > w(f_j)$$

и наоборот, менее важен, если $\frac{w_i}{w_j} < 1$, а при $\frac{w_i}{w_j} = 1$, т.е. равенстве весов, критерии равноважны

$$f_i \approx f_j \Leftrightarrow w(f_i) = w(f_j).$$

Известно следующее определение однородных критериев по важности [12, 13].

Определение 2. Утверждение «критерий K_i важнее критерия K_j » (обозначение $i > j$) означает, что каждая векторная оценка x , в которой $x_i > x_j$, предпочтительнее, чем x^{ij} .

Здесь x^{ij} – обозначение векторной оценки, которая получена из векторной $x = (x_1, \dots, x_m)$ оценки, например, если $x = (5, 4, 3, 4)$, то $x^{23} = (5, 3, 4, 4)$.

Замечание 1. Сравнение определений 1 и 2 приводит к выводу о том, что определение 1 не привязано к векторным оценкам, в отличие от определения 2. Можно показать, что утверждение «каждая векторная оценка x , в которой $x_i > x_j$, предпочтительнее, чем x^{ij} » следует из предпочтительности критерия f_i относительно f_j и условия $x_i > x_j$.

¹ PATTERN (от англ. Planning Assistance Through Technical Evaluation from Relevans Number) поддержка планирования посредством относительных показателей технической оценки.

Действительно, пусть критерий f_i важнее критерия f_j , т.е. для количественных весов справедливо неравенство: $w_i > w_j$. Очевидно, векторы x и x^{ij} несравнимы по предпочтительности, однако в силу однородности шкалы измерения в задачах векторной оптимизации они сравнимы по аддитивной свёртке [5]:

$$F(x, w) = \sum_{s=1}^m w_s x_s,$$

где $w_s = w(f_s)$ – количественный вес критерия f_s , $s = 1, m$; $x = (x_1, \dots, x_s, \dots, x_m)$.

Агрегированные оценки векторов x и x^{ij} представляются в виде:

$$F(x, w) = w_i x_i + w_j x_j + \sum_{\substack{s=1, \\ s \neq j, s \neq i}}^m w_s x_s. \quad F(x^{ij}, w) = w_i x_j + w_j x_i + \sum_{\substack{s=1, \\ s \neq j, s \neq i}}^m w_s x_s.$$

Разность $F(x, w) - F(x^{ij}, w)$ агрегированных оценок x и x^{ij} имеет вид:

$$F(x, w) - F(x^{ij}, w) = (w_i x_i + w_j x_j) - (w_i x_j + w_j x_i) = (w_i - w_j)(x_i - x_j) > 0,$$

т.е. векторная оценка x , в которой $x_i > x_j$, предпочтительнее, чем x^{ij} в силу предпочтительности критерия f_i над критерием f_j .

В работе [14] в качестве количественных весов предлагается использовать числовую последовательность П. Фишберна [15]:

$$w_i = \frac{2(m+1-i)}{m(m+1)}, \quad (1)$$

где i – номер критерия в порядке убывания его важности, при этом $\sum_{i=1}^m w_i = 1$.

В работе [16] предложена формула для вычисления задающих коэффициентов в виде:

$$a_{ns} = \begin{cases} \frac{1}{n^2} & \text{при } s = 1, \\ \frac{C_s + 2n - 1}{n^2(n-1)} & \text{при } 1 < s \leq n, \end{cases} \quad (2)$$

где s - группа важности, a_{ns} – универсальные коэффициенты важности в политике выбора для n критериев, в которой каждая группа важности включает ровно один критерий. Задающий параметр C_s для $n = 2, 3, 4, \dots, 10$ принимает значения $0, 6, 18, \dots, 216$.

В силу того, что нормированные веса частных критериев характеризуют долю вклада в обобщённый критерий и формируются обычно методами экспертного оценивания [8], то вследствие этого формулы (1) и (2) не могут быть применимы в качестве весов критериев, связанных с различными предметными областями решаемых многокритериальных задач.

Таким образом, предпочтительность одного критерия относительно другого, а также их количественные веса не зависят от векторных оценок объектов и определяются экспертами. В дальнейшем для оценки количественной важности критериев используется определение 1.

2 Алгоритм метода

В основе вычисления весов критериев метода косвенных предпочтений (МКП) лежит предварительная процедура упорядочения критериев, представленных в виде иерархического дерева. Процедура базируется на экспертном выявлении косвенной предпочтительности одного критерия относительно другого смежного критерия на каждом уровне иерархии при предположении о неизвестности количественных значений важности. Алгоритм рассматриваемого метода состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Построение иерархического дерева упорядоченных критериев по убыванию предпочтительности. На этом шаге эксперты ранжируют по убыванию важности критерии, входящие в вершины более высокого уровня иерархического дерева. При наличии нескольких

экспертов, участвующих в ранжировании, находится результирующее ранжирование (медиана Кемени), метод формирования которого представлен в работе [17].

Для деревьев в основном применяются два способа перечисления: «по ветвям», когда индекс вершины указывает путь к этой вершине; «по уровням», когда по очереди рассматриваются все уровни сверху вниз, а вершины одного уровня нумеруются подряд слева направо. Способом перечисления «по ветвям» дерево задаётся в виде множества упорядоченных вершин [18]:

$$ID = \{\mathfrak{F}, \mathcal{D}\},$$

где $\mathfrak{F} = \{F_0, F_{j_1}, \dots, F_{j_1 \dots j_k} \mid j_k = \overline{1, n_{j_1 \dots j_{k-1}}}; k = \overline{1, n_{\mathfrak{F}}}\}$ – множество вершин (критериев), в которых индекс $j_1 \dots j_k$ вершины $F_{j_1 \dots j_k}$ указывает путь к этой вершине от корневой вершины F_0 ($k = 0$); $\{0, 1, \dots, k, \dots, n_{\mathfrak{F}}\}$ – номера уровней в дереве;

$\mathcal{D} = \{(F_{j_1 \dots j_{k-1}}, F_{j_1 \dots j_k}) \mid j_k = \overline{1, n_{j_1 \dots j_{k-1}}}; k = \overline{1, n_{\mathfrak{F}}}\}$ – множество дуг, в которых множество вершин $\{F_{j_1 \dots j_k}\}$, инцидентно вершине $F_{j_1 \dots j_{k-1}}$;

F_0 – глобальный (обобщённый) критерий верхнего (нулевого) уровня иерархии;

F_{j_1} – групповые критерии 1-го уровня иерархии, являющиеся концевыми вершинами

множества дуг $\{(F_0, F_{j_1}) \mid j_1 = \overline{1, n_0}\}$; n_0 – число дуг, инцидентных вершине F_0 ;

$F_{j_1 \dots j_k}$ – групповые критерии k -го уровня, являющиеся концевыми вершинами дуг

$\{(F_{j_1 \dots j_{k-1}}, F_{j_1 \dots j_k}) \mid j_k = \overline{1, n_{j_1 \dots j_{k-1}}}\}$; $n_{j_1 \dots j_{k-1}}$ – число дуг, инцидентных вершине $F_{j_1 \dots j_{k-1}}$.

Концевые вершины $n_{\mathfrak{F}}$ -го нижнего уровня условно обозначены строчными $f_{j_1 \dots j_n}$. Каждому \mathcal{E}_s эксперту, где $s = \overline{1, n_{\mathcal{E}}}$, предъявляется множество подкритериев

$$F_{\xi} \equiv F_{j_1 \dots j_{k-1} \xi},$$

на k -м уровне иерархии упорядоченных по убыванию важности и входящих в вершину $F_{j_{k-1}} \equiv F_{j_1 \dots j_{k-1}}$:

$$F_1 > F_2 \succcurlyeq \dots \succcurlyeq F_{\xi} \succcurlyeq \dots \succcurlyeq F_{n_{j_{k-1}}}, \xi = \overline{1, n_{j_{k-1}}}, n_{j_{k-1}} \equiv n_{j_1 \dots j_{k-1}}, \quad (3)$$

где \succcurlyeq – обозначение нестрогого предпочтения, которое означает для пары критериев строгого предпочтения (обозначение $>$) или отношение равнозначности (обозначение \approx).

$\{F_{j_1 \dots j_{k-1} 1}, \dots, F_{j_1 \dots j_{k-1} n_{j_1 \dots j_{k-1}}}\}$ – множество подкритериев $(k - 1)$ -го уровня, входящих в вершину $F_{j_1 \dots j_k}$ k -го уровня; $j_k = \overline{1, n_{j_1 \dots j_{k-1}}}; k = \overline{1, n_{\mathfrak{F}}}$. Подкритерии, входящие в вершины более высокого уровня, упорядочиваются по важности:

$$F_{j_1 \dots j_{k-1} 1} \succcurlyeq \dots \succcurlyeq F_{j_1 \dots j_{k-1} n_{j_1 \dots j_{k-1}}} \quad \forall j_k = \overline{1, n_{j_1 \dots j_{k-1}}}; k = \overline{1, n_{\mathfrak{F}}}.$$

Шаг 2. Экспертное оценивание степеней превосходства смежных критериев на k -м уровне иерархического дерева в шкале отношений. Эксперту предъявляется множество подкритериев $F_{\xi} \equiv F_{j_1 \dots j_{k-1} \xi}$, на k -м уровне иерархии упорядоченных по убыванию важности и входящих в вершину $F_{j_{k-1}} \equiv F_{j_1 \dots j_{k-1}}$ (см. выражение (3)).

Результаты сравнения $w_{\xi, \xi+1} \approx \frac{wl_{\xi}}{wl_{\xi+1}}$ смежных пар подкритериев $\{F_{\xi}, F_{\xi+1}\}$ на k -м уровне иерархии, входящих в вершину $F_{j_{k-1}} \equiv F_{j_1 \dots j_{k-1}}$, локальные веса $wl_{\xi} = wl(F_{\xi})$ которых заранее неизвестны, представляются в виде $(n_{j_{k-1}} - 1)$ наддиагональных элементов

$$(w_{12}^*, w_{23}^*, \dots, w_{\xi, \xi+1}^*, \dots, w_{n_{j_{k-1}}-1, n_{j_{k-1}}}^*) \quad (4)$$

квадратной матрицы попарного сравнения смежных подкритериев $\{F_{\xi}, F_{\xi+1}\}$ $W_{F_{j_{k-1}}} [w_{\xi, \xi+1}]$:

$$W_{F_{j_{k-1}}} = \begin{pmatrix} 1 & w_{1,2}^* & 0 & \dots & 0 \\ 1/w_{1,2}^* & 1 & w_{2,3}^* & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1/w_{n_{j_{k-1}}-1, n_{j_k}}^* & w_{n_{j_{k-1}}-1, n_{j_k}}^* \\ & & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

При этом количественная оценка $w_{\xi, \xi+1}$ означает, что эксперт считает критерий F_ξ важнее критерия $F_{\xi+1}$ ($F_\xi > F_{\xi+1}$) в $w_{\xi, \xi+1} \approx wl_\xi / wl_{\xi+1}$ раз, если $w_{\xi, \xi+1} > 1$, а при $w_{\xi, \xi+1} = 1$ критерии равнозначны ($F_\xi \approx F_{\xi+1}$).

Исходя из свойства обратной симметрии, равенство $w_{\xi+1, \xi} = \frac{1}{w_{\xi, \xi+1}} < 1$, означает, что количественно критерий $F_{\xi+1}$ в $w_{\xi+1, \xi}$ раз менее важен критерия F_ξ .

При таком подходе достаточно всего лишь $(n_{j_{k-1}} - 1)$ -го экспертного сравнения вместо $\frac{(n_{j_{k-1}})^2 - n_{j_{k-1}}}{2}$ при попарном сравнении как, например, в методе анализа иерархий (МАИ) Т. Саати [1].

Шаг 3. Формирование элементов столбцов матрицы коэффициентов важности критериев. По экспертным оценкам (4) предпочтительности смежных критериев, входящих в вершину критерия более высокого уровня иерархического дерева, формируются элементы столбцов матрицы $W_{F_{j_{k-1}}}$ (5):

$$w_{\xi}^\downarrow = \left(w_{1\xi}, w_{2\xi}, \dots, w_{\eta\xi}, \dots, w_{n_{j_{k-1}}\xi} \right) \quad \forall \xi = \overline{1, n_{j_{k-1}}}. \quad (6)$$

Любой элемент произвольного столбца матрицы можно вычислить по экспертным оценкам относительно критерия, принимаемого за базовый, которому соответствует единичный элемент $w_{\xi\xi} = 1$ на главной диагонали матрицы.

Теорема 1. Пусть даны экспертные оценки $w_{\xi, \xi+1}^*$, $\xi = \overline{1, n_{j_{k-1}} - 1}$, предпочтительности смежных подкритериев F_ξ на k -м уровне, входящие в вершину $F_{j_{k-1}}$ на $(k - 1)$ -м уровне иерархии. Тогда любой элемент столбца матрицы $W_{F_{j_{k-1}}}$ (4) может быть вычислен по элементам оценок, расположенным над главной диагональю матрицы по формуле:

$$w_{\eta\xi} = \begin{cases} \prod_{t=\eta}^{\xi-1} w_{t, t+1}^*, \eta < \xi, \forall \eta = \overline{1, \xi - 1}, \\ 1, \quad \forall \eta = \xi, \\ \left(\prod_{t=\xi}^{\eta-1} w_{t, t+1}^* \right)^{-1}, \eta > \xi, \forall \eta = \overline{\xi + 1, n_{j_{k-1}}}. \end{cases} \quad (7)$$

Доказательство. Действительно, для номеров строк $\eta < \xi$ можно записать:

$$w_{\eta\xi} = \prod_{t=\eta}^{\xi-1} w_{t, t+1}^* = \frac{wl_\eta}{wl_{\eta+1}} \times \frac{wl_{\eta+1}}{wl_{\eta+2}} \times \dots \times \frac{wl_{\xi-2}}{wl_{\xi-1}} \times \frac{wl_{\xi-1}}{wl_\xi} = \frac{wl_\eta}{wl_\xi},$$

аналогично для номеров строк $\eta > \xi$ можно записать:

$$w_{\eta\xi} = \left(\prod_{t=\xi}^{\eta-1} w_{t, t+1}^* \right)^{-1} = \left(\frac{wl_\xi}{wl_{\xi+1}} \times \frac{wl_{\xi+1}}{wl_{\xi+2}} \times \dots \times \frac{wl_{\eta-2}}{wl_{\eta-1}} \times \frac{wl_{\eta-1}}{wl_\eta} \right)^{-1} = \left(\frac{wl_\xi}{wl_\eta} \right)^{-1} = \frac{wl_\eta}{wl_\xi},$$

что и требовалось доказать.

Пример 1. Пусть для четырёх упорядоченных по важности $f_1 > f_2 > f_3 > f_4$ критериев известны количественные веса $wl(f_1) = 4$, $wl(f_2) = 3$, $wl(f_3) = 2$, $wl(f_4) = 1$.

Их нормированные веса имеют значения 0,4; 0,3; 0,2 и 0,1. Пусть локальные веса заранее неизвестны, но эксперт результаты сравнения смежных пар представил в виде:

$$w_{12} \approx \frac{4}{3}, w_{23} \approx \frac{3}{2}, w_{34} \approx \frac{2}{1},$$

которые приняты за наддиагональные элементы матрицы. С учётом обратной симметрии матрицу можно представить в виде

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 4/3^* & 0 & 0 \\ 3/4^* & 1 & 3/2^* & 0 \\ 0 & 2/3^* & 1 & 2^* \\ 0 & 0 & 1/2^* & 1 \end{pmatrix}.$$

Остальные элементы столбцов $w_j^\downarrow = (w_{1j}, w_{2j}, w_{3j}, w_{4j})^T, j = \overline{1, 4}$, матрицы вычисляются по формулам, в которые обязательно входят наддиагональные элементы:

$$w_1^\downarrow: w_{31} = w_{32}w_{21} = \frac{2^*}{3} \cdot \frac{3^*}{4} = \frac{1}{2};$$

$$w_{41} = w_{43}w_{31} = \frac{1^*}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4};$$

$$w_2^\downarrow: w_{42} = w_{43}w_{32} = \frac{1^*}{2} \cdot \frac{2^*}{3} = \frac{1}{3};$$

$$w_3^\downarrow: w_{31} = w_{23}w_{12} = \frac{3^*}{2} \cdot \frac{4^*}{3} = 2;$$

$$w_4^\downarrow: w_{14} = w_{12}^*w_{23}^*w_{34}^* = \frac{4^*}{3} \cdot \frac{3^*}{2} \cdot 2^* = 4;$$

$$w_{24} = w_{23}^*w_{34}^* = \frac{3^*}{2} \cdot 2^* = 3.$$

В результате получается матрица:

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 4/3^* & 2 & 4 \\ 3/4^* & 1 & 3/2^* & 3 \\ 1/2 & 2/3^* & 1 & 2^* \\ 1/4 & 1/3 & 1/2^* & 1 \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Замечание 2. Можно убедиться, что ранг матрицы W (8) равен 1, и она является мультипликативной, например, для элемента w_{14} матрицы (8) справедливо $w_{14} = w_{13}w_{34} = w_{12}w_{24}$.

Матрица $W_{F_{j_{k-1}}}$ (4) с вычисленными элементами по формуле $w_{\eta\xi}$ (7) называется полной матрицей.

Шаг 4. Формирование локальных коэффициентов важности критериев. За локальные коэффициенты принимаются нормированные элементы любого столбца матрицы $W_{F_{j_{k-1}}}$, вычисленные по формуле (7). Можно доказать, что нормированные элементы полной матрицы совпадают между собой и равны нормированным локальным весам критериев.

Теорема 2 (о взаимосвязи между нормированными элементами полной матрицы и нормированными весами критериев). *Нормированные элементы столбцов w_ξ^\downarrow (6), $\xi = \overline{1, n_{j_{k-1}}}$, вычисленные по наддиагональным элементам по формуле $w_{\eta\xi}$ (6) матрицы $W_{F_{j_{k-1}}}$ (4), совпадают между собой и равны нормированным весам критериев, т.е.*

$$\tilde{w}_\xi^\downarrow = \begin{pmatrix} \tilde{w}_{1\xi} \\ \dots \\ \tilde{w}_{n_{j_{k-1}}\xi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{w}l_1 \\ \dots \\ \tilde{w}l_{n_{j_{k-1}}} \end{pmatrix} \forall \xi = \overline{1, n_{j_{k-1}}},$$

где $\tilde{w}_{\eta\xi} = \frac{w_{\eta\xi}}{\sum_{\eta=1}^n w_{\eta\xi}}$ – нормированный элемент ξ -го столбца w_ξ^\downarrow ;

$$\widetilde{wl}_\eta = \frac{wl_\eta}{\sum_{\eta=1}^{n_{j_{k-1}}} wl_\eta} - \text{нормированный вес } F_\eta \text{ локального критерия.}$$

Доказательство. Из формулы (6) следует, что для полной матрицы для любого столбца w_{ξ}^\downarrow (5), $\xi = \overline{1, n_{j_{k-1}}}$ справедливо $w_{\eta\xi} = \frac{wl_\eta}{wl_\xi}$, $\eta = \overline{1, n_{j_{k-1}}}$. Откуда

$$\widetilde{w}_{\eta\xi} = \frac{wl_\eta/wl_\xi}{\sum_{\eta=1}^n wl_\eta/wl_\xi} = \frac{wl_\eta}{\sum_{\eta=1}^n wl_\eta} = \widetilde{wl}_\eta \quad \forall \eta, \xi = \overline{1, n_{j_{k-1}}},$$

что и требовалось доказать.

