



ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ



6+

№2(18)/ 2020

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 2 (18)



EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.
Arshinskiy L.V.
Bachkova I.A.
Berestneva O.G.
Boukhanovsky A.V.
Bychkov I.V.
Donskoy V.I.

Dunaev M.P.
Eliseev S.V.
Gornov A.Y.
Gribova V.V.
Groumpos P.
Hodashinsky I.A.
Kalimoldaev M.N.
Karpenko A.P.
Kazakov A.L.
Khamisov O.V.
Komendantova N.P.
Lis R.
Massel L.V.
Mokhor V.V.
Moskvichev V.V.
Ovtcharova J.
Popov G.T.
Smirnov S.V.
Stylios C.
Taratukhin V.V.
Voevodin V.V.
Voropai N.I.
Woern H.
Wolfengagen V.E.
Yusupova N.I.
Zorina T.G.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Бачкова И.А., Болгария, София, ХТМУ
Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Донской В.И., д.ф.-м.н., Симферополь, Таврическая академия Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского
Дунаев М.П., д.т.н., Иркутск, ИРНТУ
Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Грумπος П., Греция, University of Patras
Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Казakov А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, IASIA
Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины
Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАН
Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Вёрен Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ
Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.
Executive Editor
Bakhvalova Z.A.
Editor Kopaigorodsky A.N.
Editor Massel A.G.
Designer Pesterev D.V.

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор Массель Л.В. д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Выпускающий редактор Бахвалова З.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор Копайгородский А.Н. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор Массель А.Г. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Дизайнер Пестерев Д.В. Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Адрес учредителя, издателя и редакции

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 441
Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 440

Массель Л.В., e-mail: massel@isem.irk.ru
Бахвалова З.А. e-mail: zinand@isem.irk.ru

Сайт журнала и конференции ИМТ - <https://www.imt-journal.ru/>

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН

© Все права принадлежат авторам публикуемых статей.

Дата выхода 24.07.2020 г. Тираж 100 экз.
Цена свободная. (6+)

© Издательство ИСЭМ СО РАН

Технологии искусственного интеллекта и их применение

Тучкова Н.П., Атаева О.М. Подходы к извлечению знаний в научных предметных областях	5
Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Коршунов С.А. Создание нечетких баз знаний на основе преобразования нечетких концептуальных моделей	19
Нитежук М.С., Аршинский Л. В. Неклассические логики в задаче верификации продукционных баз знаний	36
Клименко О.А., Жижимов О.Л., Юрченко А.В. Определение междисциплинарных связей между институтами СО РАН на основе анализа информационных систем	52

Информационные технологии в экономике

Давтян А.Г., Шабалина О.А., Берестнева О.Г., Лызин И.А. Причинности в социально-экономических системах: выводимость или интерпретация?	61
Черняховская Л. Р., Никулина Н. О., Гарайшин Ш. Г., Малахова А. И., Ярмухаметова Г. И. Управление бизнес-процессами на основе результатов имитационного моделирования и анализа проблемных ситуаций.	73
Артемьева И.Л., Ромашкевич П.С. Система для отслеживания эффективности экономических компаний различных отраслей	84
Ковалева Е.А., Иваньо Я.М. Программный комплекс для эколого-математического моделирования производства сельскохозяйственной продукции	94

Математическое моделирование в технике

Зорина Т.Г., Попов Б.И. Индикативный подход к оценке энергетической безопасности республики Беларусь	107
Рейзмунт Е.М. Многоуровневая модель сегмента зеркала параболической антенны для анализа чувствительности силовых характеристик к конструктивным факторам	124
Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией	134
Подкорытов А.А., Куцый Н.Н. Применение методики Бокса и Дженкинса для идентификации работы газоздушного тракта котельного агрегата	144

Artificial intelligence technologies and their applications

Tuchkova N.P., Ataeva O. M. Approaches to knowledge extraction in scientific subject domains	5
Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O. A., Yurin A.Yu., Korshunov S.A. Fuzzy knowledge base engineering based on transformation of fuzzy conceptual models	19
Nitezhuk M.S., Arshinskiy L.V. Nonclassical logics in rule-based system verification problem	36
Klimenko O.A., Zhizhimov O.I. , Yurchenko A.V. Determination of interdisciplinary connections between the institutes of the SB RAS based on the analysis of information systems	52

Information technology in the economy

Davtian A.G., Shabalina O.A., Berestneva O.G., Lyzin I.A. Causes in socio-economic systems: fertility or interpretation?	61
Chernyakhovskaya L.R., Nikulina N.O., Malakhova A.I., Garaishin S.G., Yarmuhametova G. I. Business process management based on the results of simulation modelling and problem situations analysis	73
Artemieva I.L., Romashkevich P.S. System for tracking the efficiency of economic companies in various industries	84
Kovaleva E.A., Ivanyo Y.M. Software complex for ecological and mathematical modeling of agricultural production	94

Mathematical modeling in engineering

Zorina T.G., Popov B.I. Indicative approach to assessment of energy security of the Belarus republic	107
Rejzmunt E.M. A multilevel model of a parabolic antenna mirror segment for analyzing the sensitivity of power characteristics to a design factor	124
Dunaev M.P., Dovudov S.U. Simulation of the single-phase two-level autonomous voltage inverter with frequency-pulse modulation	134
Podkorytov A.A., Kutsy N. N. Application of the boxing and jenkins technique for identification of the operation of the gas-air tract of the boiler unit	144

ПОДХОДЫ К ИЗВЛЕЧЕНИЮ ЗНАНИЙ В НАУЧНЫХ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЯХ¹

Тучкова Наталия Павловна*, Атаева Ольга Муратовна**

*natalia_tuchkova@mail.ru, к.ф.-м.н., с.н.с., ORCID [0000-0001-6518-5817]

**oli@ultimeta.ru, к.т.н., н.с., ORCID [0000-0003-0367-5575]

Вычислительный центр им. А.А. Дородницына
Федерального исследовательского центра «Информатика и управление»
Российской академии наук,
г. Москва, 119333, ул. Вавилова, 40

Аннотация. Изучается проблема извлечения знаний из разнородных оцифрованных данных. Дается обзор метрических характеристик, применимых к сравнению предметных областей по формальным признакам. Обсуждаются методы искусственного интеллекта, используемые для классификации информационных ресурсов по предметным областям, и области их применения. Приложения иллюстрируются на примере математических предметных областей.

Ключевые слова: структурирование данных, тезаурус предметной области, метрики, тезаурус ОДУ.

Цитирование: Тучкова Н. П., Атаева О. М. Подходы к извлечению знаний в научных предметных областях // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 5-18. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.001

1. Введение. Проблемы структурирования данных изучаются со времени создания первых энциклопедий, реферативных журналов, справочников и библиотек. Задачи возникали в связи с процессами *сохранения и извлечения знаний*. Их решение было всегда прерогативой специалистов предметных областей, экспертов, людей, энциклопедических знаний. Изучалось и изучается сейчас, что именно из многочисленных и разнородных данных сохранить, чтобы извлечь знания. В результате многовекового огромного труда человечество получало знания и сохраняло их в печатной форме. Для научных печатных изданий было *найденно решение в виде реферативных журналов, предметных, авторских указателей, тематических рубрикаторов и классификаторов* (ВИНИТИ, Черный, Гиляревский [11], [4] и др., Институт научной информации США, Гарфилд (Garfield E.) [18] и др.). Эти решения получили развитие в цифровую эпоху.

Цифровой век полностью перевернул представления об информации и знаниях, привел к переосмыслению публикационной и библиотечной деятельности [16]. Современное состояние проблемы представления знаний характеризуется тем, что информация и знания «перемещаются» в интернет. Естественно, что появились проблемы, связанные с представлением информации в цифровом виде и последующим ее извлечением. Текст, изданный в бумажном виде, извлекался в неизменном виде, «что написано пером, то не

¹ Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-00-00297комфи

вырубишь топором». Теперь появилась возможность получения «обработанной» и структурированной информации.

Структурирование исходной информации стало самостоятельной проблемой информационных технологий. Задачи структурирования данных перешли в область интеллектуального анализа данных. Особое значение в извлечении полезной информации из накопленных цифровых ресурсов получило использование алгоритмов искусственного интеллекта, в том числе алгоритмов машинного обучения. Успехи эвристического подхода в программировании и использование алгоритмов искусственного интеллекта демонстрируют прорыв в области обучающих систем. Тем не менее, обозначились пределы применения этих методов - это оценка результата, поскольку она основывается на предварительной классификации. Классификация, по-прежнему, нуждается в экспертных знаниях, то есть, экспертные знания должны присутствовать в цифровом образе предметных областей для отражения научного подхода в их представлении и сохранения фундаментальных знаний в цифровую эпоху.

Сочетание искусственного и естественного интеллекта, как путь прохождения знаний от человека-эксперта в цифровое пространство и обратно к человеку-потребителю знаний основан на структурировании исходных данных.

2. Задачи, относящиеся к искусственному интеллекту. Один из авторов термина «искусственный интеллект» Джон Маккарти (John McCarthy) в 1956 г. сформулировал проблемы эвристического программирования, как обеспечение того, чтобы компьютерные программы решали *действительно сложные задачи*, а именно: *поиск, распознавание образов, обучение, планирование и индукция* [23]. В процессе реализации этой идеи были разработаны языки программирования, использующие доказательства утверждений LISP, PROLOG, SMALLTALK, РЕФАЛ и др.

В толковом словаре [1] известные отечественные авторы определили «искусственный интеллект», как «свойство интеллектуальных систем выполнять *творческие функции*, которые традиционно считаются прерогативой человека». Далее дается следующее определение *системы интеллектуальной (С.И.)*: «техническая или программная система, способная решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой, хранятся в памяти С.И. Структура С.И. включает три основных блока - *базу знаний, решатель и интеллектуальный интерфейс*».

Ассоциация разработчиков искусственного интеллекта AAAI (Association for the Advancement of Artificial Intelligence), которую Джон Маккарти возглавлял в 1983-84 г., декларирует определение искусственного интеллекта как «*научное понимание механизмов, лежащих в основе мышления и разумного поведения, и их воплощение в машинах*» [20].

Авторитетные отечественные специалисты опираются также на определение искусственного интеллекта, как «одного из направлений информатики, целью которого является разработка программно-аппаратных средств, позволяющих пользователю-непрограммисту ставить и решать свои, традиционно считающиеся *интеллектуальными, задачи*, общаясь с ЭВМ на ограниченном подмножестве естественного языка» [3].

Из приведенных определений видно, что ключевое слово «интеллект», трактуется в сообществе специалистов, начиная с 50-х годов XX в., как *программа*, а слово *искусственный* является в этом контексте общепризнанным уточнением, что не

противоречит сути *компьютерной программы*, которая, собственно, и выполняет *интеллектуальные задачи, переданные ей естественным интеллектом программиста*.

Искусственный интеллект и машинное обучение в последнее время были весьма успешными во многих практических приложениях (например, распознавание речи, распознавание лиц, автономное вождение, системы восстановления, классификация изображений, обработка естественного языка, автоматизированная диагностика и др.) [19]. С распространением цифровизации, когда количество накопленной оцифрованной информации позволяет уже только машинную обработку, применение методов искусственного интеллекта стало необходимостью для анализа научных данных, в том числе библиографических.

Методы интеллектуального анализа данных включают использование различных метрик на основе статистических данных, эвристические и итерационные алгоритмы, алгоритмы машинного обучения, семантический анализ, алгоритмы распознавания – целый арсенал математических алгоритмов.