Если в примере 1 пронормировать столбцы матрицы W (8), то они совпадут между собой и будут равны нормированным весам критериев:

$$W = \begin{pmatrix} 0,4 & 0,4 & 0,4 & 0,4 \\ 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, за коэффициенты важности критериев можно взять нормированные элементы любого столбца, которые вычисляются по наддиагональным элементам матрицы попарных сравнений смежных критериев.

При решении прикладных задач проще использовать элементы последнего столбца матрицы, которые можно вычислить через произведения $w_{\xi, \xi+1}^*$, $\xi = \overline{1, n_{j_{k-1}} - 1}$ экспертных оценок по формуле:

$$w_{\eta, n_{j_{k-1}}} = \begin{cases} \prod_{t=\eta}^{n_{j_{k-1}}-1} w_{t, t+1}^*, & \eta < n_{j_{k-1}}, \\ 1, & \eta = n_{j_{k-1}}, \end{cases}$$

а затем нормировать и принять за коэффициенты важности критериев.

Из примера 1 видно, что по формуле $w_{\eta, n_{j_{k-1}}}$ легко вычисляются элементы столбца w_4^\downarrow .

Шаг 5. Формирование глобальных коэффициентов важности критериев. Глобальные коэффициенты формируются путём вычисления произведения локальных коэффициентов вершин, лежащих на пути от корневой вершины F_0 к произвольной конечной вершине.

Пусть веса $wl_{j_1 j_2 \dots j_k}$ нормированы, т.е. их сумма по всем подвершинам произвольной вершины $F_{j_1 \dots j_{k-1}}$ равна единице:

$$\sum_{j_k=1}^{n_{j_1 \dots j_{k-1}}} wl(F_{j_1 j_2 \dots j_k}) = 1 \quad \forall k = \overline{1, n}.$$

Произведение весов вершин, лежащих на пути от корневой вершины F_0 к произвольной конечной вершине $f_{j_1 j_2 \dots j_n}$, будет представлять собой интегральный (глобальный) вес $wg(f_{j_1 j_2 \dots j_n})$ данной конечной вершины:

$$wg(f_{j_1 j_2 \dots j_n}) = wl(F_{j_1}) \cdot \dots \cdot wl(f_{j_1 j_2 \dots j_n}) = \prod_{k=1}^n wl(F_{j_1 j_2 \dots j_k}),$$

где $j_n = \overline{1, n_{j_1 \dots j_{n-1}}}$; \dots ; $j_k = \overline{1, n_{j_1 \dots j_{k-1}}}$; \dots ; $j_1 = \overline{1, n_0}$.

Тогда постановку многокритериальной задачи оценки объектов с многоуровневой структурой можно представить в виде аддитивной свёртки:

$$r_\Sigma^{(l)} = \sum_{j_1=1}^{n_0} \sum_{j_2=1}^{n_{j_1}} \dots \sum_{j_n=1}^{n_{j_1 j_2 \dots j_{n-1}}} wg_{j_1 j_2 \dots j_n} r_{j_1 j_2 \dots j_n}^{(l)} \quad (9)$$

где $r_{j_1 j_2 \dots j_n}^{(l)} = f_{j_1 j_2 \dots j_n}(a_l)$ – оценка $a_l \in A$ объекта в конечной вершине $f_{j_1 j_2 \dots j_n}$ дерева ID в результирующей однородной шкале.

Решение задачи можно представить в виде упорядочения объектов в соответствии с зна-

чениями агрегированных оценок:

$$a_{q_1} \geq \dots \geq a_{q_{n_A}} \Leftrightarrow r_{\Sigma}^{(q_1)} \geq \dots \geq r_{\Sigma}^{(q_{n_A})}.$$

В качестве примера на рисунке 1 представлено трёхуровневое иерархическое дерево упорядоченных по важности критериев, где веса обозначены в виде:

$$wl_{j_1} = wl(F_{j_1}), j_1 = \overline{1, m};$$

$$wl_{j_1 j_2} = wl(f_{j_1 j_2}), j_2 = \overline{1, n_{j_1}}.$$

Замечание 3. Глобальные коэффициенты, вычисляемые на шаге 5 данного метода, аналогично вычисляются и в методе ПАТТЕРН [2] и в МАИ [1]. При этом глобальный вес конечного критерия в иерархическом дереве характеризует (относительную) долю, которую он вносит в глобальный критерий верхнего (нулевого) уровня иерархии.



Рисунок 1 – Трёхуровневое иерархическое дерево критериев оценки объектов

3 Анализ эффективности методов, базирующихся на матрицах парных сравнений

Для сравнения методов используются данные из работы [19], в которой оцениваются сравнительные расстояния между городами Каир, Токио, Чикаго, Сан-Франциско, Лондон, Монреаль. Матрица парных сравнений получена методом экспертных оценок [19]:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 8 & 3 & 3 & 7 \\ 3 & 1 & 9 & 3 & 3 & 9 \\ 1/8 & 1/9 & 1 & 1/6 & 1/5 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 6 & 1 & 1/3 & 6 \\ 1/3 & 1/3 & 5 & 3 & 1 & 6 \\ 1/7 & 1/9 & 1/2 & 1/6 & 1/6 & 1 \end{pmatrix}.$$

Упорядочив города в виде Токио, Каир, Лондон, Сан-Франциско, Чикаго, Монреаль по убыванию расстояния по методу данной работы, можно сравнить расстояния между смежными парами городов Токио-Каир, Каир-Лондон, Лондон-Сан-Франциско, Сан-Франциско-Чикаго, Чикаго-Монреаль, результаты которого можно представить наддиагональными элементами {1,2; 1,6; 1,5; 2,9; 1,2} мультипликативной матрицы $W_{МКП}$ и вычисленными элементами правого столбца:

$$W_{МКП} = \begin{pmatrix} 1 & 1,2 & 0 & 0 & 0 & 10,02 \\ 0 & 1 & 1,6 & 0 & 0 & 8,35 \\ 0 & 0 & 1 & 1,5 & 0 & 5,22 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2,9 & 3,48 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

нормированные элементы которого принять за количественные веса расстояний и представить в виде вектора: $w_{МКП} = (0,342; 0,285; 0,178; 0,119; 0,041; 0,034)$.

Поскольку по нормированным элементам весов критериев восстанавливаются все элементы $w_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ мультипликативной матрицы, то за критерий сравнения принимается матричный критерий близости восстановленной мультипликативной матрицы W к исходной матрице A в виде матричной l_1 -норма [20]:

$$d(A, W) = \|A - W\|_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left| a_{ij} - \frac{w_i}{w_j} \right|. \quad (10)$$

Мультипликативная матрица обладает особым свойством – любой элемент можно представить через произведение пары других

$$w_{ij} = w_{ik} w_{kj}, \forall i, j, k = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где $w_{ji} = \frac{1}{w_{ij}}$; $w_{ii} = 1, i, j = \overline{1, n}$.

Можно показать взаимосвязь между нормированными элементами важности критериев и элементами восстановленной мультипликативной матрицы.

Теорема 3. Между любыми элементами w_{ij} мультипликативной матрицы $W = [w_{ij}] \forall i, j = \overline{1, n}$ и любой парой компонент (w_i, w_j) вектора важности критериев $w = (w_1, \dots, w_j, \dots, w_n)^T, j = \overline{1, n}$ справедливо биективное отображение $\frac{w_i}{w_j} \mapsto w_{ij}$, ставящее каждому отношению $\frac{w_i}{w_j}$ в однозначное соответствие элемент w_{ij} матрицы W , и обратно $w_{ij} \mapsto \frac{w_i}{w_j}$, при этом справедливо равенство:

$$w_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, \forall i, j = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Доказательство. Так как матрица $W = [w_{ij}]$ мультипликативная, то если для любой пары чисел (w_i, w_j) из $\{w_1, \dots, w_n\}$, представленных в виде отношения $\frac{w_i}{w_j}, w_j > 0$, выполняется условие мультипликативности (11), то между любыми элементами матрицы $W = [w_{ij}], w_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$, существует взаимно однозначное отображение между элементами w_{ij} и $\frac{w_i}{w_j}$. Действительно, если $w_{ik} = \frac{w_i}{w_k}$ и $w_{kj} = \frac{w_k}{w_j}$, то согласно (12): $w_{ik} w_{kj} = \frac{w_i}{w_k} \times \frac{w_k}{w_j} = \frac{w_i}{w_j} = w_{ij}$, т.е. для всех $i, j, k = \overline{1, n}$ выполняется условие мультипликативности (11), что и требовалось доказать.

Представленный МКП нахождения весов по парным смежным $(n - 1)$ сравнениям можно сравнить с МАИ [1], методом наименьших квадратов (МНК) [21] и методом аппроксимационной матрицы (МAM) [22].

По МАИ решением служит нормированный собственный вектор матрицы A , соответствующий максимальному собственному значению. По МНК в качестве искомого вектора w принимается решение оптимизационной задачи [21]:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} w_j - w_i)^2 \rightarrow \min$$

при ограничениях $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ и $w_i > 0$ для всех $i = \overline{1, n}$.

Эти методы трудоёмки, и для построения матрицы A необходимо проведение $(n^2 - n)/2$ попарных сравнений. В МАИ для числа объектов не менее пяти процедура нахождения собственных значений матрицы степеней превосходства важностей критериев или предпочтений альтернатив осуществляется с применением численных методов нахождения корней полинома, реализованных в [23]. По МAM в качестве искомого вектора w принимается решение оптимизационной задачи [22]:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\tilde{a}_{ij} - \tilde{w}_i)^2 \rightarrow \min_{(\tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_n)}, \quad (13)$$

где $\tilde{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$ – нормированные элементы матрицы суждений $A = [a_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$;

$\tilde{w}_i = \tilde{w}_{i\xi}$ – нормированный элемент ξ -го столбца мультипликативной матрицы, совпадающий с любым элементом нормированного столбца (см. теорему 2).

Исходные данные для сравнения методов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Нормализованные относительные расстояния

Город	1				
	$w_{ИР}$	$w_{МАИ}$	$w_{МНК}$	$w_{МАМ}$	$w_{МКП}$
1	2	3	4	5	6
Токио	0,361	0,397	0,459	0,389	0,342
Каир	0,278	0,263	0,221	0,255	0,285
Лондон	0,177	0,164	0,141	0,167	0,178
Сан-Франциско	0,132	0,116	0,107	0,126	0,119
Чикаго	0,032	0,033	0,036	0,036	0,041
Монреаль	0,019	0,027	0,036	0,028	0,034

В столбцах 2 – 6 таблицы 1 представлены нормализованные относительные расстояния, где в столбце 2 – истинные нормализованные относительные расстояния, $w_{ИР}$; 3 – расстояния по МАИ, $w_{МАИ}$; 4 – расстояния по МНК, $w_{МНК}$; 5 – расстояния по МАМ, $w_{МАМ}$; 6 – расстояния по МКП, $w_{МКП}$. Данные в столбцах 2, 3 и 4 взяты из работы [19, с.188].

Результаты сравнений по критерию $d(A, W)$ (10) близости к исходной матрице парных сравнений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты сравнений по критерию $d(A, W)$

Метод	ИР	МАИ	МНК	МАМ	МКП
$d(A, W)$	36,41	24,62	29,22	23,10	20,26

Эффективность методов можно оценить по критерию близости между векторами:

$$d(w_i, w_j) = \sum_{k=1}^n |w_i^{(k)} - w_j^{(k)}|.$$

Результаты сравнения представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты сравнений по критерию $d(w_i, w_j)$

Метод	МАИ	МНК	МАМ	МКП
$d(w_{ИР}, w_j)$	0,089	0,237	0,080	0,064

Таким образом, методы, базирующиеся на матрице парных сравнений, можно ранжировать по убыванию эффективности: МКП > МАМ > МАИ > МНК.

Замечание 4. Преимущество МКП относительно методов, базирующихся на матрице парных сравнений, в том, что этап построения иерархического дерева упорядоченных критериев по убыванию важности позволяет снизить число экспертных смежных пар сравнений критериев до $(n - 1)$ по сравнению с числом при парном сравнении $(n^2 - n)/2$.

4 Пример решения задачи многокритериального оценивания

Эффективность МКП можно рассмотреть на примере решения многокритериальной задачи сравнения боевых самолётов по тактико-техническим характеристикам (ТТХ), принимавших участие в индийском тендере MMRCA [24]. Исходные данные по девяти показателям

в виде множества $F = \{f_1, \dots, f_9\}$ и оценки $x_j^{(l)} = f_j(C_l)$ шести самолётов в виде множества $C = \{C_1, \dots, C_6\}$ представлены в таблице 4, где приняты обозначения самолётов: C_1 – Dassault Rafale; C_2 – Eurofighter Typhoon; C_3 – F-16IN Super Viper; C_4 – F/A-18E/F Super Hornet; C_5 – JAS 39 NG (IN); C_6 – МиГ-35. Эталонные самолёты обозначены: C_* – наихудший по показателям ТТХ и стоимости (эталон – худший вариант); C^* – наилучший по показателям ТТХ и стоимости (эталон – лучший вариант).

Таблица 4 – ТТХ самолётов, участвовавших в тендере

Показатели ТТХ	Оценки самолётов в исходных шкалах, $x_i^{(l)} = f_i(C_l)$						Эталоны	
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_*	C^*
f_1 - боевая нагрузка, т	9,5	7,5	7,8	8,05	5,3	7,0	5,3	9,5
f_2 - управляемый вектор тяги	нет	нет	нет	нет	нет	есть	нет	есть
f_3 - скороподъёмность, м/с	305	315	254	228	255	330	228	330
f_4 - максимальная взлётная масса, т	24,5	23,5	21,8	29,9	14,3	23,5	14,3	29,9
f_5 - максимальное число Маха на высоте	1,80	2,25	2,00	1,80	2,00	2,25	1,80	2,25
f_6 - практический потолок, км	15,24	19,81	18,00	15,00	15,24	17,50	15,00	19,81
f_7 - стоимость, млн. \$ (2011 г.)	124	120	50	55	48	45	124	45
f_8 - тяговооружённость	1,03	1,18	1,10	0,93	1,18	1,10	0,93	1,18
f_9 - масса топлива, т	4,70	5,00	3,37	6,78	3,36	4,80	3,36	6,78

В соответствии с шагом 1 алгоритма представленные в таблице 4 показатели используются как критерии. Пусть эксперты разбили критерии на три группы по предпочтительности: F_1 – целевая эффективность; F_2 – техническая эффективность и F_3 – технико-экономическая эффективность:

$$F_0: F_1 > F_2 > F_3.$$

В каждой группе подкритерии также упорядочены по убыванию важности:

$$F_1: f_{11} > f_{12} > f_{13}; F_2: f_{21} > f_{22} > f_{23}; F_3: f_{31} > f_{32} \approx f_{33}.$$

На рисунке 2 представлено трёхуровневое иерархическое дерево.

В соответствии с шагами 2 и 3 представлены матрицы попарных смежных сравнений и вычисленные правые столбцы:

$$F_0: W_0 = \begin{pmatrix} 1 & 5/3 & 5/2 \\ 0 & 1 & 3/2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$F_1: W_1 = \begin{pmatrix} 1 & 4/3 & 4/3 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$F_2: W_2 = \begin{pmatrix} 1 & 8/7 & 8/6 \\ 0 & 1 & 7/6 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$F_3: W_3 = \begin{pmatrix} 1 & 9/8 & 9/8 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

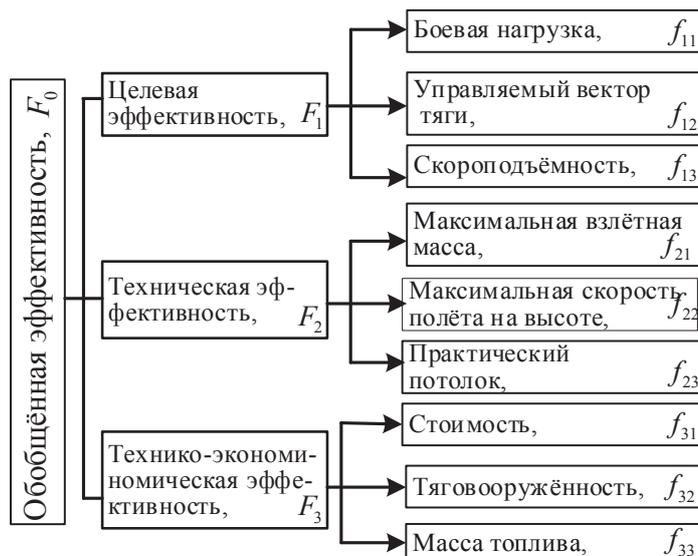


Рисунок 2 – Иерархическое дерево критериев оценки эффективности самолётов

В соответствии с шагом 4 сформированы локальные коэффициенты важности критериев:

$$\begin{aligned} F_0: & wl_1 = 0,5; wl_2 = 0,3; wl_3 = 0,2; \\ F_1: & wl_{11} = 0,4; wl_{12} = 0,3; wl_{13} = 0,3; \\ F_2: & wl_{21} = 0,38; wl_{22} = 0,33; wl_{23} = 0,29. \\ F_3: & wl_{31} = 0,36; wl_{32} = 0,32; wl_{33} = 0,32. \end{aligned}$$

Глобальные коэффициенты важности критериев на шаге 5 формируются путём вычисления произведения локальных коэффициентов вершин, лежащих на пути от корневой вершины F_0 к произвольной концевой вершине.

$$\begin{aligned} F_1: & wg_{11} = 0,5 \times 0,40 = 0,20; wg_{12} = 0,5 \times 0,3 = 0,15; wg_{13} = 0,5 \times 0,3 = 0,15; \\ F_2: & wg_{21} = 0,3 \times 0,38 = 0,114; wg_{22} = 0,3 \times 0,33 = 0,099; wg_{23} = 0,3 \times 0,29 = 0,087. \\ F_3: & wg_{31} = 0,2 \times 0,36 = 0,072; wg_{32} = 0,2 \times 0,32 = 0,064; wg_{33} = 0,2 \times 0,32 = 0,064. \end{aligned}$$

Поскольку исходные данные представлены в различных шкалах измерения, то для применения аддитивного механизма агрегирования необходимо перейти к результирующей однородной шкале [19]. Правило перехода π_i от исходных оценок $x_i^{(l)}$ самолётов в количественной шкале по f_i критерию к $r_i^{(l)}$ оценкам в результирующей балльной шкале можно представить в виде множественно-точечного отображения:

$$\pi_i: [f_{i*} + (r-1)h_i, f_{i*} + rh_i] \rightarrow r,$$

где $h_i(m) = \frac{f_i^* - f_{i*}}{m}$ – шаг дискретизации шкалы f_i критерия, f_{i*} – минимальное значение, f_i^* – максимальное значение критерия;

$X_{i,r} = [x_{r-1}, x_r] = [f_{i*} + (r-1)h_i, f_{i*} + rh_i]$ – отрезки разбиения исходной шкалы;

$r \in R = \{1, 2, \dots, b\}$ – градации результирующей шкалы;

b – число шкальных градаций в порядковой (балльной) шкале.

При этом каждой оценке, попадающей в класс $X_{i,r}$ разбиения ставится в соответствие оценка $r_i^{(l)}$ в результирующей шкале по правилу: $x_i^{(l)} \xrightarrow{\pi_i} r_i^{(l)}$. В случае попадания оценки объекта на смежные классы ей присваивается связанный ранг, равный среднему арифметическому значению смежных рангов [25]: $x_i^{(l)} \xrightarrow{\pi_i} \bar{r}_i^{(l)} = \frac{r+(r+1)}{2}$, если $x_i^{(l)} \in X_{i,r} \cap X_{i,r+1}$.

В качестве механизма агрегирования оценок самолётов, представленных в результирующей шкале, применён интегральный метод с учётом весов и без учёта в виде аддитивной свёртки оценок $a_q, q = 1 \div 6$, по концевым критериям с весами важности в виде [26]:

$$F(a_i; wg_1, \dots, wg_m) = \sum_{j=1}^m wg(f_j)r_i^{(l)}, \quad (14)$$

где $r_i^{(l)} = f_i(a_i)$ – оценка самолёта $a_i \in A = \{a_l | l = \overline{1, n_A}\}, n_A = 6$ в результирующей шкале по критерию $f_i, i = \overline{1, m}, m = 9$; $wg_i = wg(f_i)$ – глобальный вес f_i критерия.

В таблице 5 представлены ТТХ самолётов в 100-балльной результирующей шкале, где $\vec{r}_l = (r_1^{(l)}, r_2^{(l)}, \dots, r_i^{(l)}, \dots, r_9^{(l)})$ – профиль C_l самолёта, $l = 1 \div 9$, а также результат агрегирования без учёта весов критериев (в последней строке таблицы).

Ранжирование самолётов по обобщённым оценкам без учёта весов критериев можно представить в виде:

$$\{\text{МиГ} - 35\} > \{\text{Eurofighter}\} > \left\{ \begin{array}{l} \text{F} - 16 \text{ IN} \\ \text{Super Viper} \end{array} \right\} > \left\{ \begin{array}{l} \text{F/A 18E/F} - \\ \text{Super Hornet} \end{array} \right\} > \left\{ \begin{array}{l} \text{Dassault} \\ \text{Rafale} \end{array} \right\} > \left\{ \begin{array}{l} \text{JAS 39} \\ \text{NG (IN)} \end{array} \right\}.$$

Результаты агрегирования с учётом глобальных весов по формуле (14) представлены в таблице 6, а также на рисунке 3.

Таблица 5 - Оценки самолётов в однородной 100-балльной шкале без учёта весов критериев

Показатели	Оценки самолётов в однородной 100-балльной шкале, $r_i^{(l)} = \pi_i(x_i^{(l)})$						Эталоны	
	\vec{r}_1	\vec{r}_2	\vec{r}_3	\vec{r}_4	\vec{r}_5	\vec{r}_6	\vec{r}_*	\vec{r}^*
$f_1 \equiv f_{11}$	100	53	60	66	1	41	1	100
$f_2 \equiv f_{12}$	1	1	1	1	1	100	1	100
$f_3 \equiv f_{13}$	76	86	26	1	27	100	1	100
$f_4 \equiv f_{21}$	66	59	49	100	1	59	1	100
$f_5 \equiv f_{22}$	1	100	45	1	45	100	1	100
$f_6 \equiv f_{23}$	5	100	63	1	5	52	1	100
$f_7 \equiv f_{31}$	1	6	94	88	97	100	1	100
$f_8 \equiv f_{32}$	40	100	68,5	1	100	68,5	1	100
$f_9 \equiv f_{33}$	40	48	1,0	100	1	43	1	100
$r_{\Sigma}^{(l)} = \sum_{i=1}^9 r_i^{(l)}$	330,0	553,0	407,5	359,0	278,0	663,5	9	900

Таблица 6 - Показатели самолётов в результирующей шкале с учётом весов критериев

Показатели	Глобальные веса критериев	Оценки самолётов в однородной 100-балльной шкале с учётом весов						Эталоны	
		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_*	C^*
$f_1 \equiv f_{11}$	0,200	20,00	10,60	12,00	13,20	0,20	8,20	0,20	20,00
$f_2 \equiv f_{12}$	0,150	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	15,00	0,15	15,00
$f_3 \equiv f_{13}$	0,150	11,40	12,90	3,90	0,15	4,05	15,00	0,15	15,00
$f_4 \equiv f_{21}$	0,114	7,52	6,73	5,59	11,40	0,11	6,73	0,11	11,40
$f_5 \equiv f_{22}$	0,099	0,10	9,90	4,46	0,10	4,46	9,90	0,10	9,90
$f_6 \equiv f_{23}$	0,087	0,44	8,70	5,48	0,09	0,44	4,52	0,09	8,70
$f_7 \equiv f_{31}$	0,072	0,07	0,43	6,77	6,34	6,98	7,20	0,07	7,20
$f_8 \equiv f_{32}$	0,064	2,56	6,40	4,38	0,06	6,40	4,38	0,06	6,40
$f_9 \equiv f_{33}$	0,064	2,56	3,07	0,06	6,40	0,06	2,75	0,06	6,40
$\sum_{i=1}^9 w g_i r_i^{(l)}$		44,80	58,88	42,79	37,89	22,85	73,69	1,00	100,00

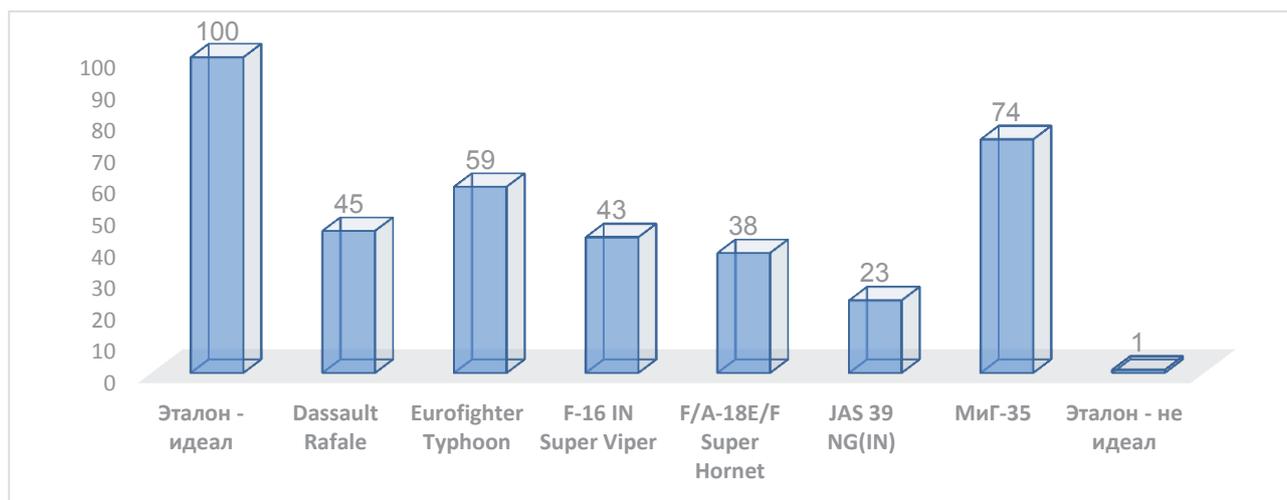


Рисунок 3 – Результат оценивания самолётов в 100-балльной шкале с учётом весов критериев

В этом случае ранжирование самолётов по обобщённым оценкам с учётом весов критериев можно представить в виде:

$$\{\text{МиГ-35}\} > \left\{ \begin{array}{l} \text{Eurofighter} \\ \text{Typhoon} \end{array} \right\} > \left\{ \begin{array}{l} \text{Dassault} \\ \text{Rafale} \end{array} \right\} > \left\{ \begin{array}{l} \text{F-16 IN} \\ \text{Super Viper} \end{array} \right\} > \left\{ \begin{array}{l} \text{F/A 18E/F} \\ \text{Super Hornet} \end{array} \right\} > \left\{ \begin{array}{l} \text{JAS 39} \\ \text{NG (IN)} \end{array} \right\}.$$

На первом месте оказался самолёт МиГ-35, так как по трём показателям у него максимальные баллы. Кроме того, преимущество самолёта связано с наличием управляемого вектора тяги, который отсутствует у других самолётов.

По результатам агрегирования рейтинг боевых самолётов по эффективности представлен в таблице 7. Таким образом, самолёт МиГ-35 оказался лучшим по ТТХ и по стоимости.

Таблица 7 - Рейтинг самолётов по эффективности

№	Самолёт	Балльная оценка		Место в рейтинге	
		Без учёта весов	С учётом весов	Без учёта весов	С учётом весов
1	Dassault Rafale	37	45	5	3
2	Eurofighter Typhoon	60	58	2	2
3	F-16 IN Super Viper	45	43	3	4
4	F/A 18E/F – Super Hornet	40	38	4	5
5	JAS 39 NG(IN)	31	23	6	6
6	МиГ-35	63	59	1	1

Заключение

Основное преимущество предложенного МКП - в его простоте относительно МНК и МАИ, в отсутствии выполнения всех попарных сравнений, число которых нелинейно зависит от исходного числа объектов и равно $(n^2-n)/2$. Снижение числа сравнений смежных пар критериев до значения $(n-1)$ достигнуто за счёт предварительного упорядочения критериев по важности (предпочтительности) и особых свойств матрицы с наддиагональными экспертными оценками критериев, измеренных в шкале отношений.

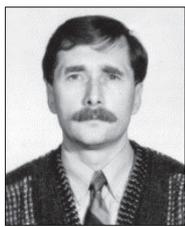
Предложенный метод формирования весов критериев для многокритериальных задачах с многоуровневой структурой может быть использован для решения задач оценивания, ранжирования и построения рейтингов.

Список источников

- [1] Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М.: ЛКИ, 2008. 360 с.
- [2] Лопухин М.М. «ПАТТЕРН» – метод планирования и прогнозирования научных работ. М.: Советское радио, 1971. 160 с.
- [3] Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. New York: Wiley, 1976. 569 p.
- [4] Belton V., Stewart T.J. Multiple criteria decision analysis. An integrated approach. Boston: Cluwer, 2003. 374 p.
- [5] Бормотов А.Н. Обоснование метода формирования весовых коэффициентов критерия практической оптимальности по результатам математического моделирования композитов // Технические науки. 2016. № 8. С.14–18.
- [6] Полищук Л.И. Об обобщённых критериях с коэффициентами важности в задачах векторной оптимизации // Автомат. и телемех. 1982. № 2. С.55–60.
- [7] Зотьев Д.Б. К проблеме определения весовых коэффициентов на основании экспертных оценок // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т.77. № 1. С.75–78.
- [8] Анохин А.М., Глотов В. А., Павельев В. В., Черкашин А.М. Методы определения коэффициентов важности критериев // Автомат. и телемех. 1997. №. 8. С.3–35.
- [9] Дмитриев М.Г., Ломазов В.А. Оценка чувствительности линейной свертки частных критериев при экспертном определении весовых коэффициентов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 1. С.52–56.
- [10] Корнеев В.П. Метод косвенных предпочтений // Обозрение прикладной и промышленной математике. 2008. Т.15. №5. С. 890-891.

- [11] *Pfanzagl J.* Theory of measurement. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1971. 235 p.
- [12] *Подиновский В.В.* Количественная важность критериев // Автомат. и телемех. 2000. № 5. С.110–123.
- [13] *Подиновский В.В.* Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. М.: Наука, 2019. 103 с.
- [14] *Ремесленник Е.С.* Применение последовательностей Фишберна в моделях с количественными факторами // Теория и практика экономики и предпринимательства / Труды XVI Всероссийской с международным участием научно-практической конференции "Теория и практика экономики и предпринимательства" (Симферополь–Гурзуф, 2019). Симферополь: ИП Зуева Т.В., 2019. С. 210–212.
- [15] *Fishburn P. C.* Utility Theory for Decision Making. New York: Wiley, 1970. 234 p.
- [16] *Пиувский С.А.* Формулы для вычисления универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // Онтология проектирования. 2019. Т. 9. № 2(32). С.282-298. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
- [17] *Корнеев В.П.* Оптимизационный метод выбора результирующего ранжирования объектов, представленных в ранговой шкале измерения // Управление большими системами. 2019. Выпуск 82. С.44–60.
- [18] *Корнеев В.П.* Методы многокритериального оценивания объектов с многоуровневой структурой показателей эффективности. М.: МАКС Пресс, 2018. 292 с.
- [19] *Юшманов С.В.* Метод нахождения весов, не требующий полной матрицы попарных сравнений // Автомат. и телемех. 1990. № 2. С. 186-189.
- [20] *Horn R., Johnson Ch.* Matrix analysis. New York: Cambridge University, 1990. 561 p.
- [21] *Chu A., Kalaba RE., Springarn K.* A Comparison of two methods for determining the weights of belonging to fuzzy sets. Journal of Optimization Theory and Applications. 1979. Vol. 27. P.531–538.
- [22] *Корнеев В.П.* Метод аппроксимационной матрицы формирования весов объектов в многокритериальных задачах выбора // Вестник кибернетики. 2021. № 1. С. 51–62.
- [23] Expert Choice. URL: <https://www.expertchoice.com/2021> (дата обращения: 25.04.2023).
- [24] Сравнительные ТТХ самолётов, принимавших участие в индийском тендере MMRCA https://ru.wikipedia.org/wiki/Шаблон:Сравнительные_ТТХ_самолётов_принимавших_участие_в_индийском_тендере_MMRCA.
- [25] *Kendall M.G.* Rank correlation methods. New York: Oxford University, 1990. 260 p.
- [26] *Корнеев В.П.* Метод локального агрегирования данных объектов с многоуровневой структурой в порядковых шкалах // Труды 14-й Международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем" (MLSD-2021). М.: ИПУ РАН, 2021. С.485-493. <https://mlsd2021.ipu.ru/proceedings/485-493.pdf>.

Сведения об авторе



Корнеев Виктор Павлович, 1953 г. рождения. Окончил факультет радиозлектроники Ленинградской военной инженерной академии им. А.Ф. Можайского в 1975 году. В 1986 году окончил факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова. Старший научный сотрудник Института проблем управления им. В.А Трапезникова РАН, доцент кафедры математических методов и информационных технологий Высшей школы промышленной политики и предпринимательства РУДН им. Патриса Лумумбы. К.т.н., доцент. В списке научных трудов более 100 работ в области комбинаторной оптимизации, математических методов в аналитической деятельности и многокритериального оценивания

объектов с многоуровневой структурой: Researcher ID (WoS): JGD-2807-2023; Author ID (Scopus): 57222359318; Author ID (РИНЦ): 1043413; ORCID: 0000-0002-3643-1609. vkorn@ipu.ru.

Поступила в редакцию 24.10.2023, после рецензирования 13.11.2023. Принята к публикации 17.11.2023.



Method of indirect preferences for forming criterion weights with a multi-level structure

© 2023, V.P. Korneenko

RUDN University, Moscow, Russia

V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The method of forming criterion weights in tasks of multi-criteria evaluation of objects with a multi-level structure of indicators presented in the form of a hierarchical tree, is shown. The weights values are calculated on the basis of indirect measurement of preferences of adjacent pairs of local weights of criteria included in the vertices of a higher level of the hierarchical tree, in the form of expert assessments in the quantitative scale of relations. The calculation of quantitative weights first comes down to lexicographic sorting by descending order of criteria importance at each level of the hierarchy that are included in the vertices of a higher level, as a result of which the number of expert comparisons of adjacent pairs in the scale of relations is reduced. The formation of local coefficients of the criteria importance is mathematically justified and is based on a matrix with special properties. A comparative analysis of the proposed method for forming quantitative weights with the method of hierarchy analysis, the least squares method and the approximation matrix method based on the matrix of paired comparisons, is given. An example is given of solving the problem of multi-criteria evaluation of combat aircraft that participated in the tender, according to the tactical and technical characteristics presented in various measurement scales.

Keywords: importance of criteria, paired comparison matrix, hierarchical tree, measurement scale, ordering of criteria.

For citation: Korneenko VP. Method of indirect preferences for forming criterion weights with a multi-level structure [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 580-596. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-580-596.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Three-level hierarchical tree of object evaluation criteria

Figure 2 – Hierarchical tree of criteria for assessing aircraft efficiency

Figure 3 – Result of aircraft evaluation on a 100-point scale, taking into account criteria weights

Table 1 – Normalized relative distances

Table 2 – Results of comparisons using the $d(A,W)$ criterion

Table 3 – Results of comparisons using the $d(w_i, w_j)$ criterion

Table 4 – Performance characteristics of aircraft participating in the tender

Table 5 – Aircraft ratings on a uniform 100-point scale without taking into account criterion weights

Table 6 – Aircraft performance in the resulting scale, taking into account criteria weights

Table 7 – Aircraft rating by efficiency

References

- [1] Saati T. Decision-making with dependencies and feedbacks: Analytical networks [In Russian]. M.: LKI, 2008. 360 p.
- [2] Lopukhin MM. "PATTERN", a method of planning and forecasting scientific papers [In Russian]. M.: Soviet radio, 1971. 160 p.
- [3] Keeney RL., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. New York: Wiley, 1976. 569 p.
- [4] Belton V., Stewart TJ. Multiple criteria decision analysis. An integrated approach. Boston: Cluwer, 2003. 374 p.
- [5] Bormotov AN. Substantiation of the method of forming the weighting coefficients of the criterion of practical opti-

- maleness based on the results of mathematical modeling of composites [In Russian]. Technical Sciences. 2016; 8: 14-18.
- [6] **Polishchuk LI.** On generalized criteria with importance coefficients in vector optimization problems [In Russian]. Automaton. and telemech. 1982; 2: 55-60.
- [7] **Zotyev DB.** On the problem of determining weight coefficients based on expert assessments [In Russian]. Factory laboratory. Diagnostics of materials. 2011; 77(1): 75-78.
- [8] **Anokhin AM, Glotov VA., Paveliev VV., Cherkashin AM.** Methods for determining the coefficients of the importance of criteria [In Russian]. Automaton and telemech. 1997; 8: 3-35.
- [9] **Dmitriev MG., Lomazov VA.** Evaluation of the sensitivity of linear convolution of particular criteria in the expert determination of weighting coefficients [In Russian]. Artificial intelligence and decision-making. 2014; 1: 52-56.
- [10] **Korneenko VP.** Method of indirect preferences [In Russian]. Review of applied and industrial mathematics. 2008; 15(5): 890-891.
- [11] **Pfanzagl J.** Theory of measurement. Berlin, Heidelberg: Spriger-Verlag, 1971. 235 p.
- [12] **Podinovskiy VV.** Quantitative importance of criteria [In Russian]. AiT. 2000; 5: 110-123.
- [13] **Podinovskiy VV.** Ideas and methods of the theory of the importance of criteria in multi-criteria decision-making tasks [In Russian]. Moscow: Nauka, 2019. 103 p.
- [14] **Remesnik E.S.** Application of Fishburne sequences in models with quantitative factors // Theory and Practice of Economics and Entrepreneurship / Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Practical conference with International participation "Theory and Practice of Economics and Entrepreneurship" (Simferopol–Gurzuf, 2019). Simferopol: IP Zueva T.V., 2019. P.210-212.
- [15] **Fishburn PC.** Utility Theory for Decision Making. New York: Wiley, 1970. 234 p.
- [16] **Piyavskiy SA.** Forms for calculation of universal coefficients when adopting multiple critical decisions [In Russian]. Ontology of designing. 2019; 9(2): 282-298. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
- [17] **Korneenko VP.** Optimization method for selecting the resulting ranking of objects presented in the rank scale of measurement [In Russian]. Management of large systems. 2019; 82: 44-60.
- [18] **Korneenko VP.** Methods of multi-criteria evaluation of objects with a multi-level structure of performance indicators [In Russian]. Moscow: MAKS Press, 2018. 292 p.
- [19] **Yushmanov SV.** A method for finding weights that does not require a complete matrix of pairwise comparisons [In Russian]. AiT. 1990; 2: 186-189.
- [20] **Horn R., Johnson Ch.** Matrix analysis. New York: Cambridge University, 1990. 561 p.
- [21] **Chu A., Kalaba RE., Springarn K.** A Comparison of two methods for determining the weights of Belonging to fuzzy sets. Journal of Optimization Theory and Applications. 1979; 27: 531–538.
- [22] **Korneenko VP.** Method of approximation matrix of object weights formation in multi-criteria selection problems [In Russian]. Bulletin of Cybernetics. 2021; 1: 51-62.
- [23] Expert Choice. <https://www.expertchoice.com/2021> (accessed: 04/25/2023).
- [24] Comparative technical characteristics of aircraft participating in the Indian MMRCA tender [In Russian]. https://ru.wikipedia.org/wiki/Шаблон:Сравнительные_ТТХ_самолётов_принимавших_участие_в_индийском_тендере_MMRCA.
- [25] **Kendall MG.** Rank correlation methods. New York: Oxford University, 1990. 260 p.
- [26] **Korneenko VP.** Method for local aggregation of data of objects with multi-level structure in sequential scales [In Russian]. Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-scale systems Development" (MLSD-2021). Moscow: IPU RAS, 2021. P.485-493. <https://mlsd2021.ipu.ru/proceedings/485-493.pdf>.