3. Ресурсы и метрики. Особенность цифровых данных заключается в том, что они изначально *неизбежно как-то структурированы*. Систематизация цифровых данных происходит практически одновременно с накоплением (иногда присутствуют стихийные, сиюминутные решения). Интеграция и обновление данных составляют самостоятельные задачи, так как это связано с дублированием данных и установлением принадлежности (авторства) информации. Следствием перечисленных особенностей является *затруднение получения достоверной, актуальной информации и извлечение из нее знаний* для удовлетворения информационной потребности пользователя. Возникают вопросы выбора поисковых систем, баз данных, критериев поиска и пр. В целом – это проблемы *сохранения и извлечения* истинных и достоверных сведений о природе и человеке. В то же время известно, что рост научных публикаций сохраняет экспоненциальный характер и для научной работы надо охватывать этот поток данных. Поэтому одним из приоритетных направлений накопления и структурирования цифровых данных продолжает оставаться *улучшение поиска с использованием метрик*.

Для оценки данных и поиска в информационных системах используются:

- *наукометрические характеристики* в разделах коллекций научных публикаций для оценки публикационной активности [10];
- *метрики квалиметрии жизни* в коллекциях статистических, медицинских и географических данных для оценки качества жизни [24];
- *метрики рекламного потенциала* в социальных сетях для оценки потребностей пользователей и маркетинга [2];
- *метрики, связанные с профессиональным профилем*, в специальных информационных бизнес-ресурсах.

В качестве одного из примеров современного подхода сохранения и извлечения знаний можно отметить проект Techopedia², где накапливается и систематизируется массив научных и коммерческих публикаций и проектов по различным разделам информационных технологий. В этом проекте в основе систематизации данных используются словари предметных областей.

² <https://www.techopedia.com/definition/1181/data-mining>

Отметим, что «пространства знаний», открытые и закрытые энциклопедии [13], построенные на онтологиях и тезаурусах предметных областей, *практически не используют метрики* посещений и цитирования.

На рис. 1 приведены некоторые примеры популярных наукометрических показателей в коллекциях (базах данных) публикаций. Основные показатели: цитируемость публикации (выше - лучше), H-индекс автора (больше - лучше), квартиль журнала (Q1 – лучше, чем Q4).

- <https://www.researchgate.net/> для каждой публикации рассчитываются показатели: Research Interest, Citations, Recommendations, Reads
- https://www.elibrary.ru/kand_ras_2019.asp для кандидатов на выборы в РАН 2019 рассчитаны показатели: число публикаций, цитирований, входящих в ядро РИНЦ, индекс Хирша по ядру РИНЦ
- <https://istina.msu.ru/home/reports/> Разделы Мои отчеты, Моя страница
- <http://www.mathnet.ru/> раздел Персоналии, Статистика Публикаций Просмотров в MathSciNet, в zbMATH, в Web of Science, в Scopus
- <https://publons.com/researcher> Web of Science, статистика и графика
- <https://www.scopus.com/Scopus> статистика и графика
- <https://www.scimagojr.com/> Scimago Journal & Country Rank

Рис. 1. Примеры наукометрических показателей в базах данных публикаций

С точки зрения сохранения и извлечения знаний совершенно неважно, из каких источников поступает информация, имеет значение только то, насколько научное экспертное сообщество вовлечено в процесс оценки качества получаемых знаний. В этом смысле особенно интересны метрики в науке и в приложениях, которые используют системы искусственного интеллекта [27].

Большинство современных подходов извлечения знаний и их структуризации заключается в оптимизации метрик, однако, если измерение становится целью, то оно перестает быть измерением. Это замечание о том влиянии, которое оказывает целеполагание, основанное на достижении некоторых метрических показателей. В каждом измерении есть определенная потребность. Получение количественной характеристики становится целью для процесса или явления, когда качественная характеристика неясна и субъективна, что в полной мере можно отнести к наукометрическим показателям.

4. Извлечение знаний. Термин «знание» обрел новое, по сравнению с доцифровым, значение, непосредственно связанное с понятием искусственного интеллекта. В классическом отечественном учебнике по искусственному интеллекту [3] есть следующие определения данных и знаний: «данные – это отдельные факты, характеризующие объекты, процессы и явления предметной области, а также их свойства»; «знания – это закономерности предметной области (принципы, связи, законы), полученные в результате практической деятельности и профессионального опыта, позволяющие специалистам ставить и решать задачи в этой области»; «знания – это хорошо структурированные данные».

Извлечение знаний человеком – процесс исключительно субъективный и зависит от уровня образования и целеполагания. Не случайно классики информационных технологий

ввели специальный термин «тезаурус адресата» [12], чтобы обозначить характер информационных потребностей пользователя в информационной среде. Извлечение знаний может трактоваться как «общение эксперта с источником знаний» [3]. Исходя из приведенных определений, информационные ресурсы, производящие знания, реализуют функции создания *структур предметных областей*.

Появление в 2003 году онтологий, как технологии учета семантических связей [26], стало поводом для многочисленных проектов представления данных. Это позволило решить множество проблем искусственного интеллекта, повлияло на решение проблем поиска, дублирования данных, верификацию, установления авторства и др. [21]. Конечно, остались и неразрешенные проблемы, например, идентификация объектов и авторов, хотя много было достигнуто в этом направлении.

На основе структурированных данных и извлеченных из них знаний можно сформировать инструменты сравнения текстов для идентификации авторов и предметных областей, используя различные меры, такие, как:

- меру сходства статей (для разных авторов),
- меру пересечения предметных областей,
- меру близости публикации той или иной предметной области,
- меры связанности терминов и т.д.

В результате можно оценить, получен новый результат или переписан старый, т.е. применить перечисленные инструменты именно для:

- сохранения приоритетов в науке;
- доказательства достоверности результатов и фактов;
- структурирования знаний и предметных областей;
- сохранения и извлечения знаний.

Также, имея терминологическое описание предметной области в виде тезауруса, можно «научить» тезаурус автоматически расширяться на основе полученных новых связей [18], [19].

5. Роль и задачи машинного обучения. Способы извлечения знаний в самом общем виде можно сгруппировать как: визуальные (зрительные), основанные на когнитивной графике графы, карты и пр. [25]; основанные на анализе семантических связей [5]; эмпирические, основанные на экспертном знании предметной области [6]; основанные на интеллектуальном анализе данных [15]. Все перечисленные способы задействованы в современных информационных системах. Учет семантических связей стал возможен только на современном этапе развития технологий онтологического моделирования, а интеллектуальный анализ – с развитием методов машинного обучения.

Основной проблемой при разработке тезаурусов и онтологий предметной области изначально является проблема приобретения знаний. Эффективным способом оказывается совмещение сбора знаний в виде онтологий и тезаурусов с методами машинного обучения. С их помощью решаются как задачи извлечения знаний, так и задачи их обновления. Предоставляются различные методы решения этих проблем.

Для повышения эффективности поиска знаний используются различные алгоритмы с построением метрической конфигурации пространства и использованием различных мер. Для извлечения знаний используются так называемые интеллектуальные алгоритмы (*Data mining часто понимают как синоним data extraction*) (см., например:

<http://www.machinelearning.ru>). Среди них методы выделения ключевых слов: частотный алгоритм (*Rapid Automatic Keyword Extraction algorithm*) (см., например: <https://medium.com/datadriveninvestor/rake-rapid-automatic-keyword-extraction-algorithm-f4ec17b2886c>), метод латентных семантик: *Latent semantic analysis, LSA, latent semantic indexing LSI* – *учет контента ключевых слов* (см., например: <https://medium.com/acing-ai/what-is-latent-semantic-analysis-lsa-4d3e2d18417a>), векторные методы, основанные на контекстном представлении документа (*Doc2vec*) (см., например: <https://radimrehurek.com/gensim/models/doc2vec.html>) и т.д. На результатах работ этих алгоритмов выводятся основные характеристики пространства знаний отдельной предметной области.

С помощью методов машинного обучения решаются задачи:

- извлечение метаданных из данных;
- слияние и отображение онтологий и тезаурусов путем анализа концептов;
- поддержка онтологий на основе анализа данных экземпляров;
- улучшение работы семантических приложений путем наблюдений за пользователями.

Для этого могут использоваться:

- кластеризация;
- инкрементное обновление онтологии и тезауруса;
- разработка и улучшение больших онтологий естественного языка
- «обучение» онтологий и тезаурусов на информационных ресурсах предметной области

5.1. Подготовка данных для извлечения знаний о предметной области.

Применение алгоритмов машинного обучения к коллекциям научных публикаций облегчается тем, что изначально научный текст уже структурирован. Тем не менее, создание структуры из набора данных требует предварительной обработки даже такой «хорошей» информации, как научная публикация.



Рис. 2. Схема подготовки данных для обобщенной модели предметных областей

На рис. 2 представлена схематически процедура анализа массива публикаций, для последующего индексирования принадлежности к определенной предметной области. Эта последовательность реализована в цифровой библиотеке LibMeta [13] для формирования пространства знаний для некоторого множества предметных областей.

На рис. 3 показана структура связей, реализованная в классической математической энциклопедии [22]. Понятия этой библиотеки для раздела «обыкновенные

дифференциальные уравнения» (ОДУ) [7] связаны семантически с объектами LibMeta, что проиллюстрировано на рис. 4.

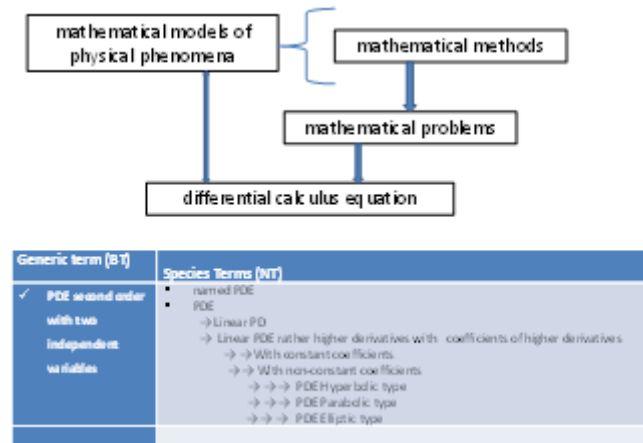


Рис. 3. Пример организации семантических связей в математической энциклопедии

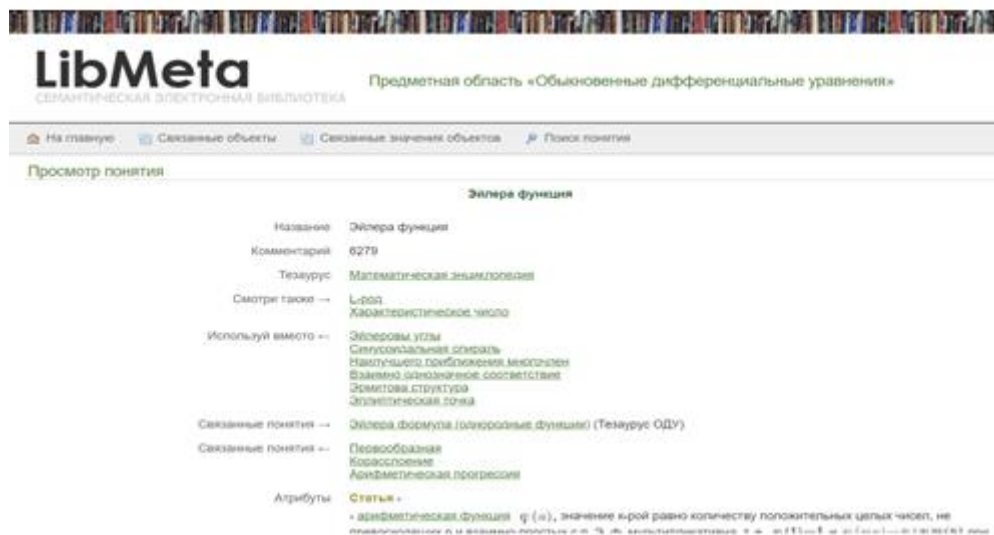


Рис. 4. Связи понятий тезауруса ОДУ LibMeta с понятиями математической энциклопедии

На рис. 5 показано, как устроены структуры данных на уровне связей между терминами предметной области и ее публикациями в семантической библиотеке LibMeta и коммерческом ресурсе Techopedia. Для сравнения выбран проект Techopedia, как наиболее развитый в разделе структурирования знаний на основе публикаций предметных областей информационных технологий. За основу представления данных предметной области в Techopedia выбран словарь (Dictionary), а в библиотеке LibMeta – тезаурус, более сложная структура, реализованная в онтологии предметных областей.