About the author

Viktor Pavlovich Korneenko (b. 1953) graduated from the Faculty of Radio Electronics of the Leningrad Military Engineering Academy named after A.F. Mozhaisky in 1975. In 1986 he graduated from the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics of Lomonosov Moscow State University. Senior Researcher at the V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematical Methods and Information Technologies of the Higher School of Industrial Policy and Entrepreneurship of the RUDN named after Patrice Lumumba. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. The list of scientific papers includes more than 100 works in the field of combinatorial optimization, mathematical methods in analytical activity, and multi-criteria evaluation of objects with a multi-level structure: Researcher ID (WoS): JGD-2807-2023; Author ID (Scopus): 57222359318; Author ID (RSCI): 1043413; ORCID: 0000-0002-3643-1609. vkorn@ipu.ru.

Received on October 24, 2023, after review on November 13, 2023. Accepted for publication on November 17, 2023.



Онтология направляемого развития научных способностей молодёжи. Часть 2: общая схема

© 2023, С.А. Пиявский

Самарский филиал Московского городского педагогического университета, Самара, Россия

Аннотация

Продолжено начатое в первой части статьи формирование онтологии развивающей деятельности одарённой молодёжи старшего школьного и вузовского возраста, названной «продвинутой учебно-исследовательской деятельностью». Это форма самостоятельной деятельности мотивированного школьника или студента направлена на удовлетворение его познавательных интеллектуальных и иных потребностей и развитие творческого потенциала, связана с последовательным решением исследовательских задач, поддерживается специально организованной развивающей научно-образовательной средой, предполагающей периодическую унифицированную оценку развивающего эффекта и научной значимости получаемых результатов. В дополнение к первой части статьи описывается онтология развития характеристик личности молодого исследователя: эрудиции, кругозора, исследовательской активности и социализации в научной среде. Впервые на количественной основе с использованием авторской математической модели проанализированы возможности учёта при планировании развивающей структуры НИР связи исследовательской функциональности с исследовательской мотивацией молодого исследователя, предложены блоки эрудиции, кругозора и социализации многоплановой системы критериев оценки личностных качеств. Описана общая схема направляемого развития молодого исследователя в рамках его учебно-исследовательской деятельности на основе таких понятий как: многоплановые системы критериев оценки НИР и личностных качеств молодого исследователя, математическая модель оптимизации развивающей структуры НИР, математическая модель формирования оптимальных вариантов личностного развития, консультационная система направляющей поддержки индивидуального развития и др. Введённые понятия объединены в виде графической схемы онтологии направляемого развития научных способностей молодёжи.

Ключевые слова: одарённая молодёжь, исследовательская деятельность, направляемое развитие, многокритериальность, моделирование, онтология, образовательный процесс.

Цитирование: Пиявский С.А. Онтология направляемого развития научных способностей молодёжи. Часть 2: общая схема // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №4(50). С.597-614. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-597-614.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В статье [1] введено понятие продвинутой научно-исследовательской деятельности (ИД) как новой формы направляемого развития творчески одарённой молодежи (ОМ), активно формирующейся в настоящее время в связи с цифровизацией и интеллектуализацией всех научно-образовательных процессов и занимающей промежуточное положение между учебно-исследовательской и собственно исследовательской («взрослой») деятельностью молодых исследователей. Как всякое новое социальное явление, вырастающее из сложившихся предпосылок, эта форма подвержена риску скептической оценки типа: «но ведь это всё уже есть, а лучшего и не нужно». Это опасное заблуждение. Сегодня процесс образования всё более индивидуализируется, различные сферы деятельности тесно взаимодействуют и пересекаются с образовательной сферой. Системе образования требуется целостный системный анализ

происходящих процессов, опирающееся на него проектирование и реализация новых технологий, основанных на исторически сложившейся традиции и использующих аппарат теории управления организационно-техническими системами, математического моделирования (ММ), многоуровневой оптимизации и согласования сложных решений.

С рассматриваемых позиций особую важность имеет рассмотрение той части образовательной системы, которая связана с выявлением, развитием и вовлечением в плодотворную трудовую деятельность творчески ОМ в сфере науки и техники. Эта сфера, имеющая в качестве основного статуса дополнительное образование, наиболее гибка и способна сформировать и воспринять требуемые глубокие изменения в образовании.

Формирование онтологии продвинутой ИД, как нового вида деятельности в этой сфере, является актуальной задачей и позволит уменьшить риски легковесности, эклектичности и невысокой эффективности в подготовке ОМ.

В статье [1] предпринята попытка начать построение варианта такой онтологии на основе многолетних исследований автора, нашедших применение в Единой Самарской областной системе мер по выявлению и развитию творчески ОМ в сфере науки, техники и технологий и инновационному развитию Самарской области [2].

1 Исследовательская функциональность

Объектом рассмотрения являются исследовательские способности молодёжи. Базовыми понятиями, характеризующими одарённую личность [3], являются: деятельность, результаты деятельности и личностные качества, определяющие незаурядный характер результатов деятельности. Эти качества личности развиваются в течение жизни в процессе и в зависимости от результатов её деятельности.

В [1] рассматривается продвинутая учебная ИД личности, охватывающая широкий возрастной диапазон от 12 до 30 лет. Личностные качества, определяющие характер и успешность этой деятельности, включают шесть основных компонент:

- 1) исследовательская функциональность, т.е. знания, навыки и умения эффективно реализовывать основные функции ИД, определяющие её творческий характер;
- 2) исследовательская активность (ИА);
- 3) психологические характеристики, особо значимые для успешной ИД;
- 4) эрудиция в избранной сфере деятельности;
- 5) широкий кругозор;
- 6) социализация в соответствующем исследовательском профессиональном сообществе.

Основным результатом продвинутой учебной ИД является последовательное выполнение научно-исследовательских работ (НИР) научно-развивающего характера с преобладанием вначале развивающей, а затем, по нарастающей, научной составляющей. Поэтому судить об успешности творческого развития личности в течение всего рассматриваемого периода следует, опираясь на оценку результатов выполняемых НИР. Для такой оценки в [1] предложена и обоснована многоплановая система критериев (МСК) оценки результатов НИР, включающая 15 частных критериев (см. таблицу 2 в [1]).

В слабо формализуемой области творческого развития личности значение каждого частного критерия оценивается в соответствующей пятиуровневой порядковой шкале, имеющей содержательную интерпретацию. Использование методов принятия многокритериальных решений, в частности метода анализа иерархий и метода уверенных суждений, позволяет рассчитать функциональный рейтинг НИР как единственный комплексный числовой показатель научно-развивающей ценности выполненной автором НИР, демонстрирующий достигнутый им уровень творческого развития. Значение функционального рейтинга НИР норми-

руется в пределах от нуля до 100 баллов. Установленная авторитетным научно-методическим органом таблица «результат-функционал» (таблица 3 из [1]) позволяет аналогичным образом рассчитать комплексную оценку достигнутого автором уровня сформированности каждой из девяти исследовательских функций и сформировать текущий функциональный профиль молодого исследователя. Каждую его компоненту также принято нормировать в пределах от нуля до 100 баллов. Для каждой сферы творческой профессиональной деятельности авторитетными представителями профессионального сообщества разрабатывается таблица сравнительной ценности сформированности отдельных исследовательских функций для успешной творческой деятельности в данной сфере. С использованием таких таблиц рассчитывается числовой рейтинг, характеризующий ожидаемую успешность творческой деятельности автора НИР. При наличии сформировавшейся научно-образовательной развивающей среды (НОРС) это может позволить исследователю увидеть своё текущее место в ряду коллег.

Так решается задача, названная «статикой». Её решение даёт возможность молодому исследователю и лицам, курирующим его деятельность, оценивать в сопоставимой шкале развивающие и научные результаты каждой из последовательно выполняемых им в рамках единой образовательной среды исследовательских работ, опираться на объективную оценку его творческого развития и соответствующим образом направлять ИД.

2 Исследовательская активность

Движущей силой ИД и важнейшей, после исследовательской функциональности, компонентой личностных качеств молодого исследователя является его ИА. Её можно определить как время, которое в течение определённого периода (например, месяца) творческая личность по собственному желанию уделяет непосредственно ИД, и измерить в часах. Это понятие тесным образом связано с понятием мотивации [4]. В разрабатываемой в настоящей статье онтологии используется более точный термин ИА. На ИА влияют четыре основные группы факторов: чувство предназначения; функциональная структура деятельности; стимулирование; утомление.

Чувство предназначения отражает внутреннюю устремлённость личности, её «врождённую» или осознанную уверенность в своём призвании как учёного. В работах К. Юнга, посвящённых проблемам воспитания, становления и развития личности, значению бессознательного в этом процессе, предназначение рассматривается как некий иррациональный фактор, «божественный закон», от которого невозможно уклониться [5]. Будучи осознанными, факторы предназначения остаются в процессе развития личности, также как любопытство, упрямство, целеустремлённость, жизненная активность и др. Все они действуют на личность независимо от содержания текущей деятельности.

В отличие от этого, существенное влияние на текущую ИА оказывает *функциональная структура деятельности*. Чаще всего поиск проблемы для исследования вызывает у учёного всплеск положительных эмоций: открываются широкие горизонты, кажется возможным добиться выдающихся результатов. Как следствие, повышается его интерес и, соответственно, ИА. При выработке стратегии развития научных способностей очень важно так направить содержание деятельности, чтобы обеспечить поддержание оптимального уровня ИА.

Для оценки степени важности учёта этого фактора проведено исследование структуры мотивированности к различным исследовательским функциям студенческой молодежи младших курсов (76 студентов 1-2 курсов гуманитарного вуза), имеющей первичный опыт учебной НИР [6]. Оказалось, что потенциальные возможности молодых людей выше, чем осознаваемые ими и отражённые в результате опроса. В рассматриваемом контингенте чет-

верть молодых людей имеют отрицательную мотивацию к одной или нескольким исследовательским функциям. Это подтверждает необходимость планировать структуру их ИД так, чтобы отрицательный эффект от необходимости выполнять «нелюбимые» функции не перебил удовольствие, связанное с реализацией положительно мотивирующих данную личность исследовательских функций.

Влияние *стимулирования* на мотивацию, особенно материального и морального, со стороны авторитетной личности или органа очевидно. Обеспечение такого стимулирования – важнейшая функция развивающей образовательной среды. Источником повышения мотивации является и внутреннее стимулирование – удовольствие, испытываемое исследователем от факта получения результата ИД.

Феномен *утомления* заключается в том, что при высоком уровне мотивации скорость её возрастания уменьшается – этим организм предохраняет себя от нервного срыва. Человеку необходимо время для удовлетворения физиологических и социальных потребностей. Для школьников и студентов затраты времени на дополнительную ИД не могут превышать в среднем 3–4 часа ежедневно или 80–100 часов в месяц. По окончании ВУЗа, если производственная деятельность соответствует научным интересам личности, уровень её мотивации может возрасти до 10–12 часов в день или 300–350 часов в месяц.

ИА, в отличие от других личностных качеств, изменяющихся сравнительно медленно, в зависимости от различных обстоятельств может изменяться стремительно. Поэтому при планировании предстоящей НИР на ближайший период её достаточно оценивать количеством часов в месяц, которые молодой исследователь готов уделять своей ИД.

3 Планирование оптимальной развивающей структуры НИР

Необходимость совместного учёта функциональных и мотивационных факторов можно показать на примере планирования развивающей структуры очередной НИР молодого исследователя, согласно схеме, представленной на рисунке 1. В этом примере молодой исследователь и его научный руководитель применяют МСК и ММ оптимизации развивающей структуры НИР, описанную в разделе 6 статьи [1], в которую добавлен расчёт *мотивационного творческого рейтинга НИР*. Творческий рейтинг НИР представляет собой линейную свёртку компонентов функционального профиля автора НИР, взвешенных с весами сравнительной значимости этих компонентов для успешной деятельности в определённой профессиональной сфере. Мотивационный творческий рейтинг НИР представляет собой аналогичную свёртку, в которой компоненты функционального профиля взвешиваются ещё и с коэффициентами «деятельность – мотивация». *Коэффициент мотивированности автора при выполнении НИР* рассчитывается при этом как доля (в процентах) мотивационного творческого рейтинга от творческого рейтинга НИР.

В дополненной таким образом ММ оптимизации развивающей структуры НИР используются два критерия оптимальности: творческий рейтинг *RT* и мотивированный творческий рейтинг *RMT*. Оптимизация ведётся по комплексному критерию, являющемуся их линейной свёрткой. Предварительно рейтинги нормируются от нуля до единицы. Для этого проводятся два расчёта. В одном из них критерием оптимальности является творческий рейтинг и определяется его максимально достижимое значение. В этом же расчёте определяется минимально возможное значение *мотивированного* творческого рейтинга, поскольку эти два критерия связаны монотонно убывающей зависимостью. Во втором расчёте выясняется максимально возможное значение мотивированного творческого рейтинга и, соответственно, минимальное значение творческого рейтинга. Нормирование производится по формуле:

$$R_{norm} = \frac{R - R_{min}}{R_{max} - R_{min}}$$

Комплексный критерий оптимальности имеет вид: $F = K_{mot} RMT_{norm} + (1 - K_{mot}) RT_{norm}$

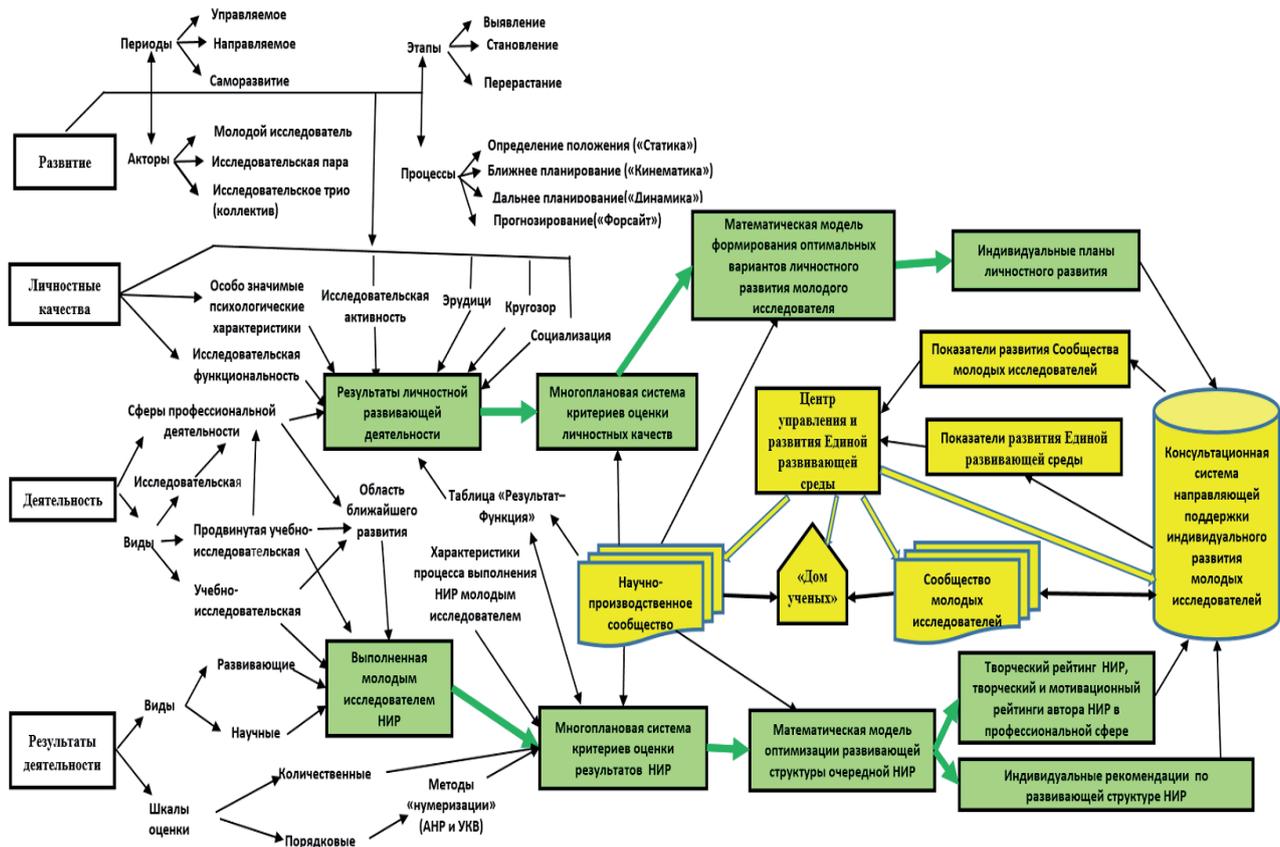


Рисунок 1 – Схема онтологии направляемого развития научных способностей молодежи

Пусть планируется *последующая* НИР (НИР₀), которую предстоит выполнить молодому исследователю после выполнения и объективной оценки предшествующей исследовательской работы (НИР₋₁). Пример методической структуры предшествующей НИР показан в таблице 1. Содержательный смысл порядковых уровней оценки критериев этой НИР (четвёртый столбец) показывает, что выполненная работа является исследовательской, т.е. в ней содержится некоторый новый научный результат, связанный с научной работой руководителя; работа аккуратно и грамотно оформлена, но не все её положения и выводы имеют обоснование; автор доложил работу самостоятельно, но не сумел ответить на некоторые вопросы. Условная трудоёмкость выполнения предыдущей НИР, характеризуемая в примере суммой уровней порядковых оценок всех 15-ти критериев, составила 10 единиц из 75 возможных.

ММ оптимизации развивающей структуры НИР, которую предстоит использовать при планировании, позволяет рассчитать для предыдущей НИР творческий и мотивационный рейтинги её автора в интересующей его профессиональной сфере деятельности.

Пусть, обдумывая предстоящую новую научную работу, её автор вместе со своим научным руководителем обсуждают, какие предельные возможности могли бы быть достигнуты в этой НИР по каждому критерию для того, чтобы при защите она получила возможно бóльшую оценку по МСК. Результат этого обсуждения отражён в пятом столбце таблицы 1. Например, рассматривая четвёртый критерий «Направлена (подготовлена) публикация в научной печати» с его уровнями оценки:

- 0 – статья не подготовлена;
- 1 – статья направлена в научную печать, но ещё не опубликована;
- 2 – статья опубликована в журнале, реферируемом в РИНЦ;
- 3 – статья опубликована в журнале из перечня ВАК;
- 4 – статья опубликована в журнале, реферируемом в Scopus;
- 5 – статья опубликована в журнале, реферируемом в Web of Science, -

они решили, что будут стремиться достичь уровня 2, понимая, что более высокий уровень оценки пока невозможен.

Таблица 1 – Пример развивающей методической структуры предшествующей НИР (НИР₋₁)

Частные критерии оценки НИР как показательного результата исследовательской деятельности	Группа важности критерия	Коэффициент значимости критерия	Структура предыдущей НИР (НИР ₋₁)	Максимально возможный уровень результата в планируемой НИР (НИР ₀)
1. Тип результатов	3	0,137	1	3
2. Результаты являются частью НИР руководителя, научной группы кафедры, вуза	2	0,042	1	2
3. Результаты относятся к перспективному направлению науки, техники, технологий	1	0,008	1	3
4. Направлена (подготовлена) публикация в научной печати	1	0,008	0	2
5. Результаты внедрены или подготовлены к внедрению в сторонних организациях	2	0,042	0	2
6. Представлен глубокий обзор научной проблематики	2	0,042	1	3
7. Используются теоретические методы (математические, понятийный аппарат социально-гуманитарного научного познания)	3	0,137	0	2
8. Получены новые научные результаты	3	0,137	0	2
9. Имеются собственные оригинальные идеи участника	2	0,042	0	2
10. Имеется глубокий анализ литературы (по авторам и времени)	2	0,042	1	4
11. Используются/разработаны специальные технологии проведения исследований	2	0,042	0	1
12. Масштабность предполагаемых последствий полной реализации работы	3	0,137	0	2
13. Масштабность проведённого исследования	3	0,137	1	2
14. Качество оформления представленных результатов	2	0,042	2	4
15. Качество доклада и ответов на вопросы при защите работы	1	0,008	2	4
Условная трудоёмкость НИР (сумма номеров оценок критериев по порядковым шкалам), единиц			10	38

Задача планирования НИР₀ стоит в том, чтобы разработать такую методическую структуру предстоящей НИР, которая будет: иметь более высокий творческий рейтинг и обеспечит успех при её представлении на различные оценочно-конкурсные мероприятия; соответствовать реальным на данный момент творческим возможностям её автора; соответствовать его мотивационной структуре, которая приведена в таблице 2 (второй столбец).

Таблица 2 – Пример учёта мотивации при планировании развивающей структуры НИР_0

Функции исследовательской деятельности	Коэффициент «Деятельность – Мотивация»	Оптимальная развивающая структура НИР_0 при различных критериях оптимальности		
		Максимальный профессиональный творческий рейтинг автора НИР	Максимальная мотивированность автора НИР	Мотивированность автора НИР «важнее» его профессионального творческого рейтинга
1. Поиск тематики	-0,7	0,158	0,065	0,085
2. Постановка проблемы	0,72	0,164	0,061	0,092
3. Формирование ключевой идеи	-0,64	0,169	0,029	0,053
4. Подготовка к реализации плана работ	-0,93	0,183	0,047	0,068
5. Реализация отдельных частей плана работ	0,8	0,120	0,050	0,057
6. Синтез решения проблемы	0,64	0,125	0,094	0,122
7. Оформление решения проблемы	0,63	0,950	0,959	0,950
8. Ввод решения в научный обиход	0,83	0,201	0,268	0,270
9. Внутренний критический анализ	0,81	0,103	0,069	0,095

Исходными данными для такого планирования являются:

- структура творческих результатов НИР_ -1, определяемая её оценкой по МСК;
- предельный уровень каждого частного творческого результата, который может быть достигнут автором НИР_0;
- минимально допустимый уровень мотивированности автора его деятельностью по выполнению НИР_0;
- общие временные трудозатраты автора на выполнение НИР_0.

Эти параметры устанавливаются автором в обсуждении с научным руководителем, при этом различные возможности оцениваются по результатам, получаемым на ММ. В рассматриваемом примере уровень планируемых в ней частных результатов не может быть ниже уже достигнутого. Для простоты примера принято, что реальная трудоёмкость выполнения НИР из года в год должна оставаться постоянной и равной 10 единицам. Особенность используемой в этом примере упрощённой ММ состоит в том, что трудоёмкость выполнения НИР рассчитывается пропорционально сумме номеров порядковых шкал, оценивающих частные результаты выполнения этой НИР. В рассчитываемой таким образом трудоёмкости не учитывается квалификация автора НИР. При рассмотрении выполнения молодым исследователем *серии* НИР необходимо учитывать, что трудоёмкость НИР состоит из двух частей: одна идёт на освоение *новых* для автора знаний и умений и их применение для получения результата, а другая – на закрепление и применение знаний и умений, освоенных *в предыдущей НИР*. Во втором случае трудоёмкость будет численно равна числу *впервые освоенных* в предыдущей НИР уровней порядковой шкалы оценки частного результата с некоторым уменьшающим коэффициентом (для простоты принят равным 0,5); считается, что *более чем двукратно* применённые знания и умения уже интериоризированы автором НИР и потому трудоёмкостью их применения пренебрегают. Если желательно, чтобы трудоёмкость выполнения планируемой НИР составила, как и в предыдущей НИР, 10 единиц, то в ММ следует в качестве ограничения на суммарную (расчётную) трудоёмкость выполнения НИР ввести не 20 единиц, а

только $10+0,5*10=15$ единиц, потому что из них 10 единиц отвечают уровням, освоенным в предыдущей НИР и поэтому будут реализованы молодым исследователем вдвое легче. В дальнейшем число в обозначении НИР указывает на номер года её планирования.

Далее молодой исследователь и его научный руководитель могут использовать ММ оптимизации развивающей структуры НИР. В результате варьирования коэффициента относительной важности мотивации автора K_{Motn} [6] от нуля до единицы были выявлены четыре оптимальных структуры планируемой НИР₀ (см. таблицу 3 столбцы 5-8 и рисунок 2).

Таблица 3 – Пример планирования развивающей структуры предстоящей НИР

Номер и суть частного критерия оценки результатов НИР (см. столбец 1 таблицы 1)	Группа важности критерия	Максимально возможный уровень результата в планируемой НИР	Структура результатов предстоящей НИР (НИР ₋₁)	Структура результатов планируемой НИР ₀ при различной целевой установке оптимизации НИР				Выбранная структура результатов последующих НИР			
				Максимальный творческий рейтинг НИР ($K_{Motn}=0$)	Предпочтительнее творческий рейтинг ($K_{Motn}=0,25$)	Предпочтительнее мотивационный творческий рейтинг ($K_{Motn}=0,75$)	Максимальный творческий мотивационный рейтинг НИР ($K_{Motn}=1$)	НИР ₁ $K_{Motn}=0,75$	НИР ₂ $K_{Motn}=0,875$	НИР ₃ $K_{Motn}=1$	НИР ₄ $K_{Motn}=1$
1. Исследовательский характер	3	3	1	2	1	1	1	1	1	1	1
2. Коллективность	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3. Перспективность	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4. Публикация	1	2	0	0	0	0	0	0	1	1	1
5. Внедрение	2	2	0	0	0	0	2	2	2	2	2
6. Обзор проблематики	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7. Теоретические методы	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8. Научная новизна	3	2	0	2	2	1	0	2	2	2	2
9. Оригинальность	2	2	0	1	0	0	0	1	2	2	2
10. Анализ литературы	2	4	1	2	2	1	1	2	2	2	2
11. Передовые технологии	2	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
12. Масштабность перспективы	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13. Масштабность исследования	3	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2
14. Оформление результатов	2	4	2	2	4	4	4	4	4	4	4
15. Доклады о результатах	1	4	2	2	2	2	2	4	4	4	4
Реальная трудоёмкость выполнения планируемой НИР			10	10	10	10	10	10	10	10	10
Максимально допустимая расчётная трудоёмкость планируемой НИР			-	15	15	15	15	23	29	36	43
Расчётная трудоёмкость планируемой НИР			10	15	15	15	15	23	25	25	25
Творческий рейтинг в профессиональном направлении автора планируемой НИР %			4,3	12,29	10,85	9,23	7,44	14,1	14,86	14,86	14,86
Мотивированный творческий рейтинг в профессиональном направлении автора планируемой НИР %			0,7	-0,29	1,61	2,12	2,34	3,22	3,22	3,22	3,221
Коэффициент мотивированности деятельностью автора при выполнении НИР %			15,5	-2,0	14,8	23,1	31,5	22,8	21,7	21,7	21,7

Окончательный выбор из этих четырёх оптимальных вариантов производят молодой исследователь и его научный руководитель совместно. Научный руководитель рассматривает, в какой мере под рекомендуемую расчётом развивающую методическую структуру может быть ориентировано реальное содержание НИР. Пусть принято решение в пользу варианта, отвечающего комплексному критерию оптимальности (столбец 7 таблицы 3), в котором более предпочтительным по сравнению с творческим потенциалом является мотивационный творческий потенциал ($K_{Motn}=0,75$).

На рисунках 2 и 3 показаны наиболее характерные результаты для НИР_0 и НИР_2 (структурно результаты для НИР_1 подобны результатам для НИР_0, а для НИР_3, НИР_4 - результатам для НИР_2). На рисунке 2 видно, что при увеличении требования к мотивированности автора в выполняемом им исследовании результат исследования в творческом отношении оказывается менее ценным (сплошная линия), однако общая содержательная ценность НИР (штриховая линия) не изменяется, поскольку в работу при любой степени её мотивированности вкладывается то количество авторского труда, которое он изначально решил затратить (в условиях упрощённой модели содержательная ценность НИР численно совпадает с её трудоёмкостью). Когда при выполнении НИР_2 (рисунок 3) автор изначально готов затратить на её выполнение большее количество труда при очень высоком требовании к степени мотивированности труда, он не может этого сделать (штриховая линия понижается).

На рисунке 4 показано к чему приводит этот эффект на всей развивающей цепочке последовательно выполняемых НИР.

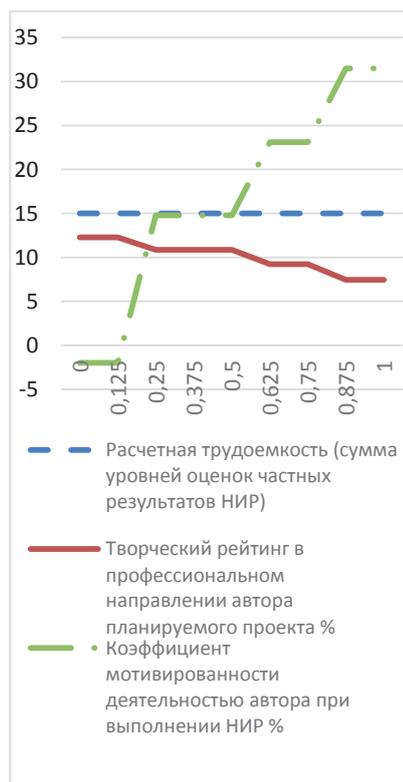


Рисунок 2 - Характеристики планируемой НИР_0 в зависимости от коэффициента K_{Motn} относительной важности мотивации в комплексном критерии оптимальности

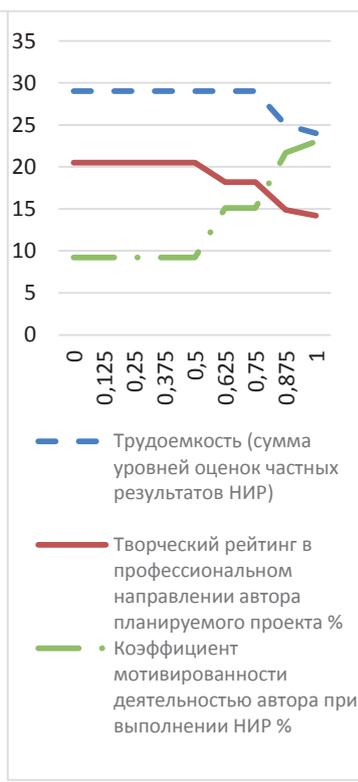


Рисунок 3 - Характеристики планируемой НИР_2 в зависимости от коэффициента K_{Motn} относительной важности мотивации в комплексном критерии оптимальности

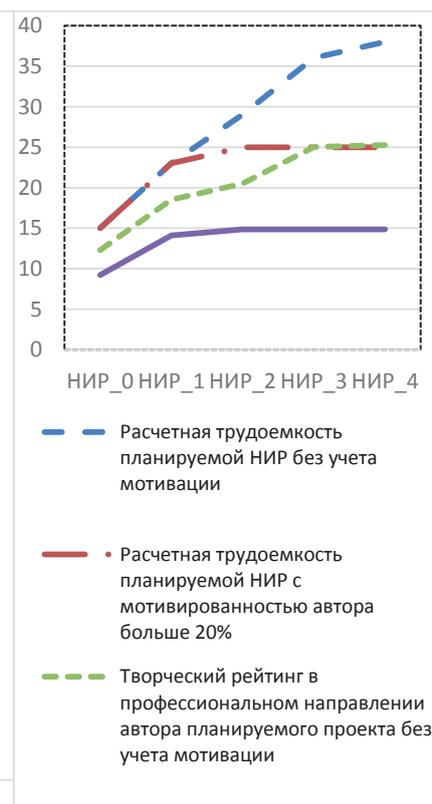


Рисунок 4 - Влияние требования мотивированности автора на рост трудоёмкости (содержательной ценности) выполняемых НИР и на творческий рейтинг автора

4 Личностные качества как основа развития научной одарённости

Существенными факторами, определяющими развивающую структуру планируемой НИР, являются ограничения сверху, налагаемые на возможный уровень планируемых частных результатов НИР. В таблице 4 показано влияние названных ограничений для условий рассмотренного в разделе 3 примера при планировании НИР₀.

Таблица 4 – Влияние ограничений на результаты оптимизации структуры планируемой оценки НИР₀

Номер и суть частного критерия оценки результатов НИР (см. столбец 1 Таблицы 3)	Ограничения на максимально допустимые уровни достижения частных результатов при планировании НИР ₀	Оптимально планируемые уровни достижения частных результатов в НИР ₀ при различных ограничивающих условиях		
		При КМотн=0,75 и исходных ограничениях на максимальные частные результаты	При КМотн=0,75 и без исходных ограничений на максимальные частные результаты	При КМотн=0,25 и без исходных ограничений на максимальные частные результаты
1. Исследовательский характер	3	1	1	1
2. Коллективность	2	2	5	5
3. Перспективность	3	1	1	1
4. Публикация	2	0	0	0
5. Внедрение	2	0	0	0
6. Обзор проблематики	3	1	1	1
7. Теоретические методы	2	0	0	0
8. Научная новизна	2	1	0	1
9. Оригинальность	2	0	0	0
10. Анализ литературы	4	1	1	1
11. Передовые технологии	1	1	0	0
12. Масштабность перспективы	2	0	0	0
13. Масштабность исследования	2	1	1	1
14. Оформление результатов	4	4	3	2
15. Доклады о результатах	3	2	2	2
Реальная трудоёмкость выполнения планируемой НИР		10	10	10
Максимально допустимая расчётная трудоёмкость планируемой НИР		15	15	15
Расчётная трудоёмкость планируемой НИР		15	15	15
Творческий рейтинг в профессиональном направлении автора планируемой НИР, %		9,23	10,59	12,21
Мотивированный творческий рейтинг в профессиональном направлении автора планируемой НИР, %		2,12	3,83	3,51
Коэффициент мотивированности деятельностью автора при выполнении НИР, %		23,1	36,2	28,8

Изменение ограничений на достижимые результаты очередной НИР возможно по двум причинам: ввиду увеличения «натренированности» молодого исследователя на получение соответствующего вида результата в процессе выполнения предшествующих НИР или за

счёт развития его личностных качеств в процессе деятельности, происходящей параллельно с проведением исследований. Например, при планировании молодым исследователем и его научным руководителем НИР_0 уровень достижимого результата «Качество доклада и ответов на вопросы при защите работы» был ограничен: «2 - докладывает самостоятельно, чётко, однако не может ответить на большинство вопросов». Через год, учитывая полученный опыт представления НИР_0 на различных мероприятиях, возможно перейти к более высокому уровню ограничения: «3 - докладывает самостоятельно, чётко, отвечает на все вопросы». Однако невозможно подобным путём перейти к увеличению предельной оценки ожидаемого результата «Представлен глубокий обзор научной проблематики» с уровня «3 – знает об отдельных научных школах в России и за рубежом, их отличиях, различные точки зрения приводятся и обсуждаются» на уровень «4 – подробно знает о работах организации-лидера, её партнёрах и конкурентах». Для этого необходима параллельная непосредственной ИД большая работа по расширению кругозора, эрудиции и профессиональной социализации молодого исследователя и развитию у него необходимых для этого психологических характеристик.

Для рассмотрения способа оценки степени сформированности этих личностных качеств молодого исследователя разработана «МСК оценки личностного развития молодого исследователя». Методологически она соответствует МСК оценки результатов НИР, позволяющей рассчитать творческие рейтинги выполненной НИР и её автора [1]. Далее эти две системы называются МСК НИР и МСК оценки личностных качеств.

При описании МСК оценки личностных качеств в ряде случаев использованы коэффициенты и оценки, отвечающие субъективному мнению автора (при реальном использовании этой системы они коллективно формируются авторитетными органами). Это же относится и к конкретным тестам и опросникам, которые автор приводит для того, чтобы показать психологические инструменты, способные решать необходимые задачи. Подбор эффективных инструментов для реального использования в НОРС – дело соответствующих коллективов специалистов.

Критериями оценки текущего уровня сформированности психологических характеристик приняты: интеллект [7]; креативность [8]; способности к критической самооценке [9], коммуникативные [10], организаторские [11], презентационные [12, 13], неутомляемость и стрессоустойчивость [14, 15]. Группы сравнительной важности критериев в порядковой шкале, используемой в методе УКВ [16], характеризуются коэффициентами важности (1- обычные, 2 – важные, 3 – наиболее важные) и указываются экспертом для каждого критерия соответствующей сферы профессиональной деятельности. В таблице 5 представлен пример фрагмента блока МСК оценки личностных качеств «Особо значимые психологические характеристики».