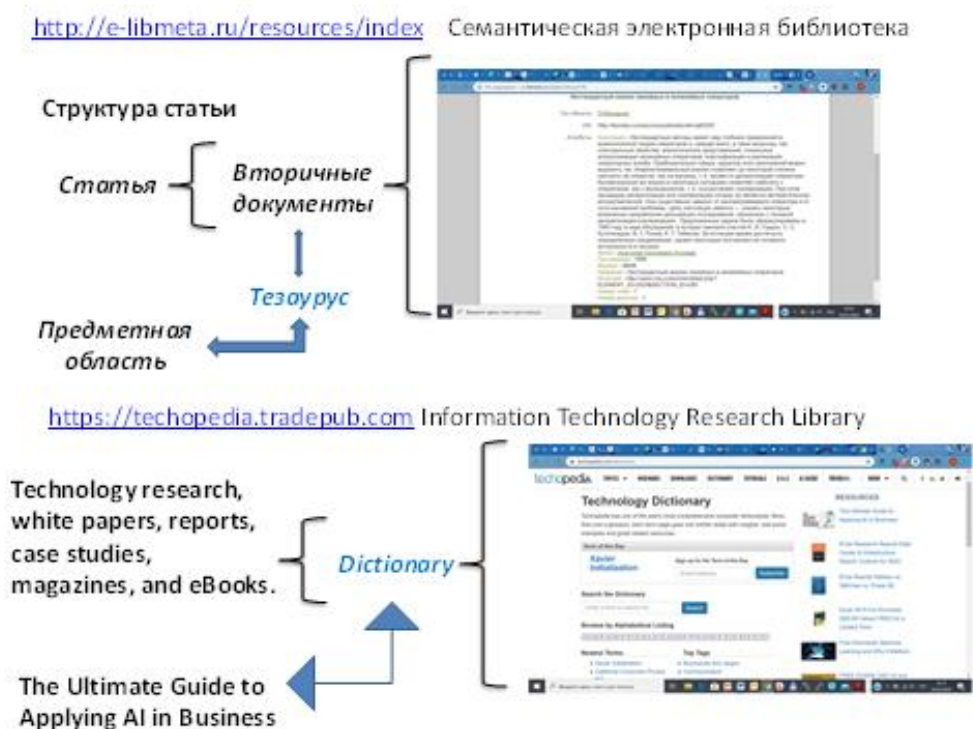


Рис. 5. Сравнение структур данных ресурсов LibMeta и Techopedia

5.2. Учет экспертного мнения. Проблема учета экспертного мнения решается с применением понятия тезауруса адресата-индивидуума, введенного в информатику Ю.А. Шрейдером [12]. В библиотеке LibMeta реализована технология составления *тезауруса предметной области автора*. Это позволяет учесть специфику авторского подхода, принадлежность определенной школе, вклад автора в предметную область, а не только публикационную активность, задаваемую наукометрическими показателями. Таким образом, экспертная позиция автора отражается через его публикации и связи с другими понятиями предметной области.

Состав данных для тезауруса адресата:

- * - частотный словарь индивидуума;
- * - варианты сочетаний терминов;
- * - контексты частотных терминов;
- * - специальные обозначения и формулы.

5.3. Структурирование предметной области. Описание предметной области основывается на терминологическом словаре со связями – тезаурусе [8, 14]. Обновление тезауруса происходит благодаря связям с вновь поступившими публикациями. Расширение тезауруса предметной области допускается путем установления связей с авторскими словарями и тезаурусами предметных областей авторов.

Семантическая поддержка понятий предметной области ОДУ, которая отвечает за классификацию ресурсов, таких как: события, теоремы, персоны, публикации, формулы, включает в себя тезаурус ОДУ, классификатор MSC, классификатор УДК. На основе тезауруса ОДУ и связанных с ним классификаторов были выявлены связи между классификаторами MSC, УДК, понятиями математической энциклопедии и формулами, составлен список ключевых слов связанных с понятиями тезауруса и формулами.

На рис. 6 приведен фрагмент тезауруса, реализованного в библиотеке LibMeta, согласно подходу о структурированном представлении данных предметной области.



Рис. 6. Тезаурус ОДУ, пример реализации.

Аналогичная структура данных, основанная на терминологическом описании предметных областей, прошла апробацию для других предметных областей, в частности отдельно реализован проект для математической энциклопедии.

6. Заключение и выводы. Сохранение данных и знаний в цифровом виде в современных масштабах вызвало необходимость нового подхода к анализу больших данных. Эти подходы основаны на создании и анализе семантических структур в виде онтологий и алгоритмов машинного обучения. Тем не менее, характеристики профессиональной научной деятельности предлагается оценивать на анализе метрик, которые не относятся к характеристикам знаний. Для автоматизации процесса оценки знаний необходимо внести механизмы экспертных оценок специалистов предметных областей, совместить экспертные системы с системами интеллектуального анализа данных, создавать интегрированные системы.

История интегрированных систем начиналась с простых диалоговых систем «компьютер-эксперт» и продолжается на современном цифровом этапе, сохраняя те же тенденции, но на основе новых технологий – структурирование данных с использованием семантических связей, обучающие и обучающиеся программы, визуализация данных и когнитивная графика. Это позволяет организовать в цифровом виде энциклопедические данные и реализовать модели предметных областей. Вопрос метрических оценок таких ресурсов переходит в плоскость получения объемов информации и связей. Метрики по-прежнему несут количественные характеристики и не дают качественных оценок накопленных знаний. Способность информационной системы вырабатывать правильное решение и оценивать его эффективность является ключом к успеху в ее эксплуатации и только в этом контексте метрики могут составлять полезное свойство системы.

Авторские разработки, изложенные в статье, соответствуют тенденциям развития информационных технологий. В частности, используя совокупность предложенных методов, можно сформировать технологию обработки информации для *вновь поступающих данных* в семантическую библиотеку, которая позволяет извлекать структурированные данные (для

научных приложений). Дальнейшие разработки направлены на получение качественных оценок публикаций в рамках предметных областей. Использование онтологий и тезаурусов предметных областей направлено на внедрение методов сравнения и получения качественных оценок при анализе знаний извлекаемых из ее ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкин А. Н., Гаазе-Рапопорт М. Г., Поспелов Д. А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. М.: Радио и связь. 1992. 256 с. <http://www.raai.org/library/tolk/aivoc.html#L208>. (доступно 15.08.2020)
2. Бродовская Е. В. Цифровые граждане, цифровое общество и цифровая гражданственность // Власть. 2019. Т. 27. № 4. С. 65-69. DOI: <https://doi.org/10.31171/vlast.v27i4.6587>. (доступно 15.08.2020)
3. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
4. Гиляревский Р.С., Шапкин А.В., Белоозеров В.Н. Рубрикатор как инструмент информационной навигации. СПб.: Профессия. 2008. 352 с.
5. Ильин Н., Киселев С., Рябышкин В., Танков С. Технологии извлечения знаний из текста // Открытые системы. СУБД. 2006 № 06 <https://www.osp.ru/os/2006/06/2700556/>. (доступно 15.08.2020)
6. Курмашин А. Полтора века - от таблицы Менделеева к Периодической системе // Наука и жизнь. 2019. № 9. С. 71-80.
7. Моисеев Е.И., Муромский А.А., Тучкова Н.П. Тезаурус информационно-поисковый по предметной области: обыкновенные дифференциальные уравнения. М.:МАКС Пресс. 2005. 116 с.
8. Муромский А.А., Тучкова Н.П. Представление математических понятий в онтологии научных знаний // Онтология проектирования. 2019. Т. 9. № 1(31). С. 50- 69. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-50-69. (доступно 15.08.2020)
9. Тучкова Н.П. Роль и возможности специализированных тезаурусов в когнитивных технологиях // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 5-15. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-01
10. Цыганов А. В. Краткое описание наукометрических показателей, основанных на цитируемости // Управление большими системами. Специальный выпуск 44: «Наукометрия и экспертиза в управлении наукой». 2013. С. 8-13. http://ubs.mtas.ru/archive/search_results_new.php?publication_id=19061. (доступно 15.08.2020)
11. Черный А.И. Введение в теорию информационного поиска. М.: Наука, 1975. 238с.
12. Шрейдер Ю. А. Тезаурусы в информатике и теоретической семантике // Научно-техническая информация. Сер. 2. 1971. № 3. С. 21-24.
13. Ataeva O.M., Sererbryakov V.A., Tuchkova N.P. Query Expansion Method Application for Searching in Mathematical Subject Domains // CEUR Workshop Proceedings, M. Jeusfeld c/o Redaktion Sun SITE, Informatik V, RWTH Aachen (Aachen, Germany). Vol. 2543, pp. 38-48.