Аналогично тому, как МСК НИР позволяет рассчитать творческий рейтинг НИР, таблица 5 позволяет рассчитать рейтинг особо значимых психологических характеристик в сфере профессиональных интересов молодого исследователя. Он равен сумме произведений количественных эквивалентов коэффициентов важности критериев и количественных эквивалентов значений этих критериев в соответствующей им порядковой шкале. Количественные эквиваленты коэффициентов важности критериев зависят от числа критериев и их распределения по группам важности.

В таблице 6 приведён пример фрагмента второго блока МСК оценки личностных качеств «Эрудиция». При его разработке считалось, что в рамках НОРС авторитетные общественные научно-образовательные коллективы будут стимулированы на регулярной основе разрабатывать несколько обобщающих обзорных документов (т.н. базовых списков - БС) в укрупнённых профессиональных областях ИД:

- БС основного современного понятийного аппарата ИД;

- БС основного современного инструментария ИД;
- БС крупных результатов современных учёных;
- БС авторитетных научных конференций и форумов (по возрастным уровням);
- БС тем НИР, предлагаемых мотивированным молодым участникам для выполнения под научным руководством учёных и специалистов;
- БС наиболее перспективных направлений исследований;
- БС ведущих организаций и научных коллективов.

Таблица 5 – Пример фрагмента блока «Особо значимые психологические характеристики» многоплановой системы критериев оценки личностных качеств молодого исследователя

Критерий оценки текущего уровня сформированности психологических характеристик	Порядковая шкала оценки	Краткое обоснование оценки
Интеллект оценивается с использованием психологических тестов, например теста Айзенка [8], результат - IQ	0 - нормальный	IQ от 100 до 110
	1 - повышенный	IQ от 111 до 120 или нормальный + психологические тренинги
	2 - высокий	IQ от 121 до 130 или повышенный + увлечение интеллектуальными играми или психологические тренинги
	3 - очень высокий	IQ от 131 до 140 или высокий + увлечение интеллектуальными играми или психологические тренинги
	4 -исключительно высокий	очень высокий + увлечение интеллектуальными играми или психологические тренинги
	5 - редкостный	IQ больше 140
Креативность оценивается с использованием психологических тестов, например теста Торренса [9], результат - Т	0 - ниже нормы	Т от 30 до 34
	1 - несколько ниже нормы	Т от 35 до 39 или ниже нормы + психологические тренинги
	2 - норма	Т от 40 до 60 или несколько ниже нормы + увлечение интеллектуальными играми или психологические тренинги
	3 - несколько выше нормы	Т от 61 до 65 или норма + увлечение интеллектуальными играми или психологические тренинги
	4 -выше нормы	Т от 66 до 70 или несколько выше нормы + увлечение интеллектуальными играми или психологические тренинги
	5 - высокая	Т больше 70

Критериями оценки текущего уровня эрудиции приняты: уровень владения современным понятийным аппаратом ИД в сфере профессиональной деятельности; уровень владения современным инструментарием ИД; знание крупных результатов современных учёных из соответствующего БС; и др.

Третий блок МСК оценки личностных качеств «Кругозор», представленный в таблице 7, базируется на использовании таблицы 6 применительно к сферам профессиональной деятельности, попадающим в сферу побочных научных интересов молодого исследователя.

В таблице 8 приведён четвёртый блок «Социализация» МСК оценки личностных качеств молодого исследователя. При его разработке считалось, что авторитетным общественным междисциплинарным научно-образовательным коллективом разработан Этический кодекс исследователя (Кодекс). Он содержит основную парадигму современного научного сообщества, отражённую в документах уровня Всеобщей декларации прав человека [17], Кодекса этики учёных и инженеров [18] и других документов международных и национальных организаций. В качестве критериев оценки приняты: соответствие мировоззрению научного сообщества, выраженному в Кодексе; наличие активных личностных связей с профессионалами в избранной области из других организаций; наличие активного личного взаимодействия

с авторитетными научными коллективами; членство в учёных, научных, диссертационных советах, оргкомитетах и т.п.; и др.

Таблица 6 - Пример фрагмента блока «Эрудиция» многоплановой системы критериев оценки личностных качеств молодого исследователя

Критерий оценки текущего уровня эрудиции	Порядковая шкала оценки	Краткие рекомендации самооценки
Уровень владения современным понятийным аппаратом ИД в сфере профессиональной деятельности	0 - ничего	Запись конкретных понятий из соответствующего БС, их общего количества, сравнение с рекомендуемым в БС
	1 - несколько слышал, но не понимаю	
	2 - около десятка слышал, несколько понимаю, но не использую	
	3 – около десятка понимаю, одно - два использую	
	4 - около десятка понимаю и использую	
5 - кроме 4, несколько в своих НИР ввёл сам		
Уровень владения современным инструментарием ИД	0 - ничего	Запись конкретных инструментов из соответствующего БС, и их общего количества, сравнение с рекомендуемым в БС
	1 –о нескольких слышал, но не понимаю	
	2 –примерно о десятке слышал, несколько понимаю, но не использую	
	3 – около десятка понимаю, одно - два использую	
	4 - около десятка понимаю и использую	
5 - кроме 4, несколько ввёл сам в своих НИР		

Таблица 7 – Пример фрагмента блока «Кругозор» многоплановой системы критериев оценки личностных качеств молодого исследователя

Критерий оценки текущего уровня эрудиции	Профессиональная сфера					
	1		2		3	
	Коэф. важности критерия	Значение критерия	Коэф. важности критерия	Значение критерия	Коэф. важности критерия	Значение критерия
Уровень владения современным понятийным аппаратом ИД в сфере профессиональной деятельности	2	3				
Уровень владения современным инструментарием ИД	3	4				

Таблица 8 – Пример фрагмента блока «Социализация» многоплановой системы критериев оценки личностных качеств молодого исследователя

Критерий оценки текущего уровня социализации	Порядковая шкала оценки
Соответствие мировоззрению научного общества, выраженному в Кодексе	0 - не читал Кодекс
	1 - разделяю не более 50% положений Кодекса
	2 - разделяю не более 60% положений Кодекса
	3 - разделяю не более 75% положений Кодекса
	4 - не разделяю четыре или пять статей Кодекса
5 - не разделяю менее трёх статей Кодекса	
Наличие активных личностных связей с профессионалами в избранной области из других организаций	0 - нет
	1 - одна связь
	2 - два-три связи
	3 - четыре–пять связей
	4 - шесть–семь связей
5 - около десяти и более связей	

По всем перечисленным блокам рассчитываются рейтинги эрудиции, кругозора и социализации в интересующей молодого исследователя профессиональной сфере.

5 Направляемое развитие в НОРС

При использовании двух МСК в каждый текущий момент уровень развития творческой личности в интересующей его профессиональной сфере деятельности может быть описан шестью числовыми характеристиками:

- рейтинг функциональности молодого исследователя по результатам выполненной НИР, % (P_{Φ});
- предельно возможная ИА, час/мес;
- рейтинг психологических возможностей, % (P_{Π});
- рейтинг эрудиции, % (P_{Ξ});
- рейтинг кругозора, % (P_K);
- рейтинг социализации, % (P_C).

Их можно обобщить, введя комплексный рейтинг творческого развития молодого исследователя (KP , %). Для этого следует нормировать характеристику «предельно возможная ИА», разделив её на заведомо большое значение, например, число 248 (соответствует занятиям ИД по 8 часов ежедневно в течение 31 дня). Полученный результат - рейтинг активности (P_A) измеряется в процентах.

На более детальном уровне каждый рейтинг (кроме P_A) раскрывается своим профилем, представленным в таблицах 5-8. Соответствующая схема приведена на рисунке 5.

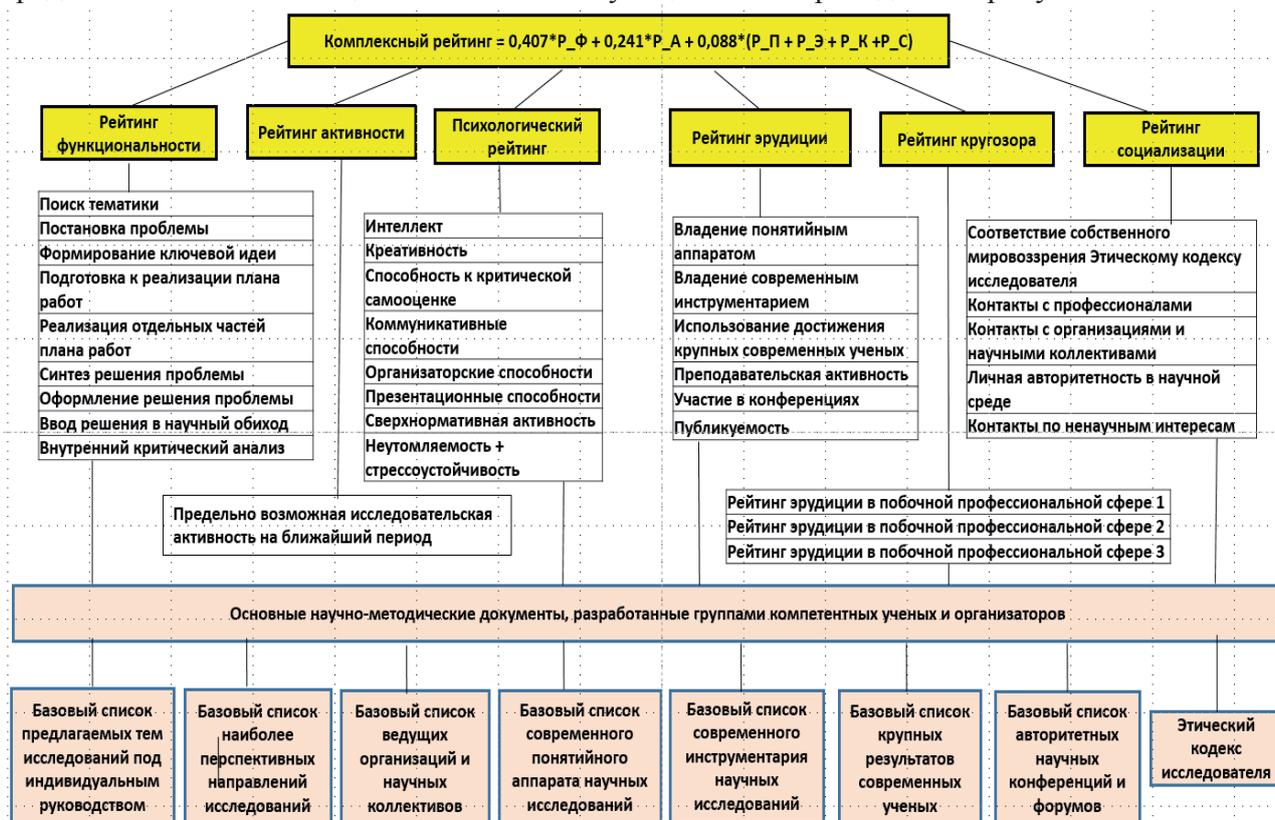


Рисунок 5 – Схема рейтингов и профилей молодого исследователя в НОРС

Эта информация формируется Консультационной системой направляющей поддержки индивидуального развития молодых исследователей (КС) (рисунок 1) на основе информации,

сообщаемой ей молодым исследователем, использующим предоставляемые ему КС научно-методические и справочные материалы, а также определённую деперсонифицированную статистическую информацию. Таким образом решается задача определения текущего положения молодого исследователя в пространстве его творческого развития. Две ММ: оптимизации развивающей структуры очередной НИР и формирования оптимальных вариантов личностного развития молодого исследователя позволяют ему на вариантной основе выбрать доступную по его текущему уровню тематику исследований и научного руководителя и/или консультанта, вместе ними спланировать структуру исследовательской и параллельной развивающей его личность деятельности на ближайшую и отдалённую перспективу.

Результаты выполнения принятых на ближайший период планов молодой исследователь передаёт в КС, анализирует происшедшие в своём статусе изменения, оценивает свои дальнейшие перспективы и снова использует КС на новом шаге планирования своей деятельности. КС ведёт мониторинг функционирования НОРС и формирует статистическую информацию, необходимую для организации эффективного функционирования среды и проведения научных исследований.

Существенную роль в организации этого процесса играет «Дом учёных» - виртуальная платформа, на базе которой организуется взаимодействие молодых исследователей со своими руководителями и консультантами, координация и проведение различных информационных, научно-образовательных и обучающих материалов и мероприятий, представляющих общий интерес. Важно, что эта информация носит деперсонифицированный характер, причём в публичном пространстве все участники выступают под псевдонимами. Установив между собой первичный личный контакт в рамках «Дома учёных», они договариваются о форме взаимодействия. Функционирование НОРС организуется и управляется Центром управления и развития. Его функции должны дополнить разрабатываемую онтологию.

Заключение

Направляемое развитие исследовательских способностей ОМ следует рассматривать с позиций системного анализа, исследования операций и теории управления как измеримый процесс оптимального управления сложной системой в сложной среде.

Фазовыми координатами в этом процессе являются компоненты профилей и рейтинги молодого исследователя, а основными управлениями - развивающая структура последовательно выполняемых молодым исследователем НИР под научным руководством и консультированием. В качестве основных управляющих воздействий выступают выдаваемые молодому исследователю и заинтересованным в нём лицам индивидуальные рекомендации по содержанию его исследовательской и иной развивающей деятельности.

Эволюционное формирование эффективности системы направляемого развития исследовательских способностей ОМ невозможно без разработки соответствующей онтологии. Онтология развития научных способностей ОМ должна отражать измеримый, контролируемый, оптимально проектируемый и добровольно направляемый молодым исследователем процесс ИД с опорой на компьютерное моделирование закономерностей развития творческих способностей. Ключевыми элементами онтологии должны стать единые МСК НИР и МСК оценки личностных качеств молодого исследователя, ММ оптимизации развивающей структуры очередной НИР, ММ формирования оптимальных вариантов личностного развития молодого исследователя, КС направляющей поддержки индивидуального развития молодых исследователей, а также научно-производственное сообщество, «Дом учёных» и Центр управления и развития НОРС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Пиявский С.А.** Онтология направляемого развития научных способностей молодёжи. Часть 1: основные понятия и модели // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №3(49). С.405-423. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-3-405-423.
 - [2] Концепция Единой Самарской областной системы мер по выявлению и развитию творчески одарённой молодёжи в сфере науки, техники и технологий и инновационному развитию Самарской области. - <https://educat.samregion.ru/wp-content/uploads/sites/22/2020/06/pryamaya-ssylka-7-konceptziya-edinoj-sistemy.pdf>.
 - [3] Рабочая концепция одарённости / под ред. Д. Б. Богоявленской, В. Д. Шадрикова. М.: Магистр, 1998. 68 с.
 - [4] **Богоявленская Д.Б.** Психология творческих способностей. М.: Издат. центр «Академия», 2002. 320 с.
 - [5] **Юнг К.Г.** Божественный ребенок / воспитание: Сб. - М.: "О. АСТ-ЛТД", 1997. 400 с.
 - [6] **Пиявский С.А.** Исследовательская деятельность студентов в инновационном вузе: учебник. – Самара: СГАСУ, 2011. 198 с.
 - [7] IQ тест Айзенка № 1 Электронный ресурс: <https://onlinetestpad.com/ru/test/16241-iq-test-ajzenka-1>.
 - [8] Тест креативности Торренса. Диагностика творческого мышления. Электронный ресурс: https://spkaltan.ucoz.net/praktikum/torrens_s_primerami_i_objasnenijami.pdf.
 - [9] **Ковалёв С.В.** Тест-опросник «Определение уровня самооценки». Электронный ресурс: <https://infourok.ru/test-oprosnik-opredelenie-urovnya-samoocenki-s.v.kovalev-374172.htm>.
 - [10] **Гильбух Ю.З.** Тест-опросник коммуникативных умений. 1995 г. Электронный ресурс: <https://psytests.org/ipl/okum.html>.
 - [11] **Жариков Е., Крушельницкий Е.** Диагностика лидерских способностей. Электронный ресурс: <https://onlinetestpad.com/ru/test/1395-diagnostika-liderskikh-sposobnostej-e-zharikov-e-krushelnickij>.
 - [12] **Тарасов Е.А.** ВикиЧтение. Как открыть и развить свои сверхспособности. 30 тестов. Тест 16. Обладаете ли вы даром убеждения. Электронный ресурс: <https://staff.wikireading.ru/22042>.
 - [13] **Буянов Е.** Проспект курса «Современная риторика». Электронный ресурс: https://4brain.ru/Ind/?cb=ritorika&ici_source=inlbanner&ici_medium=inl52.
 - [14] Методика "Корректирующая проба" (Проба Бурдона, Кольца Ландольта). Электронный ресурс: https://metodorf.ru/tests/korrekt_proba.php.
 - [15] **Киршева Н.В., Рябчикова Н.В.** Тест на самооценку стрессоустойчивости личности. Электронный ресурс: <https://psychiatry-test.ru/test/test-na-samoocenku-stressoustojchivosti-lichnosti/>.
 - [16] **Пиявский С.А., Малышев В.В.** Новые методы принятия многокритериальных решений в цифровой среде. – М.: Наука, 2022. 391 с.
 - [17] Всеобщая декларация прав человека. Электронный ресурс: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/declhr.shtml.
 - [18] Кодекс этики учёных и инженеров. Электронный ресурс: <http://www.rusea.info/ethics>.
-

Сведения об авторе



Пиявский Семён Авраамович, 1941 г. рождения. Окончил факультет летательных аппаратов Куйбышевского авиационного института (1964), аспирантуру Московского авиационного института им. С. Орджоникидзе (1967). Доктор технических наук (2001), профессор (1995), главный научный сотрудник, научный руководитель межвузовской научно-методической лаборатории цифровых образовательных технологий развития творческих способностей молодёжи Самарского филиала Московского городского педагогического университета. Почётный работник высшей школы РФ, академик Академии наук о Земле и Академии нелинейных наук. Опубликовал более 450 научных работ в области системного анализа, методов оптимизации и принятия решений, математического моделирования, образовательных систем и технологий. AuthorID (РИНЦ): 149149. Author ID (Scopus): 14045611600. spiyav@mail.ru.

Поступила в редакцию 24.08.2023, после рецензирования 25.09.2023. Принята к публикации 5.11.2023.



Ontology of guided development of scientific abilities of young people. Part 2: General scheme

© 2023, S.A. Piyavsky

Samara Branch of the State Autonomous Educational Institution
of Higher Education Moscow City Pedagogical University, Samara, Russia

Annotation

The formation of a holistic ontology of developmental activities of gifted youth aged between 14 and 23, called “advanced educational and research activities,” which began in the first part of the article [1], is continued. This form of independent activity of a motivated schoolchild or student is aimed at satisfying his cognitive, intellectual and other needs and developing creative potential, is associated with the consistent solution of research problems, and is supported by a specially organized developmental scientific and educational environment, which involves a periodic unified assessment of the developmental effect and the scientific significance of the results obtained. In addition to the article's first part [1], the ontology of the development of a young researcher's personality characteristics, which include research activity, erudition, range of interests and socialization in the scientific community, is described. For the first time, on a quantitative basis using the author's mathematical model, the possibilities of taking into account the connection between research functionality and the research motivation of a young researcher when planning the developmental structure of research work are analyzed. The blocks of erudition, range of interests and socialization of a multifaceted system of criteria for assessing personal qualities are proposed. The general scheme of the guided development of a young researcher within the framework of his educational and research activities is described on the basis of such concepts as: multifaceted systems of criteria for assessing research work and the personal characteristics of a young researcher, a mathematical model for optimizing the developmental structure of research work, a mathematical model for the formation of optimal options for personal development, a consulting system of guiding support for individual development, etc. The introduced concepts are combined in the form of a graphic diagram of the ontology of guided development of scientific abilities of young people.

Keywords: *gifted youth, research activity, guided development, multicriteria, modeling, ontology, educational process.*

For citation: Piyavsky SA. Ontology of guided development of scientific abilities of young people. Part 2: General scheme [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 597-614. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-597-614.

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

List of figures and tables

Figure 1 – Ontology diagram for the guided development of scientific abilities of young people

Figure 2 – Characteristics of the planned research work 0 (RW_0) depending on the varying coefficient MKrel of the relative importance of motivation in the complex optimality criterion

Figure 3 – Characteristics of the planned research work (RW_2) depending on the varying coefficient MKrel of the relative importance of motivation in the complex optimality criterion

Figure 4 – The influence of the requirement for at least partial motivation of the author on the increase in labor intensity (and, accordingly, the content value) of research work carried out and on the creative rating of its author

Figure 5 – Scheme of ratings and profiles of a young researcher in the Unified Developmental Scientific and Educational Environment

Table 1 – Example of a developmental methodological structure of previous research work (RW -1)

Table 2 – Example of taking into account motivation when planning the developmental structure of RW_0

Table 3 – Example of planning the development structure of the upcoming research work

Table 4 – Influence of restrictions on the results of optimization of the structure of the planned assessment of RW_0

Table 5 – Example of a fragment of the block “Particularly significant psychological characteristics” of a multifaceted system of criteria for assessing the personal qualities of a young researcher

Table 6 – Example of a fragment of the “Erudition” block of a multifaceted system of criteria for assessing the personal qualities of a young researcher

Table 7 – Example of a fragment of the “Range of interests” block of a multifaceted system of criteria for assessing the personal qualities of a young researcher

Table 8 – Example of a fragment of the “Socialization” block of a multifaceted system of criteria for assessing the personal qualities of a young researcher

References

- [1] **Piyavsky SA.** Ontology of guided development of scientific abilities of young people. Part1: basic concepts and models [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(3): 405-423. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-405-423.
- [2] The concept of the Unified Samara regional system of measures to identify and develop creatively gifted youngsters in the field of science, engineering and technology and innovative development of the Samara region [In Russian]. - <https://educat.samregion.ru/wp-content/uploads/sites/22/2020/06/pryamaya-ssylka-7-konczepczijadi-noj-sistemy.pdf>.
- [3] Working concept of giftedness / ed. D.B. Bogoyavlenskaya, V.D. Shadrikov. Moscow: Master, 1998. 68 p.
- [4] **Bogoyavlenskaya DB.** Psychology of creativity [In Russian]. Moscow: Publishing house. Center "Academy", 2002. 320 p.
- [5] **Jung KG.** Divine Child / Parenting: Sat [In Russian]. Moscow: "O. AST-LTD", 1997. 400 p.
- [6] **Piyavsky SA.** Research activities of students at an innovative university: textbook [In Russian]. Samara: SGASU, 2011. 198 p.
- [7] Eysenck's IQ test No. 1 Electronic resource: <https://onlinetestpad.com/ru/test/16241-iq-test-ajzenka-1>.
- [8] Torrance creativity test. Diagnosis of creative thinking. Electronic resource: https://spkaltan.ucoz.net/praktikum/torrans_s_primerami_i_objasnenijami.pdf.
- [9] **Kovalev SV.** Questionnaire “Determining the level of self-esteem” [In Russian]. Electronic resource: https://infourok.ru/test-oprosnik_opredelenie_urovnya_samoocenki_s.v.kovalev-374172.htm.
- [10] **Gilbukh YuZ.** Questionnaire of communication skills [In Russian]. 1995. Electronic resource: <https://psytests.org/ipl/okum.html>.
- [11] **Zharikov E, Krushelnitsky E.** Diagnostics of leadership abilities [In Russian]. Electronic resource. <https://onlinetestpad.com/ru/test/1395-diagnostika-liderskikh-sposobnostej-e-zharikov-e-krushelnitskij>.
- [12] **Tarasov EA.** WikiReading. How to discover and develop your superpowers [In Russian]. 30 tests. Test 16. Do you have the gift of persuasion. Electronic resource: <https://staff.wikireading.ru/22042>.
- [13] **Buyanov E.** Prospectus for the course “Modern Rhetoric” [In Russian]. Electronic resource: https://4brain.ru/lnd/?cb=ritorika&ici_source=inlbanner&ici_medium=inl52.
- [14] Methodology "Corrective test" (Bourdon test, Landolt rings). Electronic resource: https://metodorf.ru/tests/korrekt_proba.php.
- [15] **Kirsheva NV, Ryabchikova NV.** Test for self-assessment of personality stress resistance [In Russian]. Electronic resource: <https://psychiatry-test.ru/test/test-na-samoocenku-stressoustojchivosti-lichnosti/>.
- [16] **Piyavsky SA, Malyshev VV.** New methods for making multi-criteria decisions in a digital environment [In Russian]. Moscow: Nauka, 2022. 391 p.
- [17] Universal Declaration of Human Rights. Electronic resource. https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/declhr.shtml
- [18] Code of Ethics for Scientists and Engineers. Electronic resource: <http://www.rusea.info/ethics>.

About the author

Semyon Avraamovich Piyavsky (b. 1941). Graduated from the Faculty of Aircraft of the Kuibyshev Aviation Institute (1964) and postgraduate studies at the Flight Dynamics Department at the Ordzhonikidze Moscow Aviation Institute (1967). Doctor of Technical Sciences (2001), Professor (1995), Chief Researcher, Supervisor of the Inter-University Scientific and Methodological Laboratory of digital educational technologies for the development of creative ability of youth of the Samara branch of the Moscow City Educational University. Honored Worker of Higher School of Russia, Academician of the Academy of Earth Sciences and Academy of Nonlinear Sciences. He has published over 450 scientific papers in the field of system analysis, optimization techniques and decision-making, mathematical modeling, education systems and technologies. AuthorID (RCI): 149149. Author ID (Scopus): 14045611600. spiyav@mail.ru.

Received August 24, 2023, Revised September 25, 2023. Accepted November 5, 2023.



О развитии подходов системной оценки безопасности при проектировании технических систем

© 2023, Д.И. Лобач

Департамент по ядерной и радиационной безопасности

Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация

Задача исследования заключается в разработке и развитии аналитических подходов для сравнительной оценки безопасности технических систем при осуществлении экспертной деятельности. Определены приоритетные направления подбора количественных демонстрационных показателей устройств и технологий, рекомендации для выбора стратегий экспертной работы при проведении экспертиз и экспертных оценок безопасности технических систем. Разработан фактологический подход для относительного (рейтингового) сравнения проектируемых, планируемых или применяемых технологий без использования экспериментальных данных при отсутствии эксплуатационного опыта. Показаны новые возможности для расширения экспертных оценок и анализа проектов оборудования и технологических решений. Их новизна заключается в применении подходов развивающейся концепции сэйфеометрики и состоит в использовании правдоподобных закономерностей для количественной оценки параметров, содержащихся в проектно-технической документации и характеризующих технические системы и комплексы. Данные для анализа могут быть подготовлены (собраны) экспертами или проектантами на основании требований и рекомендаций экспертов.

Ключевые слова: *принятие решений, безопасность, техническая система, сэйфеометрика, опыт, экспертиза, оценка проекта.*

Цитирование: *Лобач Д.И.* О развитии подходов системной оценки безопасности при проектировании технических систем // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №4(50). С.615-624. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Принятие управленческих решений по вопросам развития технических систем (ТС) должно основываться на достоверных фактах, правдоподобных моделях развития и соответствующих количественных закономерностях. Субъективное понимание производственного случая может приводить управленческий персонал к неоднозначному толкованию ситуации с позиций выполнения последующих действий, неадекватному осознанию последствий. Наибольшую ясность в ходе обсуждений и пояснений могут иметь численные сравнения с ранее достигнутыми показателями [1]. Даже относительные количественные результаты рассмотрения позволят уменьшить неопределённость при принятии решений.

Одним из важнейших показателей производства ТС является их безопасность в контексте сохранности и защищённости техники и обслуживающего её персонала. Уровень безопасности (его величина связана с вероятностью отсутствия рисков неблагоприятных событий), характеризующий это состояние, определяет существующие производственные показатели и социальные характеристики обстановки в организации.

Долгое время безопасность связывали только с происшествиями и авариями с оборудованием и не ассоциировали с его состоянием или рабочей средой [2]. Приоритетным объектом изучения была техника, а вопросам безопасности персонала должного значения не при-

давалось. В XX веке стали уделять более пристальное внимание причинам происшествий и аварий, например, старению техники, человеческому фактору, ошибкам в организационной деятельности, культуре безопасности.

Реализация сущности состояния безопасности осуществляется через системы безопасности (СБ), принимаемые при этом организационные и технические решения и меры. Эффективность функционирования СБ (выполнения функций, заданных проектной документацией), как части производства, зависит от многочисленных факторов и влияет на производство продукции. СБ могут являться частью ТС или не входить в их состав. Технические средства СБ изготавливаются в соответствии с документацией для проекта промышленного объекта, устройства, системы или технологии (далее – проект).

Оценка уровня безопасности устройств может проводиться по фактическим техническим параметрам и расчётным моделям процессов. Одна из задач удовлетворения оборудования потребительским свойствам при его использовании – сохранение безопасности на проектном уровне. Для этого проводятся периодические оценки состояния оборудования.

Части устройств и ТС имеют разные условия эксплуатации, состав компонентов и характеристики старения. При различных скоростях старения и износа элементов оборудование в целом может удовлетворять потребностям качествам и характеристикам проекта. При этом не требуется уделять внимание его обслуживанию или выделять ресурсы на его техническое поддержание. В ряде случаев состояние функциональности характеризуется уровнем безопасности устройства, который можно рассчитать, прогнозировать и отслеживать в ходе эксплуатации. Особенно это актуально для автономных и роботизированных систем.

Количественная оценка уровня безопасности является составной частью формирования совокупности данных цифрового производства, поскольку может быть использована для построения интеллектуальных моделей производств, управления или принятия решений. Плановые ориентиры производства базируются на цифровом анализе значений показателей.

Оценки безопасности и производственных возможностей для технологических прототипов, которые имеют отличия от существующих решений, базируются на наилучших ожиданиях от проектов, на проведении сравнений с существующими решениями. Для достоверной оценки безопасности инновационных технологий в конструкциях требуется продолжительное время наработки исходных данных для расчётов надёжности и рисков аварий. Полученная информация может применяться в ходе оценки безопасности для референтных комплексов и для формирования планируемых параметров экспериментальных проектов. Однако принятие оперативных управленческих решений может потребоваться в период отсутствия баз данных эксплуатационного опыта.

Например, существующие документы Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) не содержат рекомендаций для анализа новых проектов с целью их быстрой реализации. Традиционные подходы к оценке безопасности и риска базируются на данных эксплуатационного опыта. По этой причине вопросы экспертиз и экспертных оценок не могут быть решены применением методов детерминированного и вероятностного анализов. В качестве вспомогательных математических методов для оценок и анализа известны примеры переноса прикладных подходов из одних сфер в другие, например, применения евклидовой метрики [3] и кластерного анализа [4, 5].

При отсутствии данных эксплуатационного опыта развёртываемого или существующего производства численные относительные оценки можно получить с использованием разрабатываемых экспертных аналитических подходов и концепций (например, [1, 6, 7]). Этот подход базируется на переносе аналитических концепций хемометрики [8, 9] в сферу науки о безопасности при изучении количественных величин для системной оценки уровня безопасности ТС. Вместо эксплуатационных параметров здесь в ходе относительного сравнения

предлагается использовать характеристики из проектной документации для отдельных систем, устройств или технологий, а также совокупность этих характеристик. Для случаев отсутствия достаточного массива данных эксплуатационного опыта, например, в МАГАТЭ уже запланирована разработка нового документа [10].

Необходимость подтверждения безопасности инновационных технологий возникает, например, при разработке принципиально новых конструкций ядерных реакторов, а также при использовании инновационных технологий для существующих ТС.

1 Проблемы экспертных оценок

В ходе строительства производств или комплексных объектов может проводиться несколько оценок безопасности, в т.ч. по причине текущих изменений исходного проекта. Прогнозные показатели могут относить технические проекты к разным поколениям оборудования с различными уровнями обеспечения безопасности. Результаты оценок и экспертиз в совокупности обеспечивают продвижение передовых и быстро реализуемых проектов.

Активные действия по рассмотрению и сравнению проектов предпринимаются в сфере атомной энергетики. МАГАТЭ проводит последовательную работу по синхронизации знаний в этой сфере, организует подготовку по этому направлению рекомендаций для профессионалов и разработку руководства по безопасности [10]. Опыт из атомной промышленности можно использовать для других проектов и производств, в которых актуальны СБ и охрана окружающей среды.

На необходимость уделить особое внимание случаям, когда конструкция ТС и её элементы ещё недостаточно изучены на практике, не имеют эксплуатационного опыта, отмечается в документах МАГАТЭ [11, 12]. Новые проекты реакторов могут включать известные инженерные практики, использовать существующие конструкции, системы и компоненты. Прототипы или демонстрационные установки обычно находятся на разных стадиях готовности и проработки проектов, изучения их параметров, наличия эксплуатационных данных. С учётом опыта атомной промышленности при проведении экспертной деятельности можно выделить следующие группы проектов ТС:

- полностью новые проекты;
- усовершенствованные конструкции с внедрением инновационных подходов к обеспечению безопасности, применением неапробированных технологий;
- конструкции с использованием в атомной промышленности апробированных технологий из других секторов промышленности;
- проверенная ядерная технология, применённая в новых условиях или применении (например, с новыми оборудованием, элементной базой или целями), с эволюционирующими конструкциями, типовыми технологическими схемами оборудования.

В [10] приводится перечень вопросов при подтверждении безопасности инновационных технологий. Применительно к экспертной деятельности можно отметить следующие основные группы проблем использования новых технологий:

- недостаток информации о природе функционирования технологий (условия функционирования проекта, свойства материалов, механизмы деградации и старения материалов, а также наличие синергии процессов и явлений);
- недостаток данных эксплуатационного опыта;
- отсутствие опыта управления новыми технологическими решениями;
- отсутствие опыта регулирования безопасности технологий на уровне требований и положений современных норм, правил, кодексов и технических стандартов;

- ограниченная применимость существующих подходов к проектированию ТС, включая СБ, используемые в обычных реакторах;
- невозможность полноценного применения для новых проектов традиционных подходов и методов оценки безопасности, как для действующих технологий.

Для системного управления производством необходимо разрабатывать временные диаграммы, в которых отмечаются моменты времени для значимых технологических событий. Время принятия решения не должно запаздывать по отношению к событию. Начало принятия решения для аварийных событий обычно соответствует времени события. Для неаварийных событий принятию решения должен предшествовать подготовительный период.

Традиционные подходы к оценке безопасности проектов ТС основаны на использовании термодинамических величин и состояний, которые получены в ходе наработки эксплуатационного опыта. Для экспертных оценок важно располагать вспомогательными методами сравнения, опирающимися на имеющиеся данные, не требующие дополнительного времени их наработки. На основании методологии сэйфеометрики использование сравнения количественного изменения уровня безопасности или других показателей базируется на их отличиях в старых и новых технологиях [1, 6]. Полученные в ходе анализа количественные закономерности могут быть использованы для относительного или рейтингового сравнения проектируемых, планируемых или применяемых технологий без длительной наработки экспериментальных данных.

2 Вспомогательные экспертные оценки

Сравнение проектов проводится по доминирующим ключевым признакам, которые выделяют существенное различие или технические преимущества проектов. Зачастую такие признаки формируют и выявляют семейства или поколения оборудования или технологий, например, двигателей (по принципу действия и применяемому топливу), атомных электростанций (по применяемому ядерному топливу, реакторам, СБ) и т.п. Такие доминирующие признаки определяют применимость используемого оборудования, систем, технологий. В ходе выбора проектов используются экономические критерии, связанные с продвижением к новым технологиям. Характеристики проектов могут изменяться при модернизациях и модификациях устройств, систем и технологий.

При наличии эксплуатационного опыта и данных (температура и давление, вероятности, риски и др.) для экспертных качественных оценок безопасности и эффективности оборудования (например, результативности СБ или КПД рабочих систем) с использованием статистики с высоким уровнем доверительной вероятности следует опираться на объективные количественные параметры технических проектов или их комбинации. Необходимо выработать систему представительных демонстрационных показателей технологий, которые позволят проводить значимые для анализа экспертные оценки или будут дополнять существующий набор экспертных методов и технологий принятия решений.

Для развития вспомогательных аналитических концепций предпочтительно использование анализа количественных величин, поскольку при этом возможно проведение относительных сравнений и проведение численного моделирования.

Целью использования общих подходов в сэйфеометрике является начальное, без эксплуатационного опыта, рассмотрение конструкции, смягчение и/или устранение неизвестных факторов, связанных с инновационной технологией, для понимания их влияния на безопасность [1]. По этим направлениям осуществляется экспертный поиск методов вспомогательного анализа.

Физические параметры проекта ТС могут быть измерены приборами и оценены при помощи шкал физических величин, где имеются принятые эталоны и масштабы. В сэйфеометрике применение различных шкал и масштабов зависит от имеющейся в распоряжении совокупности данных и их статистики. При недостатке информации, например, если она характеризует только два состояния, то возможно только относительное сравнение величин Q_1/Q_2 , а не их разность ($Q_1 - Q_2$), поскольку масштаб неизвестен.

Реальные ТС сложны, поэтому для оценки их функционирования экспертами используются модели. Например, можно взять некоторые первичные параметры проекта ТС: N_{PC} – количество рабочих систем (РС), N_{CB} – количество СБ для рассматриваемой ТС, M_{Φ} – количество проектных или запроектных факторов опасности для этой ТС. Эти характеристики из проектной документации являются независимыми друг от друга и формируют множество параметров сэйфеометрики. Они могут быть измерены в единицах (ед.). Можно допустить, что величины и события независимы, и для их суперпозиций использовать теорему умножения вероятностей.

Некоторые соотношения показателей сэйфеометрики могут характеризовать возможности ТС, т.е. их потенциал. Такие комплексные величины раскрывают отдельные свойства проекта ТС и формируют множество потенциалов сэйфеометрики, например, $\alpha = N_{CB}/M_{\Phi}$ – степень опасности, $\tau = N_{CB}/N_{PC}$ – уровень технической оснащённости СБ, $\theta = 1/\tau = N_{PC}/N_{CB}$ – технологическая насыщенность проекта ТС. Эти величины определены в относительных единицах.

Указанные параметры и потенциалы сэйфеометрики являются детерминированными, поскольку их величины имеют конкретные значения из документации проекта ТС. Уровень безопасности ТС Q , как комплексная количественная характеристика, зависящая только от детерминированных величин параметров и потенциалов сэйфеометрики, тоже является детерминированной характеристикой и относится к потенциалам. Уровень безопасности может быть количественно оценён в относительных единицах как Q_1/Q_2 .