14. Ataeva O.M., Sererbryakov V.A., Tuchkova N.P. Mathematical Physics Branches: Identifying Mixed Type Equations // Lobachevskij Journal of Mathematics. 2019. Vol. 40. № 7. Pp. 876–886. DOI: 10.1134/S1995080219070047. (доступно 15.08.2020)
15. Current Advances, Trends and Challenges of Machine Learning and Knowledge Extraction: From Machine Learning to Explainable AI: Second IFIP TC 5, TC 8/WG 8.4, 8.9, TC 12/WG 12.9 International Cross-Domain Conference, CD-MAKE 2018. Hamburg, Germany. August 27–30. 2018. Proceedings In book: Machine Learning and Knowledge Extraction 10.1007/978-3-319-99740-7_1. (доступно 15.08.2020)
16. Eberhart G. Redefining the Library in the Digital Age, <https://www.britannica.com/topic/Redefining-the-Library-in-the-Digital-Age-1369994>. (доступно 15.08.2020)
17. Encyclopedia of Mathematics. https://encyclopediaofmath.org/wiki/Main_Page. (доступно 15.08.2020)
18. Garfield E. Citation Indexes for Science // Science. 1955. Vol. 122. № 3159. Pp. 108–111.
19. Goebel R. et al. Explainable AI: the new 42. In: Holzinger A., Kieseberg P., Tjoa A., Weippl E. (eds) Machine Learning and Knowledge Extraction. CD-MAKE 2018. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 11015. Springer, Cham. 2018. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-99740-7_21. (доступно 15.08.2020)
20. Information about AI from the News, Publications, and Conferences https://www.sciencedaily.com/news/computers_math/artificial_intelligence/. (доступно 15.08.2020)
21. Leydesdorff L., Carley S., Rafols I. Global maps of science based on the new Web-of-Science categories // Scientometrics. 2013. Vol. 94 Issue 2. Pp. 589-593. <https://doi.org/10.1007/s11192-012-0784-8>. (доступно 15.08.2020)
22. Mathematical encyclopedia. Chief Editor. I.M.Vinogradov. M.: Soviet encyclopedia. 1979. 1104 p.)
23. McCarthy J. Artificial intelligence, logic and formalizing common sense. 1990 <http://jmc.stanford.edu/articles/ailogic/ailogic.pdf>.
24. Quality of Life Index. NUMBEO https://www.numbeo.com/quality-of-life/indices_explained.jsp. (доступно 15.08.2020)
25. Scientific Visualization: The Visual Extraction of Knowledge from Data. Eds: Georges-Pierre Bonneau, Thomas Ertl, Gregory M. Nielson. Springer. Mathematics and Visualization (Series). 2006 <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-30790-7.pdf>. (доступно 15.08.2020)
26. Semantic Web <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>. (доступно 15.08.2020)
27. The problem with metrics is a big problem for AI. <https://www.fast.ai/2019/09/24/metrics/>. (доступно 15.08.2020)
28. Tuchkova N.P. Intellectual Contribution of Specialized Thesauruses to Cognitive Technologies // VIth International Workshop 'Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security' (IWCI 2019). Advances in Intelligent Systems Research. 2019. Vol. 169. <https://www.atlantispress.com/proceedings/iwci-19/125917328>. DOI: 10.2991/iwci-19.2019.36. (доступно 15.08.2020)

UDK 004.89

APPROACHES TO KNOWLEDGE EXTRACTION IN SCIENTIFIC SUBJECT DOMAINS

Natalia P. Tuchkova*, Olga M. Ataeva**

*natalia_tuchkova@mail.ru, PhD., senior researcher, ORCID [0000-0001-6518-5817]

**oli@ultimeta.ru, PhD., researcher, ORCID [0000-0003-0367-5575]

Dorodnicyn Computing Center of Federal Research Center "Informatics and Control"
of Russian Academy of Science,
Vavilov st. 40, 119333 Moscow, Russia

Abstract. The studying is focusing to the problem of extracting knowledge from heterogeneous digital data. An overview of metric characteristics applicable to the comparison of subject areas by formal criteria is given. Methods of artificial intelligence used for the classification of information resources by subject domains and areas of application are presented. Applications are illustrated with mathematical subject domains.

Keywords: data structuring, domain thesaurus, metrics, ODE thesaurus.

References

1. Averkin A. N., Gaaze-Rapoport M. G., Pospelov D. A. Tolkovyj slovar' po iskusstvennomu intellektu. M.:Radio i svyaz' [Explanatory dictionary of artificial Intelligence]. 1992. 256 p. Available at: <http://www.raai.org/library/tolk/aivoc.html#L208>. (in Russian) (accessed 15.08.2020)
2. Brodovskaya E. V. Cifrovye grazhdane, cifrovoe obshchestvo i cifrovaya grazhdanstvennost' [Digital citizens, digital society and digital citizenship] // Vlast. 2019. V. 27. № 4. Pp. 65-69. DOI: <https://doi.org/10.31171/vlast.v27i4.6587>. (in Russian) (accessed 15.08.2020)
3. Gavrilova T.A., Horoshevskij V.F. Bazy znaniy intellektual'nyh sistem.[Knowledge bases of intelligent systems] SPb.: Piter. 2000. 384 p. (in Russian)
4. Gilyarevskij R.S., SHapkin A.V., Beloozerov V.N. Rubrikator kak instrument informacionnoj navigacii.[Rubricator as a tool for information navigation] Spb.: Proffesija. 2008. 352 p. (in Russian)
5. Il'in N., Kiselev S., Ryabyshkin V., Tankov S. Tekhnologii izvlecheniya znaniy iz teksta // Otkrytye sistemy. [Technologies for extracting knowledge from text] SUBD. 2006. № 06 Available at: <https://www.osp.ru/os/2006/06/2700556/>. (in Russian) (accessed 15.08.2020)
6. Kurmashin A. Poltora veka - ot tablicy Mendeleeva k Periodicheskoj sisteme [A century and a half - from the periodic table to the Periodic table] // Nauka i zhizn'. 2019. № 9. Pp. 71-80. (in Russian)
7. Moiseev E.I., Muromskij A.A., Tuchkova N.P. Tezaurus informacionno-poiskovyj po predmetnoj oblasti: obyknovennye differencial'nye uravneniya. [Information retrieval thesaurus in the subject area: ordinary differential equations] M.:MAKS Press. 2005. 116 p. (in Russian)
8. Muromskij A.A., Tuchkova N.P. Predstavlenie matematicheskikh ponyatij v ontologii nauchnyh znaniy [Representation of mathematical concepts in the ontology of scientific

- knowledge]// Ontologiya proektirovaniya. 2019. Vol. 9. № 1(31). Pp. 50-69. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-50-69. (in Russian)
9. Tuchkova N.P. Rol' i vozmozhnosti specializirovannyh tezaurusov v kognitivnyh tekhnologiyah [The role and capabilities of specialized thesauri in cognitive technologies] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2019. № 1(13). Pp. 5-15. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-01. (in Russian)
 10. Cyganov A. V. Kratkoe opisanie naukometricheskikh pokazatelej, osnovannyh na citiruемости [Brief description of scientometric indicators based on citation] // Upravlenie bol'shimi sistemami. Special'nyj vypusk 44: «Naukometriya i ekspertiza v upravlenii naukoj», 2013. Pp. 8-13. Available at: http://ubs.mtas.ru/archive/search_results_new.php?publication_id=19061 (in Russian) (accessed 15.08.2020)
 11. Chernyj A.I. Vvedenie v teoriyu informacionnogo poiska. Chernyj A.I. [Vvedenie v teoriyu informacionnogo poiska]. M.: Nauka. 1975. 238 p. (in Russian)
 12. Shrejder YU. A. Tezaurusy v informatike i teoreticheskoy semantike [Thesauri in informatics and theoretical semantics] // Nauchno-tekhnicheskaya informaciya. Seria. 2. 1971. № 3. Pp. 21-24. (in Russian)
 13. Ataeva O.M., Sererbryakov V.A., Tuchkova N.P. Query Expansion Method Application for Searching in Mathematical Subject Domains // CEUR Workshop Proceedings, M. Jeusfeld c/o Redaktion Sun SITE, Informatik V, RWTH Aachen (Aachen, Germany). Vol. 2543. Pp. 38-48.
 14. Ataeva O.M., Sererbryakov V.A., Tuchkova N.P. Mathematical Physics Branches: Identifying Mixed Type Equations // Lobachevskij Journal of Mathematics. 2019. Vol. 40. №7. Pp. 876–886. DOI: 10.1134/S1995080219070047.
 15. Current Advances, Trends and Challenges of Machine Learning and Knowledge Extraction: From Machine Learning to Explainable AI: Second IFIP TC 5, TC 8/WG 8.4, 8.9, TC 12/WG 12.9 International Cross-Domain Conference, CD-MAKE 2018, Hamburg, Germany, August 27–30, 2018, Proceedings In book: Machine Learning and Knowledge Extraction 10.1007/978-3-319-99740-7_1.
 16. Eberhart G. Redefining the Library in the Digital Age. Available at: <https://www.britannica.com/topic/Redefining-the-Library-in-the-Digital-Age-1369994>. (accessed 15.08.2020)
 17. Encyclopedia of Mathematics. Available at: https://encyclopediaofmath.org/wiki/Main_Page. (accessed 15.08.2020)
 18. Garfield E. Citation Indexes for Science // Science. 1955. Vol. 122. № 3159. Pp. 108–111.
 19. Goebel R. et al. Explainable AI: the new 42? In: Holzinger A., Kieseberg P., Tjoa A., Weippl E. (eds) Machine Learning and Knowledge Extraction. CD-MAKE 2018. Lecture Notes in Computer Science. Vol 11015. Springer, Cham. 2018. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-99740-7_21. (accessed 15.08.2020)
 20. Information about AI from the News, Publications, and Conferences. Available at: https://www.sciencedaily.com/news/computers_math/artificial_intelligence/ (accessed 15.08.2020)

21. Leydesdorff L., Carley S., Rafols I. Global maps of science based on the new Web-of-Science categories // *Scientometrics*. 2013. Vol. 94. Issue 2. Pp. 589-593. <https://doi.org/10.1007/s11192-012-0784-8>.
22. Mathematical encyclopedia. Chief Editor. I.M.Vinogradov. M.: Soviet encyclopedia. 1979. 1104 p.)
23. McCarthy J. Artificial intelligence, logic and formalizing common sense. 1990. Available at: <http://jmc.stanford.edu/articles/ailogic/ailogic.pdf>. (accessed 15.08.2020)
24. Quality of Life Index. NUMBEO. Available at: https://www.numbeo.com/quality-of-life/indices_explained.jsp. (accessed 15.08.2020)
25. Scientific Visualization: The Visual Extraction of Knowledge from Data. Eds: Georges-Pierre Bonneau, Thomas Ertl, Gregory M. Nielson. Springer. Mathematics and Visualization (Series), 2006. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-30790-7.pdf>. (accessed 15.08.2020)
26. Semantic Web. Available at: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>. (accessed 15.08.2020)
27. The problem with metrics is a big problem for AI. Available at: <https://www.fast.ai/2019/09/24/metrics/> (accessed 15.08.2020)
28. Tuchkova N.P. Intellectual Contribution of Specialized Thesauruses to Cognitive Technologies // VIth International Workshop 'Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security' (IWCI 2019). *Advances in Intelligent Systems Research*. 2019. Vol. 169. Available at: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/iwci-19/125917328>. DOI: 10.2991/iwci-19.2019.36. (accessed 15.08.2020)

УДК 004.89

СОЗДАНИЕ НЕЧЕТКИХ БАЗ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕЧЕТКИХ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Дородных Никита Олегович*, Николайчук Ольга Анатольевна**,

Юрин Александр Юрьевич***

* к.т.н., н.с., e-mail: tualatin32@mail.ru,

** д.т.н., в.н.с., e-mail: nikoly@icc.ru,

*** к.т.н., зав. лабораторией «Информационных технологий исследования
природной и техногенной безопасности», e-mail: iskander@icc.ru,

Институт динамики систем и теории управления

им. В.М. Матросова СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134,

Коршунов Сергей Андреевич

Программист «ООО ЦентраСиб»,

e-mail: info@centrasib.ru,

664003, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 277/5, 26.

Аннотация. Разработка баз знаний остается важной областью научных исследований. Эффективность этого процесса может быть повышена за счет автоматизированного анализа существующих моделей предметной области в виде концептуальных диаграмм различных типов. В данной работе предлагается подход, который может быть использован для прототипирования нечетких продукционных баз знаний путем преобразования концептуальных моделей с нечеткими факторами. Предлагаемый подход включает в себя: расширенный предметно-ориентированный декларативный язык описания моделей трансформаций (TMRL); методику автоматизированного анализа и преобразования нечетких концептуальных моделей, реализованных в XML-подобных форматах; программные средства в форме модулей-конвертеров для системы разработки баз знаний (KBDS), поддерживающие предложенный подход. Апробация подхода осуществлена при создании баз знаний для решения задач автоматизации проведения экспертизы промышленной безопасности.

Ключевые слова: получение знаний, нечеткость, нечеткая база знаний, трансформация моделей, генерация кода, нечеткая концептуальная модель, нечеткие деревья событий.

Цитирование: Дородных Н. О., Николайчук О. А., Юрин А. Ю., Коршунов С. А. Создание нечетких баз знаний на основе преобразования нечетких концептуальных моделей. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 19 – 35. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.002

Введение. Одним из способов повышения эффективности создания программного обеспечения, в частности, интеллектуальных систем и баз знаний (БЗ), является использование принципов модельно-ориентированного подхода (Model-Driven Engineering)

[16] и трансформаций концептуальных моделей, представленных в различных форматах (например, UML, IDEF1X и др.). Под концептуальными понимаются модели, представленные множеством понятий и связей между ними, которые в совокупности определяют смысловую структуру рассматриваемой предметной области вместе со свойствами и характеристиками, классификацией этих понятий по типам, ситуациям, признакам в данной области и законов протекания процессов в ней [1].

Однако, при решении реальных практических задач используемая информация часто является неточной или неопределенной, например, в случае больших объемов данных о состоянии уникальных механических и технических систем или результатах каких-либо измерений. При этом классические концептуальные модели часто не позволяют представлять и интерпретировать подобную неточность. Чтобы удовлетворить потребность в моделировании сложных объектов и процессов с учетом факторов неточности и неопределенности активно развивается область нечеткого концептуального моделирования, в частности, теория нечетких логики и множеств [15, 19, 26]. Данная теория широко применяется для расширения существующих концептуальных моделей, в части учета факторов неопределенности вербальных характеристик, неточности, разной степени уверенности, отсутствия некоторых данных и т.п. Результатом ее применения стало появление новых форматов нечетких концептуальных моделей, являющихся модификацией популярных подходов и языков концептуального моделирования, например: нечетких когнитивных карт (fuzzy cognitive maps) [24], нечетких моделей «сущность-связь» (fuzzy ER models) [33], нечетких UML моделей [29], а также нечетких древовидных семантических структур в виде нечетких деревьев событий (fuzzy event trees) или отказов (fuzzy fault trees), применяемых в области нечеткого анализа отказов и риска технических систем (fuzzy fault tree analysis и fuzzy event tree analysis) [28, 30] и др.

Данная работа является продолжением исследований авторов на тему автоматизации разработки БЗ интеллектуальных систем на основе трансформации концептуальных моделей. Ранее авторами был предложен подход [32] к автоматизированному созданию продукционных БЗ на основе анализа и преобразования различных концептуальных моделей, в частности: диаграмм классов UML [7], концепт-карт ХТМ [8], деревьев событий [4], диаграмм Исикавы [5] и др. Данные модели используются для комплексного исследования сценариев развития нежелательных (деградационных) процессов, включающих сложные взаимодействия между техническими системами и их компонентами, персоналом, внешними и внутренними воздействующими факторами.

В данной статье предлагается обобщить полученный опыт по данной тематике и применить его к обработке концептуальных моделей, содержащих нечеткую информацию. Таким образом, далее представлен подход, направленный на разработку нечетких БЗ продукционного типа путем анализа и трансформации нечетких концептуальных моделей. В частности, рассматривается:

- формальное описание процесса трансформации нечетких концептуальных моделей в код нечетких БЗ;
- расширение проблемно-ориентированного языка – Transformation Model Representation Language (TMRL) [18], обеспечивающее поддержку описания «не-факторов», таких как: неточность, неопределенность, нечеткость и др. [11];

- методика автоматизированного создания нечетких БЗ на основе трансформации нечетких концептуальных моделей с использованием TMRL.

Апробация представленного подхода осуществлена на примере трансформации нечетких диаграмм деревьев событий в код нечеткой БЗ для решения задачи прогнозирования развития деградационных процессов на нефтехимическом оборудовании, в частности, на трубчатом реакторе.

1. Состояние вопроса в области трансформации моделей

1.1. Основные положения. В общем случае трансформация моделей представляет собой процесс автоматической генерации целевой модели по исходной модели в соответствии с некоторым набором правил преобразования [17]. По существу, трансформация моделей является логическим продолжением (развитием) области преобразования программ. В специальной литературе по трансформации моделей рассматривается широкий спектр артефактов в качестве потенциальных преобразуемых объектов для процесса разработки программного обеспечения. К ним относятся различные UML-модели, характеристические модели (feature models), спецификации интерфейсов, схемы данных, компонентов и программный код. При этом сами трансформации рассматриваются с различных точек зрения [25]: по типу результата, по типу используемого языка реализации, по уровню абстракции моделей и направлению трансформаций.

Одним из основных понятий трансформации моделей является метамодель, представляющая собой модель языка, используемого для описания трансформаций. В целом для представления метамodelей и трансформаций используется четырехуровневая иерархия метамоделирования (M0-M3 схема) [16]. Более детальное описание данной схемы трансформации, применительно к инженерии знаний приводятся в [3].

На сегодняшний день существует ряд примеров подходов к автоматизированному созданию БЗ и интеллектуальных систем, основанных на принципах модельно-ориентированного подхода (Model-Driven Engineering) [16] и трансформации моделей [10, 14, 32]. Следует отметить, что эти подходы предназначены, главным образом, для четко определенных задач и не позволяют обрабатывать нечеткую и неопределенную информацию. Таким образом, обработка такой информации требует новых специальных методов и программного обеспечения.

1.2. Средства реализации модельных трансформаций. В настоящее время методы преобразования моделей базируются на графовых грамматиках (переписывании графов), теории категорий и гибридном (декларативно-императивном) подходе. Наиболее популярными языками преобразования моделей являются: QVT (Query/View/Transformation) [27] – спецификация консорциума OMG, которая определяет три языка преобразования моделей: QVTc, QVTo и QVTr; ATL (ATLAS Transformation Language) [23] – язык описания преобразований моделей, основанный на стандарте QVT, и стандартизированный язык описания ограничений, называемый OCL (Object Constraint Language); GReAT (Graph REwriting And Transformation) – язык описания модельных преобразований, основанный на подходе тройных преобразований графов [13]; Henshin – язык преобразования моделей, основанный на переписывании графов и использовании шаблонных правил, которые могут быть структурированы во вложенные единицы преобразования с четко определенной семантикой [12]; Epsilon – семейство языков и инструментов для преобразования моделей,

генерации кода, проверки моделей, миграции и рефакторинга [20]; XSLT (eXtensible Stylesheet Language Transformations) – язык преобразования XML-документов [31].

Основным недостатком этих языков преобразования моделей являются высокие требования к квалификации конечных пользователей при разработке правил преобразования. В частности, пользователю необходимо знать синтаксис и семантику определенного языка преобразования моделей, который может быть довольно сложным. Пользователь также должен знать языки метамоделирования (например, MOF, Ecore, KM3 и т. д.), которые используются для описания входных и выходных моделей, а также различные расширения и дополнения (например, OCL). Существенным недостатком почти всех языков преобразования моделей является жесткая привязка к определенным инструментам, в частности, к платформе Eclipse. Сочетание этих факторов усложняет практическое использование этих языков и инструментов в разработке БЗ и интеллектуальных систем, особенно когда преобразование концептуальных моделей предметной области производится непрограммирующими пользователями (например, экспертами предметной области, инженерами по знаниям, аналитиками и т. д.).

Таким образом, в данной статье предлагается подход к разработке нечетких БЗ на основе трансформации концептуальных моделей, содержащих нечеткие факторы. Подход ориентирован на непрограммирующих пользователей и позволяет с помощью специализированных методических, языковых и программных средств повысить эффективность создания нечетких БЗ продукционного типа.

2. Подход к разработке нечетких баз знаний на основе трансформации нечетких концептуальных моделей

2.1. Формальное описание модельных трансформаций. Предлагаемый подход позволяет автоматизировать этапы формализации и кодификации знаний за счет анализа нечетких концептуальных моделей. В свою очередь анализируемые модели – это результат этапов получения и концептуализации экспертных знаний об объекте или процессе.

Формализовать постановку задачи можно следующим образом: необходимо определить оператор преобразования нечеткой концептуальной модели:

$$T : FCM \rightarrow FKB, \quad (1)$$

где FCM – исходная нечеткая концептуальная модель; FKB – целевая БЗ на определенном языке представления нечетких знаний.

В зависимости от языка моделирования и формата представления, нечеткая концептуальная модель может обладать различной внутренней структурой, иметь различное количество элементов и отношений между ними. Однако, каждая подобная нечеткая концептуальная модель, расширенная аппаратом *нечеткой логики* (fuzzy logic) [15], на абстрактном уровне (abstract syntax) обладает единообразным определением факторов *нечеткости* и *неопределенности*.

Фактор нечеткости концептуальной модели включает определение понятия – *лингвистической (нечеткой) переменной* (fuzzy variable) для учета нечеткости в форме отдельных конструкций модели (например, нечетких классов, нечетких свойств и т.п.). Значения данной лингвистической переменной определяются через так называемые *нечеткие множества* (fuzzy sets) [11, 19], а именно: имеется базовая шкала X , каждое значение на которой определяет некоторое числовое значение, принимаемое определяемой

нечеткой переменной; функция принадлежности $\mu(x)$, принимающая значения на интервале $[0; 1]$ и отражающая субъективную степень уверенности одного эксперта в том, что данное конкретное значение базовой шкалы соответствует определяемому нечеткому множеству и принимающую значение на интервале. Таким образом, нечеткое множество A – это совокупность пар вида $x; \mu(x)$, т.е.: $A = \{(x_1; \mu(x_1)), \dots, (x_n; \mu(x_n))\}$. Данный вариант задания функции принадлежности для определения лингвистической переменной называется *табличным*. Другим вариантом задания функции принадлежности для определения лингвистической переменной является аналитический способ, для которого могут быть описаны различные виды функций принадлежности (например, треугольная, трапециевидная, S-образная и Z-образная сплайн-функция, линейная S-образная и Z-образная функция, П-образная функция и др.).

Таким образом, на уровне абстрактного синтаксиса исходную нечеткую концептуальную модель можно разделить на две части:

$$FCM = \{FV, E, R\}, \quad (2)$$

где FV – множество нечетких сущностей концептуальной модели, определенных как лингвистические переменные с использованием нечетких множеств; E – множество конкретных четких (crisp) сущностей концептуальной модели (классов, объектов, свойств, отношений и т.п.); R – множество отношений между FV и E .

Вторым базовым понятием нечетких концептуальных моделей является фактор *неопределенности*, который возникает, когда нет полной уверенности в некоторой части информации, представленной в модели (например, у пользователя нет полной уверенности в существовании определенных связей между элементами и т.д.). Степень неопределенности, как правило, представляется *коэффициентом уверенности* (certainty factor) принимающее числовое значение по шкале от 0 до 1. Данный коэффициент может относиться к любым элементам концептуальной модели, при этом если он равен 1, то считается, что данный элемент определен пользователем как верный (т.е. у пользователя есть полная уверенность в истинности данного элемента), и наоборот – если коэффициент уверенности равен 0, то данный элемент определен неверно (т.е. у пользователя есть полная уверенность в ложности данного элемента).