Количественные величины параметров и потенциалов сэйфеометрики являются независимыми, поэтому соотношения между ними могут быть эмпирическими. Провести эксперименты на реальных ТС в этой сфере практически невозможно из-за высокой их стоимости и из-за комплексного влияния человеческого фактора на начальное и конечное состояния. Как и в хеометрике, использование закономерностей теории вероятностей и математической статистики позволяет перейти от эмпирических закономерностей к функциональным [6, 7].

В [1] рассмотрена эмпирическая инвариантная зависимость между потенциалами сэйфеометрики $\alpha \times Q = const$ для систем с $\tau = const$ и указаны основные закономерности переходов между ТС с разными значениями τ . Для разных значений τ можно получить объединённый инвариант для потенциалов сэйфеометрики $\frac{\alpha \times Q}{\tau} = const$. Свойства вытекающих из этого выражения эмпирических частных инвариантных зависимостей описаны в [1].

Используя исходные выражения связи параметров и потенциалов, можно получить объединённый инвариант для параметров сэйфеометрики: $\frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}} = const$. Это выражение позволяет получить эмпирические частные инвариантные зависимости для трёх случаев, которые пред-

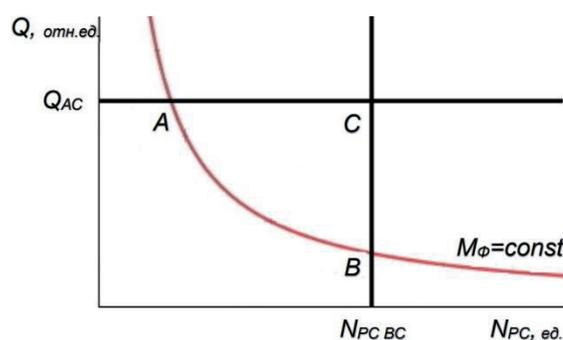


Рисунок 1 – Примеры эмпирических частных инвариантных зависимостей между некоторыми параметрами сэйфеометрики (AB гипербола; AC: $Q_{AC} = const$; BC: $N_{PC BC} = const$)

ставлены на рисунке 1 и могут быть использованы при проведении экспертного рассмотрения проектов ТС для следующих ситуаций.

- При $M_{\Phi} = const$ для одной и той же системы $\Rightarrow N_{PC} \times Q = const$, поэтому с ростом N_{PC} уровень безопасности элементов Q в проекте уменьшается. Причиной этого - то, что в проекте ТС зафиксировано N_{CB} . Для компенсации понижения Q необходимо увеличить N_{CB} . Если имеются разные системы, которые отличаются только величиной N_{PC} , то можно определить соотношение в них уровней безопасности, как Q_1/Q_2 .
- Для систем с одинаковым значением N_{PC} : $N_{PC} = const \Rightarrow Q/M_{\Phi} = const$, т.е. при увеличении проектных или запроектных факторов опасности M_{Φ} уровень безопасности элементов Q в проекте требуется увеличить. Если имеются разные системы с одинаковым значением N_{PC} , то из соотношения Q_1/Q_2 уровень безопасности Q должен быть больше там, где больше проектных или запроектных факторов опасности M_{Φ} .
- Для обеспечения одинакового уровня безопасности Q в разных системах или сохранения уровня безопасности ($Q = const$) в одной и той же системе используется эмпирическая частная инвариантная зависимость $N_{PC}/M_{\Phi} = const$ (ситуация рассматривается экспертом для конкретных случаев). Если по документации проекта ТС каждой РС соответствует одна СБ (например, имеется выключатель РС, $N_{CB} = N_{PC}$), то при увеличении проектных или запроектных факторов опасности M_{Φ} количество СБ N_{CB} требуется увеличить. Бóльшее N_{PC} или N_{CB} выдержит влияние бóльшего количества проектных или запроектных M_{Φ} .

Взаимосвязи показателей и параметров элементов в глубокоэшелонированной защите ТС также могут использоваться при сравнении проектов. Для подбора более простых количественных демонстрационных показателей технологий и зависимостей, которые показывают достоинства и отличия проектов ТС, требуется провести дополнительное исследование.

Удобными для оценки и практического анализа являются задачи определения функциональных зависимостей от одного параметра, от которых можно переходить к многопараметрическим связям. Исходное аналитическое рассмотрение удобно начинать с максимального упрощения ситуации, уменьшения количества потенциальных и фактических связей и зависимостей между параметрами.

При разработке новых параметров для анализа необходимы:

- всестороннее выявление проблем;
- изучение неопределённостей, их воздействия и потенциального их смягчения;
- использование общих подходов для устранения проблем и неопределённостей;
- применение дифференцированного подхода, основанного на оценках риска применения инновационной технологии.

В качестве таких параметров можно взять комплексные характеристики технологии, например: количество СБ; характеристики окружающей технологию среды; количество факторов опасности для функционирования ТС или её компонентов.

Для оценки «слабых» сторон проектов необходимо сформировать отдельный массив данных для особого внимания и анализа при эксплуатации и надзоре. В таком массиве следует осуществить ранжирование элементов по важности для безопасности и периодически обращаться к их рассмотрению в ходе проведения экспертной оценки или экспертизы.

3 Пример количественной оценки безопасности

В процессе функционирования предприятия, реализации проекта возникают вопросы развития производства, технологии проекта, выгодного вложения средств и усилий управления. Можно выделить два подхода: детальное рассмотрение и поддержание всех элементов

производства; использование потенциала технологий и вкладывание свободных ресурсов в «слабые» звенья проекта. Первый подход может быстро истощить возможности производства, распылить имеющиеся ресурсы. Второй – оптимизирует расходы, удобен при уменьшении численности персонала и повышении автоматизации производства.

Внедрение СБ должно сопровождаться реализацией организационных и технических мероприятий, проведением работы с персоналом, повышением его профессионализма и адаптацией к применению технологий производства и СБ. Если на практике предпринимаются не все указанные меры, то можно ввести величину ε – эффективность использования СБ. Основной упор на общую организационную работу без учёта влияния человеческого фактора может дать значительный вклад в безопасность лишь на начальном этапе вложения ресурсов. На практике роль организационных действий преувеличивается, поскольку при этом не создаётся требуемая устойчивая и возобновляемая профессиональная база для эксплуатации оборудования. Если в этот период не уделяется внимание обучению специалистов и повышению их профессионализма, то в дальнейшем использование СБ не будет полноценным.

Для эффективного использования СБ требуется развивать интеллектуальный и творческий потенциал персонала, который в дальнейшем будет полноценно обеспечивать функционирование СБ при меньших затратах. В совокупности это может вызвать эффект синергии в безопасности, который проявляется в повышении уровня безопасности от синхронизации как действий людей, так и работы технологических узлов производства.

Исследования показывают формирование клипового мышления у современных людей, которое проявляется уже на этапах обучения [13]. Поэтому необходимо применять простые количественные закономерности, которые могут позволить получить быстрый результат при сравнении абсолютных или относительных рассматриваемых величин.

Для оценки производственных действий можно предположить, что величина уровня безопасности $Q(E)$ в относительных единицах будет иметь простые эмпирические зависимости от экономических затрат на обеспечение безопасности E (выраженных в денежных единицах, ден.ед.). Для некоторых частных случаев производственных решений в виде степенных функций, удобных для анализа и сравнения (см. рисунок 2):

$$Q(E) \sim E^\varepsilon, \begin{cases} 0 < \varepsilon < 1 & \text{неэффективный подход,} \\ \varepsilon = 1 & \text{экстенсивный эффективный подход,} \\ \varepsilon > 1 & \text{эффективный подход с синергией.} \end{cases}$$

Из рисунка 2 видно, что при эффективном подходе проектный уровень безопасности $Q_{пр}$ достигается при меньших экономических затратах, чем при неэффективном подходе.

Рассмотренные подходы к решению задач сравнения проектов ТС в целях оценки уровня СБ позволяют получить дифференцированные оценки проектов. Эти задачи являются ключевыми в сфере экономики безопасности производства. Применение принципа *ALARA* (от англ. *As Low As Reasonably Achievable*) в отношении людей [14] и новых подходов, например, сэйфеометрики [1, 6] позволяют проводить сбалансированное ведение бюджета производства. Количественные оценки параметров проектов позволяют провести относительные сравнения экономических затрат проектов, а также оценить потенциальные затраты для новых проектов.

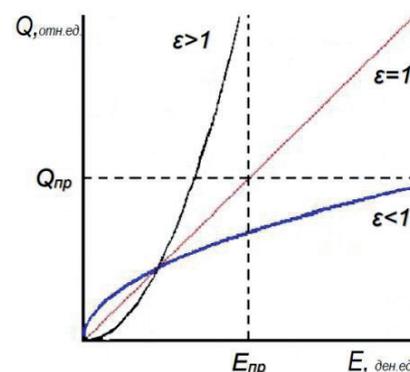


Рисунок 2 – Примеры зависимостей изменения уровня безопасности Q от экономических затрат E для разной эффективности использования СБ ε

Заключение

Предложенный вспомогательный анализ количественных закономерностей позволяет провести первичную оценку преимуществ инновационных технологий, сравнительную оценку безопасности технических комплексов, целевую предэксплуатационную оценку параметров оборудования, сформировать планируемые отличительные параметры для реализации новых, экспериментальных и коммерческих технических проектов.

МАГАТЭ уделяет внимание оценке безопасности инновационных технологий, поскольку растет интерес к современным реакторам, например, малым модульным реакторам [10]. Многие из этих конструкций реакторов могут включать инновационные технологии и методы производства. Демонстрация безопасности применяемых инноваций в конструкциях энергетических реакторов необходима для обеспечения безопасности результирующего продукта.

Применение подхода сэйфеометрики для относительного или рейтингового сравнения проектируемых, планируемых или применяемых технологий позволяет получить оценки без использования длительной наработки практических и экспериментальных данных, при отсутствии достаточного эксплуатационного опыта.

Для расширения возможностей экспертных оценок и анализа при рассмотрении проектов оборудования и технологических решений с использованием количественной оценки их параметров с новыми подходами требуются дополнительные данные из проектов ТС. Эти данные должны быть подготовлены экспертами или проектантами на основании требований или рекомендаций экспертов.

Список источников

- [1] *Лобач Д.И.* О развитии экспертных возможностей для рассмотрения проектов оборудования и технологических решений // Системный анализ и прикладная информатика. 2023. №2. С.38-41. DOI: 10.21122/2309-4923-2023-2-38-41.
- [2] *Кузнецова Е.А.* Что такое наука о безопасности? // Социально-трудовые исследования. 2019. №36(3). С.76-85. DOI: 10.34022/2658-3712-2019-36-3-76-85.
- [3] Разработать систему дополнительных мер по совершенствованию надзорной деятельности за обеспечением ядерной и радиационной безопасности Белорусской АЭС: отчёт о НИР № ГР 20213623 / ГНТУ «Центр по ядерной и радиационной безопасности»; рук. О.Н. Любочко. Минск, 2022. 186 с.
- [4] *Бериков В.С., Лбов Г.С.* Современные тенденции в кластерном анализе // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы», 2008. 26 с.
- [5] *Мандель И.Д.* Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
- [6] *Лобач Д.И.* Новые проблемы, методология и возможности сэйфеометрики // Промышленная безопасность. 2023. № 01. С.34-36.
- [7] *Лобач Д.И., Ракитская Д.В.* Сэйфеометрика. О количественной оценке величин при определении уровня безопасности // Промышленная безопасность. 2022. №10. С.46-47.
- [8] Хемометрика / М.А. Шараф, Д.Л. Иллман, Б.Р. Ковальски ; пер. с англ. А.Н. Мариничева, А.К. Чарыкова; под ред. И.А. Ибрагимова, А.К. Чарыкова. - Ленинград: Химия, Ленинградское отд-ние, 1989. 269 с.
- [9] *Дребуцак Т.Н.* Введение в хемометрику. Практика анализа экспериментальных данных / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2011. 88 с.
- [10] SPESS F Document Preparation Profile (DPP) Version 4 dated 06 October 2022. DS537. Safety demonstration of innovative technology in power reactor designs // International Atomic Energy Agency. 2022. <https://www.iaea.org/sites/default/files/dpp537.pdf>.
- [11] Оценка безопасности установок и деятельности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ. № GSR Часть 4 (Ред. 1) // Международное агентство по атомной энергии. Вена: МАГАТЭ, 2016.
- [12] Безопасность атомных электростанций: проектирование. Конкретные требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-2/1 (Ред. 1) // Международное агентство по атомной энергии. Вена: МАГАТЭ, 2016.

- [13] Ковалев М.М. Образование для цифровой экономики // Цифровая трансформация. 2018. №1 (2). С.37–42.
- [14] Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. Т.1. Физические основы защиты от излучений / Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович, А.П. Суворов; Под ред. Н.Г. Гусева. М.: Энергоатомиздат, 1989, 512 с.

Сведения об авторе



Лобач Дмитрий Иосифович, 1971 г. рождения. Окончил Белорусский государственный университет (1993), к.т.н. (1998), гражданский государственный служащий в отставке, с 2004 по июль 2023 года – работа в Департаменте по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Национальном банке Республики Беларусь, принимал участие в рассмотрении технических проектов ядерных установок по вопросам их безопасности, функционирования систем безопасности, участвовал в оценке безопасности функционирования автоматизированной системы управления технологическим процессом атомных электростанций. В списке научных трудов около 80 работ. ORCID: 0000-0001-5512-0032; ResearcherID: HKN-7220-2023; SPIN 8838-3030. lobachd@yandex.ru.

Поступила в редакцию 13.11.2023, после рецензирования 23.11.2023. Принята к публикации 30.11.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624

On the development of approaches to system safety assessment in the design of technical systems

© 2023, D.J. Lobach

Department on nuclear and radiation safety of the Ministry of emergency situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract

The purpose of the study is to develop analytical approaches for the comparative assessment of technical systems in the implementation of expert activities. In the course of the research, priority directions for the selection of quantitative demonstration indicators of devices and technologies, and recommendations for choosing strategies for expert work when conducting assessments of technical systems security have been identified. A factual approach has been developed for relative (rating) comparison of designed, planned or applied technologies without the use of experimental data in the absence of operational experience. New opportunities for expanding expert assessments and analysis of equipment designs and technological solutions are shown. Their novelty lies in the application of the approaches of the safeometrics developing concept and consists in the use of plausible patterns for quantitative assessment of the parameters contained in the design and technical documentation and characterizing technical systems and complexes. Data for analysis can be prepared (collected) by experts or designers based on the requirements and recommendations of experts.

Keywords: *decision making, security, technical system, safeometrics, experience, expertise, project assessment.*

For citation: Lobach DJ. On the development of approaches to system safety assessment in the design of technical systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 615-624. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624.

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

List of figures

Figure 1 - Examples of empirical partial invariant dependencies between some parameters of safeometrics (**AB** hyperbola; **AC**: $Q_{AC}=const$; **BC**: $N_{PC BC}=const$)

Figure 2 - Examples of dependences of safety level changes Q on the economic costs invested in safety E for different efficiency of the use of safety systems ε

References

- [1] **Lobach DJ.** On the development of expert possibilities for consideration of equipment projects and technological decisions [In Russian]. *System analysis and applied information science*. 2023; 2: 38-41. DOI: 10.21122/2309-4923-2023-2-38-41.
- [2] **Kuznetsova EA.** What is security science? [In Russian]. *Social and labor research*. 2019; 36(3): 76-85. DOI: 10.34022/2658-3712-2019-36-3-76-85.
- [3] To develop a system of additional measures to improve the supervision of the nuclear and radiation safety of the Belarusian NPP (annotated, stage 1.4): research report / GNTU «Center for Nuclear and Radiation Safety»; sup. O.N. Liubochko. – Minsk, 2022. – 186 p. – № SR 20213623.
- [4] **Berikov VS.** Modern trends in cluster analysis [In Russian] / V. S.Berikov, G. S.Lbov // All-Russian competitive selection of review and analytical articles on the priority direction "Information and telecommunication systems", 2008. – 26 p.
- [5] **Mandel ID.** Cluster analysis [In Russian]. I. D. Mandel. – M.: Finance and Statistics, 1988. – 176 p.
- [6] **Lobach DJ.** New problems, methodology and possibilities of Safeometrics [In Russian]. *Promyšlennaâ bezopasnost'*. 2023; 01: 34-36.
- [7] **Lobach DJ, Rakitskaya DV.** Safeometrics. About quantitative assessment of data for safety level determining [In Russian]. *Promyšlennaâ bezopasnost'*. 2022; 10: 46-47.
- [8] Chemometrics / Muhammad A. Sharaf, Deborah L. Illman, Bruce R. Kowalski. John Wiley & Sons, 1986. 352 p.
- [9] **Drebushchak TN.** Introduction to chemometrics. The practice of analyzing experimental data: A textbook [In Russian] / Novosibirsk State University. Novosibirsk, 2011. 88 p.
- [10] SPESS F Document Preparation Profile (DPP) Version 4 dated 06 October 2022. DS537. Safety demonstration of innovative technology in power reactor designs [Electronic resource]. International Atomic Energy Agency, 2022, Available at: <https://www.iaea.org/sites/default/files/dpp537.pdf>.
- [11] Safety assessment for facilities and activities. General safety requirements [In Russian]. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, no. GSR Part 4 (Rev. 1), 2016, IAEA, Vienna.
- [12] Safety of nuclear power plants : design. Specific safety requirements [In Russian]. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, no. SSR-2/1 (Rev. 1), 2016, IAEA, Vienna.
- [13] **Kovalev MM.** Education for the Digital Economy [In Russian]. *Digital transformation*. 2018; 1(2): 37–42.
- [14] *Zaschita ot ionizirujuschih izluchenij: V 2 t. T.1. Phizicheskiye osnovy zaschity ot izluchenij. Protection from ionizing radiation: In 2 v. V.1. Physical foundations of radiation protection [In Russian].* N.G. Gusev, V.A. Klimanov, V.P. Mashkovich, A.P. Suvorov; Edited by N.G. Gusev. 3rd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 512 p.

About the author

Dmitry J. Lobach (b. 1971) graduated from the Belarusian State University (Minsk, USSR-Belarus) in 1993, Candidate of Sciences (Technical Sciences (1998)). He is a retired civil servant, since 2004 upon 2023 – working in the Department on Nuclear and Radiation Safety of the Ministry on Emergency Situations of the Republic of Belarus, the National Bank of the Republic of Belarus. He participated in the reviews of technical projects of nuclear installations on their safety, the functioning of safety systems, as well as, participated in the safety assessment of the functioning of the automated process control system of nuclear power plants. He is a co-author of about 80 scientific articles and abstracts in the field of nuclear and radiation safety and security, expertise, nuclear law and regulation. Author ORCID: 0000-0001-5512-0032; ResearcherID: HKN-7220-2023; SPIN 8838-3030. lobachd@yandex.ru.

Received November 13, 2023. Revised November 23, 2023. Accepted November 30, 2023.

Индекс 29151

L

*exitus
magazine*

“**ONTOLOGISTS
AND DESIGNERS
OF ALL COUNTRIES
AND SUBJECT AREAS,
JOIN US!**”



<https://www.ontology-of-designing.ru/>