Используя (2) формализуем фактор неопределенности для нечеткой концептуальной модели на уровне абстрактного синтаксиса:

$$E = \{E^{cf}, E^c\},$$

где E^{cf} – множество сущностей концептуальной модели с определенными коэффициентами уверенности; E^c – множество четких сущностей концептуальной модели без коэффициентов уверенности.

Таким образом, FV и E^{cf} являются основными элементами в исходной концептуальной модели, которые задают нечеткость информации представленной в данной модели.

Уточним оператор трансформации, определенный в (1), для представления полной последовательности преобразования нечетких концептуальных моделей:

$$T = \langle T_{FCM-IRM}, T_{IRM-FKB} \rangle,$$

$$T_{FCM-IRM} : FCM^{XML} \rightarrow IRM, T_{IRM-FKB} : IRM \rightarrow FKB^{FuzzyCLIPS},$$

где $T_{FCM-IRM}$ – оператор преобразования исходной нечеткой концептуальной модели в модель нечетких продукций; $T_{IRM-FKB}$ – оператор преобразования модели нечетких продукций в код нечеткой БЗ; FCM^{XML} – исходная нечеткая концептуальная модель, представленная (сериализованная) в XML-подобном формате; IRM – модель нечетких продукций, являющиеся унифицированным средством представления извлекаемых элементов нечеткой концептуальной модели, поддерживающая описание для FV и E^{cf} ; $FKB^{FuzzyCLIPS}$ – код нечеткой БЗ на языке представления нечетких знаний – FuzzyCLIPS [22]. FuzzyCLIPS выбран как один из наиболее широко используемых языков и инструментальных сред для разработки нечетких продукционных экспертных систем.

Для решения поставленной задачи и обеспечения поддержки всех этапов трансформации, определенных в (2), предлагается использовать ранее разработанную технологию [2] и ее реализацию в виде веб-ориентированной программной системы (Knowledge Base Development System, KBDS) [9], а также разработанные метамодели IRM и $FKB^{FuzzyCLIPS}$ и метод создания метамodelей для FCM^{XML} в качестве методологической основы для поддержки синтеза нечетких БЗ [6]. Технология обеспечивает поддержку создания программных компонентов (модулей-конвертеров), предназначенных для трансформации концептуальных моделей, представленных в XML-подобных форматах, в код БЗ на целевом языке представления знаний. Для описания трансформаций в рамках данной технологии используется проблемно-ориентированный язык TMRL, предназначенный для описания и обработки четких концептуальных моделей.

Далее определим расширение TMRL, а также приведем специальную методику для поддержки синтеза нечетких БЗ на основе рассмотренной технологии и с учетом этапов трансформации, определенных в (2).

2.2. Расширение декларативного языка описания моделей трансформаций. Для описания сценариев трансформации моделей, содержащих элементы нечеткости, предлагается расширить разработанный ранее язык описания моделей трансформаций – Transformation Model Representation Language (TMRL) [18]. Грамматика TMRL относится к классу контекстно-свободных грамматик (КС-грамматик, в частности – LL (1)). TMRL описывает элементы моделей в декларативной форме, в частности, в виде правил, представляющих соответствия элементов метамодели. Спецификации TMRL отвечают требованиям точности, ясности и полноты: представлена вся необходимая информация для рассматриваемых преобразований; все объекты моделей хорошо формализованы; спецификации достаточно компактны и понятны (читабельны).

Сценарии трансформации на TMRL состоят из трех основных блоков: элементы и взаимосвязи исходной метамодели; элементы и взаимосвязи целевой метамодели; правила преобразования, описывающие соответствие между элементами исходной и целевой метамodelей. В создаваемых правилах могут использоваться логические операторы («and», «or») и оператор условного выбора («if»), в частности, с целью задания определенного значения (константы) для целевого элемента метамодели в соответствии с выполнением условия, определенного в блоке «if» (например, исходя из определенного значения

исходного элемента). Основные элементы TMRL описаны в Таблице 1. Подробное описание TMRL представлено в [18].

Таблица 1. Основные элементы TMRL

Элемент	Описание
Source Meta-Model	Описание исходной метамодели для языка моделирования (исходные концептуальные модели представлены на этом языке).
Target Meta-Model	Описание целевой метамодели для языка представления знаний (на этом языке представлена целевая нечеткая модель на основе правил).
Elements	Описание понятий исходной и целевой метамodelей.
Attributes	Описание концептуальных свойств исходной и целевой метамodelей.
Relationships	Описание взаимосвязей исходной и целевой метамodelей.
Transformation	Основная конструкция, описывающая набор правил преобразования.
Rule	Описание правила преобразования, которое определяет соответствие между понятиями или свойствами исходной и целевой метамodelей.
Call	Дополнительный блок для вызова существующего модуля преобразования, который обрабатывает эту модель.

В данной работе мы расширяем TMRL, добавляя возможность представления и обработки нечетких факторов FV и E^{cf} . В частности, добавлены следующие термы (элементы): лингвистическая (нечеткая) переменная, функция принадлежности (как в табличном, так и в аналитическом виде), нечеткое множество. Таким образом, нечеткое множество в TMRL описывается следующим образом:

```
<fuzzy set> = <description type> [<membership function type> (<membership
function parameters>)]
<description type> = table | analytical
<membership function type> = triangular | trapezoidal | ...
<membership function parameters> = (a, b, c) | (a, b, c, d) | ...
```

2.3. Методика автоматизированной разработки нечетких базы знаний

представляет собой систематизированную совокупность действий, которые нацелены на решение задачи автоматического создания кода нечеткой БЗ на FuzzyCLIPS путем трансформации исходных нечетких концептуальных моделей с использованием программных компонентов в виде модулей-конвертеров и возможностью промежуточного хранения и редактирования (уточнения) полученных нечетких знаний.

Основным принципом созданной методики является возможность использования двухступенчатой трансформации ($T_{FCM-FRM}$ и $T_{FRM-FKB}$), что повышает технологичность процесса разработки нечетких БЗ: сначала преобразование нечеткой концептуальной модели в модель нечетких продукций с возможностью модификации и уточнения полученных нечетких знаний, затем преобразование этой модели в код нечеткой БЗ на целевом ЯПЗ FuzzyCLIPS.

В общем виде автоматизированная разработка нечетких БЗ может быть представлена в виде следующей последовательности этапов (Рис. 1):

Этап 1: Анализ XML-структуры нечеткой концептуальной модели, в ходе которого выделяются понятия предметной области и их отношения, в том числе конструкции,

описывающие FV и E^{cf} . Анализ происходит на основе разработанной модели трансформации на языке TMRL.

Этап 2: Формирование модели нечетких продукций, как универсального представления нечетких знаний, независящего от исходной концептуальной модели или языка представления знаний. Подробное описание данной модели представлено в [6]. Следует отметить, что на данном этапе возможна модификация полученных нечетких продукций и добавление недостающих правил, которые не удалось извлечь на предыдущем этапе.

Этап 3: Генерация кода нечеткой БЗ в формате FuzzyCLIPS на основе модели нечетких продукций. Метамодел ь языка FuzzyCLIPS с описанием основных конструкций приводится в работах [22].

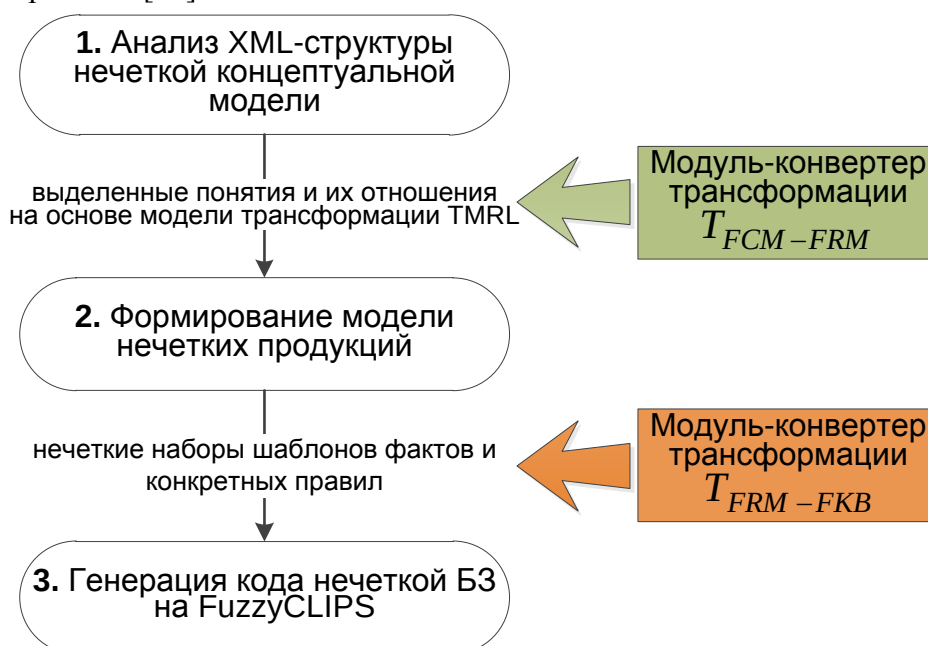


Рис. 1. Методика автоматизированной разработки нечетких БЗ на основе трансформации нечетких концептуальных моделей

Модули-конвертеры для осуществления двухступенчатой трансформации ($T_{FCM-FRM}$ и $T_{FRM-FKB}$) могут быть сформированы на основе технологии автоматической сборки программных компонентов [2, 3]. Ядром таких модулей является сценарий трансформации, определяющий набор правил преобразования на расширенном TMRL. Несмотря на простоту синтаксиса TMRL, прямое манипулирование конструкциями языка предполагается только в особых случаях. В обычной ситуации используется методика автоматизированного создания моделей трансформации и реализующий ее инструментарий, который является частью инструментальной системы KBDS, в частности:

- анализатор (XML-парсер) исходного формата нечеткой концептуальной модели;
- визуальный редактор метамоделей;
- визуальный редактор моделей трансформаций;
- генератор кода моделей трансформаций на TMRL.

С использованием этого инструментария процесс создания моделей трансформации на TMRL состоит из следующих этапов:

- создание метамодели для исходной нечеткой концептуальной модели на основе XML-схемы ее описания или путем прямого анализа структуры исходной нечеткой концептуальной модели (процедура обратной инженерии);
- выбор метамодели целевой БЗ (по умолчанию реализована метамодель нечетких продукций и FuzzyCLIPS, представленные в [6]);
- разработка модели трансформации, включая: анализ структуры исходной и целевой метамодели; построение правил трансформации в визуальном редакторе в виде соответствий между элементами исходной и целевой метамодели; генерация кода модели трансформации на TMRL; модификация полученного кода TMRL при необходимости.

На основе полученного TMRL-сценария автоматически может быть сгенерирован программный код модуля-конвертера. При этом используется концепция шаблонной или каркасной сборки, когда с разъемы (слоты) наполняются определенным содержимым, полученным на основе интерпретации модели трансформации. На текущий момент код модулей генерируется на PHP и требует доработки программистом для их дальнейшей интеграции в систему KBDS. Подробнее об этом в [2].

5. Пример применения. В качестве примера применения предлагаемого подхода рассмотрена задача трансформации концептуальных моделей в форме деревьев событий, содержащих нечеткие факторы, в код нечеткой БЗ продукционного типа. Исходные диаграммы деревьев событий в формате EETD (Extended Event Tree Diagram) были получены в процессе концептуального моделирования в прототипе веб-ориентированного программного средства Extended ETE [21]. Данные диаграммы описывают динамику развития деградиационных процессов (ДП) на рассматриваемой механической системе, в частности – рассматривается коррозионное растрескивание на стадии повреждения на уникальном трубчатом реакторе типа «труба в трубе», являющийся компонентом сложного технологического комплекса «Производство полиэтилена высокого давления» и выполняющего функцию обеспечения теплообмена между рабочей средой высокого давления и контактирующей теплообменной средой в межтрубном пространстве (в рубашке) (Рис. 2). Детально данное четкое дерево событий рассмотрено в работе [4].

В приведенном примере (Рис. 2) на диаграмме дерева событий указано два нечетких события, нечеткость которых обусловлена значениями характеризующих их параметров (параметры выделены пунктиром): «глубина микротрещин» и «длина микротрещин», а также каждому событию соответствует коэффициент уверенности, задающий вероятность происхождения того или иного события (коэффициент уверенности указан в нижней части блока события). Механизмы динамики ДП могут быть также описаны в виде нечетких диаграмм Исикавы [6]. Остальные элементы дерева являются четкими. Представление детальной информации о нечетких событиях в примере имеет вид, указанный на Рисунках 3 и 4.

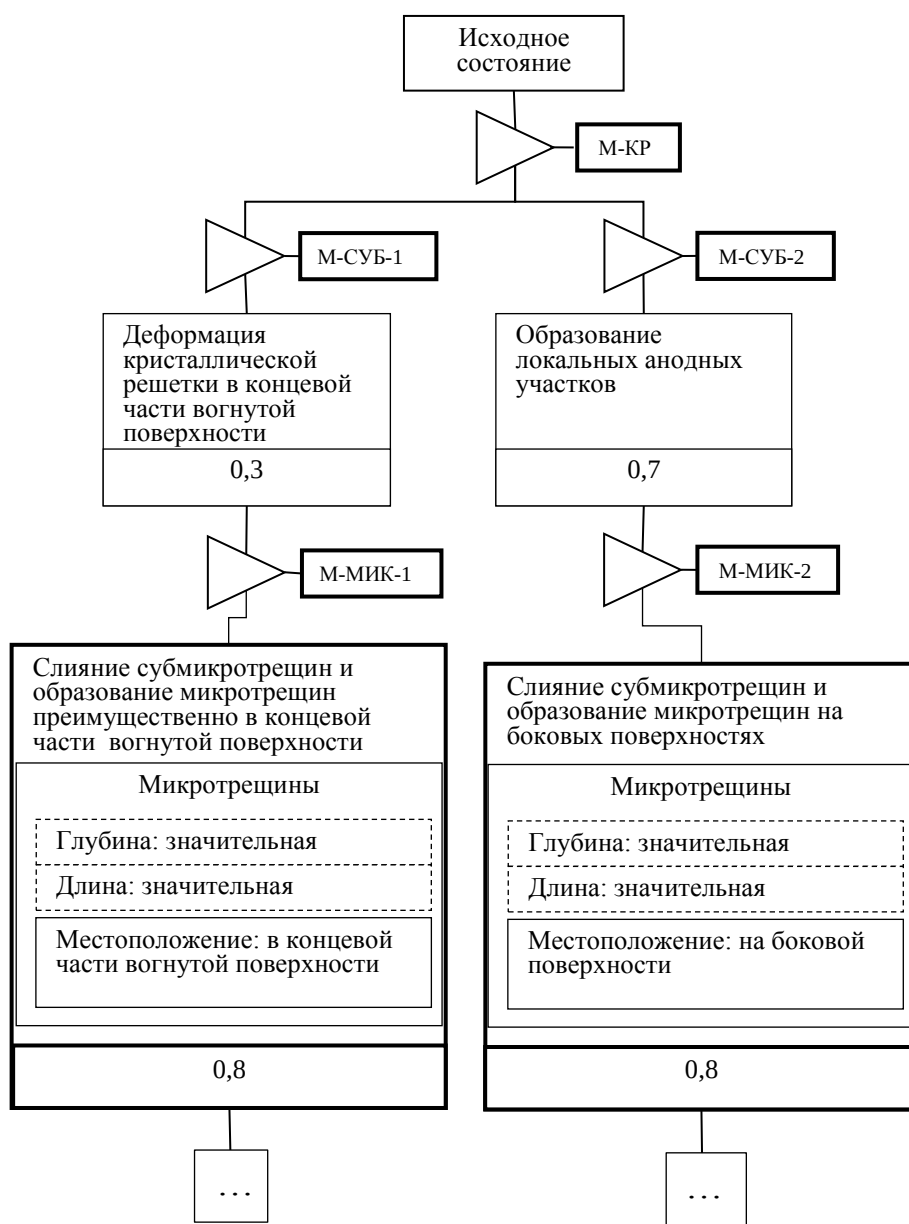


Рис. 2. Пример фрагмента нечеткой диаграммы дерева события для ДП «Коррозионное растрескивание» на стадии повреждения (треугольник – символ механизма процесса; М-КР; М-СУБ-1,2; М-МИК-1,2 – механизмы процессов коррозионного растрескивания на общем, субмикро- и микроуровнях соответственно).

Эксперта 1	Глубина : значительная
[1,0; 4,0] мм	
Треугольная (3,0; 3,5; 4,0)	

Рис. 3. Нечеткий фактор «глубина микротрещины».

Эксперта 1	Длина : значительная
[1,0; 5,0] мм	
Трапецевидная (3,0; 3,5; 4,5; 5,0)	

Рис. 4. Нечеткий фактор «длина микротрещины».

Разработка БЗ производилась согласно рассмотренной выше методике. На основе извлеченных элементов нечеткой диаграммы дерева событий сгенерирована модель нечетких продукций, как совокупность шаблонов правил (включая нечеткие). На основе полученной модели синтезирован код нечеткой БЗ на FuzzyCLIPS. Фрагмент сгенерированного кода нечеткой продукционной БЗ:

```
(deftemplate glubina
  1,0 4,0 mm
  (
    (znachitelnaia (3,0 0) (3,5 0.5) (4,5 1) )
  )
)
(deftemplate dlina
  1,0 5,0 mm
  (
    (znachitelnaia (3,0 0) (3,5 1) (4,5 1) (5,0 0) )
  )
)
...
(deffacts fuzzy-facts
  (glubina znachitelnaia)
  (dlina znachitelnaia)
)
```

Заключение. Эффективность разработки БЗ, в том числе с элементами нечеткости, может быть повышена за счет автоматизированного анализа существующих моделей предметной области в виде концептуальных диаграмм различных типов. В данной работе предлагается подход в виде совокупности методических, языковых и программных средства, которые могут быть использованы для преобразования концептуальных моделей в БЗ с учетом нечетких факторов. Дается формальное описание процесса трансформации нечетких концептуальных моделей с рассмотрением нечетких факторов, общих для различных типов концептуальных моделей. Рассмотренный подход включает: расширение предметно-ориентированного языка описания моделей трансформаций (TMRL); методику и программные средства, реализующие автоматизированный анализа и преобразования исходных нечетких концептуальных моделей, а также построение модулей-конверторов.

Прямое корректное сравнение с другими подходами, основанными на трансформации, затруднено из-за различий в их назначении и реализациях. В связи с этим возможно только качественное сопоставление некоторых отдельных их элементов, например, трансформационных языков. Сравнение показало, что основное различие между TMRL и существующими языками трансформации моделей (например, QVT, ATL и т.д.) заключается в его простоте использования, которая достигается за счет ограниченного набора элементов. TMRL не является расширением других языков и не использует конструкции других языков, как это очень часто делают другие языки преобразования (в частности, ATL использует язык ограничений OCL). Кроме того, TMRL имеет удобочитаемый синтаксис, а дополнительной особенностью TMRL является интеграция с ранее разработанными программными компонентами KBDS.

Предложенный подход реализован в виде двух экспериментальных программных компонентов (модулей-конвертеров), которые могут быть использованы в качестве автономных модулей в составе других интеллектуальных систем. Подход был апробирован при прототипировании БЗ, используемой при решении задач автоматизации проведения экспертизы промышленной безопасности, в частности, для решения задачи диагностирования состояний технических устройств, используемых на нефтехимических

производствах. В рамках решения данной задачи в настоящее время разрабатывается экспертная система идентификации ДП. На этапе создания нечеткой БЗ экспертам был предложен изложенный подход. Были получены показатели его эффективности, характеризующие повышение качества и сокращение временных затрат.

В дальнейшем мы планируем усовершенствовать разработанный инструментарий и использовать его для создания БЗ для решения междисциплинарных задач обеспечения технологической безопасности на основе самоорганизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00927).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. М.: Радио и связь, 1992. 256 с.
2. Бычков И.В., Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Подход к разработке программных компонентов для формирования баз знаний на основе концептуальных моделей // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, №4. С. 16–36.
3. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Коршунов С.А. Разработка и использование метамоделей для синтеза спецификаций и кодов баз знаний // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №2(14). С. 26–39.
4. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Автоматизированное создание продукционных баз знаний на основе деревьев событий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. №2(6). С. 30–41.
5. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Подход автоматизированной разработки баз знаний на основе трансформации диаграмм Исикавы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. №4. С. 41–51.
6. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Разработка метамоделей для поддержки синтеза нечетких баз знаний // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. №1. С. 34–47.
7. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Использование диаграмм классов UML для формирования продукционных баз знаний // Программная инженерия. 2015. №4. С. 3–9.
8. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Использование концепт-карт для автоматизированного создания продукционных баз знаний // Программные продукты и системы. 2017. №4. С. 658–662.
9. Дородных Н.О. Web-based software for automating development of knowledge bases on the basis of transformation of conceptual models // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2017. №7. С. 145–150.
10. 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. Т. 14, № 4. С. 54–68.

11. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.
12. Arendt T., Biermann E., Jurack S., Krause C., Taentzer G. Henshin: advanced concepts and tools for in-place EMF model transformations // Model Driven Engineering Languages and Systems. MODELS 2010. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6394. 2010. Pp. 121–135.
13. Balasubramanian D., Narayanan A., Buskirk C., Karsai G. The graph rewriting and transformation language: GReAT // Electronic Communications of the EASST. Vol. 1. 2006. Pp. 1–8.
14. Baumeister J., Striffler A. Knowledge-driven systems for episodic decision support // Knowledge-Based Systems. 2015. Vol. 88. Pp. 45–56.
15. Biacino L., Gerla G. Fuzzy logic, continuity and effectiveness // Archive for Mathematical Logic. Vol. 41, № 7. 2002. Pp. 643–667.
16. Cretu L.G., Florin D. Model-Driven Engineering of Information Systems: Principles, Techniques, and Practice. Apple Academic Press. 2014. 350 p.
17. Czarnecki K., Helsen S. Feature-based survey of model transformation approaches // IBM Systems Journal. Vol. 45, № 3. 2006. Pp. 621–645.
18. Dorodnykh N.O., Yurin A.Y. A domain-specific language for transformation models // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings for First Scientific-practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems. Vol. 2221. 2018. Pp. 70–75.
19. Dubois D., Prade H., Yager R.R. Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems. 1st ed. // Elsevier. 2014.
20. Epsilon. 2017. URL: <http://www.eclipse.org/epsilon/> (дата обращения: 2020-06-20).
21. Extended Event Tree Editor (EETE). 2020. Доступ: https://github.com/LedZeppelin/event_tree_editor (дата обращения: 2020-06-20).
22. Orchard R.A. FuzzyCLIPS Version 6.04A – User's Guide. Institute for Information Technology, National Research Council Canada. 1995.
23. Jouault F., Allilaire F., Bézivin J., Kurtev I. ATL: A model transformation tool // Science of Computer Programming. Vol. 72, № 1. 2008. Pp. 31–39.
24. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies. Vol. 24. 1986. Pp. 65–75.
25. Mens T., Gorp P.V. A Taxonomy of Model Transformations // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. Vol. 152. 2006. Pp. 125–142.
26. Novak V. On fuzzy type theory // Fuzzy Sets and Systems. Vol. 149, № 2. 2005. Pp. 235–273.
27. Query/View/Transformation (QVT) Version 1.3 // OMG Document formal/2016-06-03. 2016. URL: <http://www.omg.org/spec/QVT/1.3/> (дата обращения: 2020-06-20).
28. Senol Y.E., Aydogdu Y.V., Sahin B., Kilic I. Fault Tree Analysis of chemical cargo contamination by using fuzzy approach // Expert Systems with Applications. Vol. 42, № 12. 2015. Pp. 5232–5244.

29. Sicilia M.A., Garcia E., Gutierrez J.A. Integrating fuzziness in object oriented modeling language: towards a fuzzy-UML // Proceedings of International Conference on Fuzzy Sets Theory and its Applications. 2002. Pp. 66–67.
 30. Wang D., Liu E., Huang L. Event Tree Analysis of Xinda Oil Pipeline Leakage Based on Fuzzy Set Theory // The Open Civil Engineering Journal. Vol. 11. 2017. Pp. 101–108.
 31. XSL Transformations (XSLT) Version 2.0. 2007. Доступ: <http://www.w3.org/TR/xslt20> (дата обращения: 2020-06-20).
 32. Yurin A.Yu., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Grishenko M.A. Designing rule-based expert systems with the aid of the model-driven development approach // Expert Systems. Vol. 35, № 5. 2018. Pp. 1–23.
 33. Zhang F., Ma Z. M., Yan L. Representation and reasoning of fuzzy ER model with description logic // Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 2008. Pp. 1358–1365.
-

UDK 004.89

FUZZY KNOWLEDGE BASE ENGINEERING BASED ON TRANSFORMATION OF FUZZY CONCEPTUAL MODELS

Nikita O. Dorodnykh*, Olga A. Nikolaychuk, Alexander Yu. Yurin*****

* Ph.D., e-mail: tualatin32@mail.ru

** D.Sc, e-mail: grey.for@gmail.com

*** Ph.D., Head. Laboratory of Information and telecommunication technologies for investigation
of technogenic safety, e-mail: iskander@icc.ru

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences (ISDCT SB RAS)
134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia,

Sergey A. Korshunov

Programmer, CentrSib LLC, 11, e-mail: info@centrasib.ru
Karl Marx Str., 664003, Irkutsk, Russia,

Abstract. Knowledge base engineering remains an important area of scientific research. The efficiency of this process can be enhanced by an automated analysis of existing domain models in the form of conceptual diagrams of various types. In this paper, we propose an approach that can be used to prototype fuzzy rule-based knowledge bases by transforming conceptual models with fuzzy factors. The proposed approach includes: an extended domain-specific declarative language for describing transformation models (TMRL); a technique for automated analysis and transformation of fuzzy conceptual models in XML-like formats; tools in the form of converters for the Knowledge Base Development System (KBDS) supporting the proposed approach. The approach was tested when creating knowledge bases for solving problems of automation of the industrial safety inspection.

Keywords: knowledge acquisition, fuzzy, fuzzy knowledge base, model transformation, code generation, fuzzy conceptual model, fuzzy event trees

References

1. Averkin A.N., Haase-Rapoport M.G., Pospelov D.A. Explanatory Dictionary of Artificial Intelligence. Moscow: Radio and communications. 1992. (in Russian).
2. Bychkov I.V., Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Podhod k razrabotke programmnykh komponentov dlja formirovaniya baz znanij na osnove konceptual'nykh modelej [Approach to the development of software components for generation of knowledge bases based on conceptual models]. Vychislitel'nye tehnologii = Computational Technologies. Vol. 21, № 4. 2016. P. 16–36. (in Russian).
3. Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu. Avtomatizirovannoe sozdanie produkcionnykh baz znanij na osnove derev'ev sobytij [Automated creation of rule-based knowledge bases on the basis of event trees]. Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. Vol. 2, № 14. 2019. P. 26–39. (in Russian).
4. Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu. Avtomatizirovannoe sozdanie produkcionnykh baz znanij na osnove derev'ev sobytij [Automated creation of rule-based knowledge bases on the basis of event trees]. Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. Vol. 2, № 6. 2017. Pp. 30–41. (in Russian).
5. Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu. Podhod avtomatizirovannoj razrabotki baz znanij na osnove transformacii diagramm isikavy [Development of knowledge bases by means of transforming fishbone diagrams]. Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tehnologij = Herald of computer and information technologies. № 4. 2018. Pp. 41–51. (in Russian).
6. Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu. Razrabotka metamodelej dlja podderzhki sinteza nechetkih baz znanij [Metamodel engineering for supporting fuzzy knowledge base synthesis]. Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tehnologij = Herald of computer and information technologies. № 1. 2020. Pp. 34–47. (in Russian).
7. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Ispol'zovanie diagramm klassov UML dlja formirovaniya produkcionnykh baz znanij [Using UML Class Diagrams for Design of Knowledge Bases of Rule-Base Expert Systems]. Programmaya inzheneriya = Software engineering. № 4. 2015. Pp. 3–9. (in Russian).
8. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Ispol'zovanie koncept-kart dlya avtomatizirovannogo sozdaniya produkcionnykh baz znanij [Using concept maps for rule-based knowledge bases engineering]. Programmnye produkty i sistemy = Software & System. № 4. 2017. Pp. 658–662. (in Russian).
9. Dorodnykh N.O. Web-based software for automating development of knowledge bases on the basis of transformation of conceptual models. Otkrytye-semanticheskie-tehnologii-proektirovaniya-intellektualnykh-sistem = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems. 2017, № 7. Pp. 145–150.
10. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V. Primenenie ontologij pri realizacii koncepcii modelno upravlyaemoj razrabotki programmogo obespecheniya dlya

- proektirovaniya teplosnabzhayushchih sistem [Usage of ontologies in the implementation of the concept of model-driven engineering for the design of heat supply systems]. Ontologiya proektirovaniya = Ontology of design. 2014, vol. 14, № 4. Pp. 54–68. (in Russian).
11. Zadeh L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Moscow: Mir. 1976. (in Russian).
 12. Arendt T., Biermann E., Jurack S., Krause C., Taentzer G. Henshin: advanced concepts and tools for in-place EMF model transformations // Model Driven Engineering Languages and Systems. MODELS 2010. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6394. 2010. Pp. 121–135.
 13. Balasubramanian D., Narayanan A., Buskirk C., Karsai G. The graph rewriting and transformation language: GReAT // Electronic Communications of the EASST. Vol. 1. 2006. Pp. 1–8.
 14. Baumeister J., Striffler A. Knowledge-driven systems for episodic decision support // Knowledge-Based Systems. 2015. Vol. 88. Pp. 45–56.
 15. Biacino L., Gerla G. Fuzzy logic, continuity and effectiveness // Archive for Mathematical Logic. Vol. 41, № 7. 2002. Pp. 643–667.
 16. Cretu L.G., Florin D. Model-Driven Engineering of Information Systems: Principles, Techniques, and Practice. Apple Academic Press. 2014. 350 p.
 17. Czarnecki K., Helsen S. Feature-based survey of model transformation approaches // IBM Systems Journal. Vol. 45, № 3. 2006. Pp. 621–645.
 18. Dorodnykh N.O., Yurin A.Y. A domain-specific language for transformation models // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings for First Scientific-practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems. Vol. 2221. 2018. Pp. 70–75.
 19. Dubois D., Prade H., Yager R.R. Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems. 1st ed. // Elsevier. 2014.
 20. Epsilon. 2017. URL: <http://www.eclipse.org/epsilon/> (дата обращения: 2020-06-20).
 21. Extended Event Tree Editor (EETE). 2020. Доступ: https://github.com/LedZeppe1in/event_tree_editor (дата обращения: 2020-06-20).
 22. Orchard R.A. FuzzyCLIPS Version 6.04A – User’s Guide. Institute for Information Technology, National Research Council Canada. 1995.
 23. Jouault F., Allilaire F., Bézivin J., Kurtev I. ATL: A model transformation tool // Science of Computer Programming. Vol. 72, № 1. 2008. Pp. 31–39.
 24. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies. Vol. 24. 1986. Pp. 65–75.
 25. Mens T., Gorp P.V. A Taxonomy of Model Transformations // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. Vol. 152. 2006. Pp. 125–142.
 26. Novak V. On fuzzy type theory // Fuzzy Sets and Systems. Vol. 149, № 2. 2005. Pp. 235–273.
 27. Query/View/Transformation (QVT) Version 1.3 // OMG Document formal/2016-06-03. 2016. URL: <http://www.omg.org/spec/QVT/1.3/> (дата обращения: 2020-06-20).

28. Senol Y.E., Aydogdu Y.V., Sahin B., Kilic I. Fault Tree Analysis of chemical cargo contamination by using fuzzy approach // Expert Systems with Applications. Vol. 42, № 12. 2015. Pp. 5232–5244.
29. Sicilia M.A., Garcia E., Gutierrez J.A. Integrating fuzziness in object oriented modeling language: towards a fuzzy-UML // Proceedings of International Conference on Fuzzy Sets Theory and its Applications. 2002. Pp. 66–67.
30. Wang D., Liu E., Huang L. Event Tree Analysis of Xinda Oil Pipeline Leakage Based on Fuzzy Set Theory // The Open Civil Engineering Journal. Vol. 11. 2017. Pp. 101–108.
31. XSL Transformations (XSLT) Version 2.0. 2007. Доступ: <http://www.w3.org/TR/xslt20> (дата обращения: 2020-06-20).
32. Yurin A.Yu., Dorodnykh N.O., Nikolaychuk O.A., Grishenko M.A. Designing rule-based expert systems with the aid of the model-driven development approach // Expert Systems. Vol. 35, № 5. 2018. Pp. 1–23.
33. Zhang F., Ma Z. M., Yan L. Representation and reasoning of fuzzy ER model with description logic // Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 2008. Pp. 1358–1365.

УДК 004.89

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ЛОГИКИ В ЗАДАЧЕ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОДУКЦИОННЫХ БАЗ ЗНАНИЙ

Нитежук Марина Сергеевна

Старший преподаватель кафедры

«Информационные системы и защита информации»,

e-mail: marino_@mail.ru

Аршинский Леонид Вадимович

Д.т.н., доцент, e-mail: larsh@mail.ru

зав. кафедрой «Информационные системы и защита информации»,

Иркутский государственный университет путей сообщения,

664074 г. Иркутск, ул. Чернышевского 15,

Аннотация. Работа посвящена обсуждению вопросов применимости неклассических логических исчислений к задаче верификации продукционных баз знаний. Рассмотрены возможности некоторых трёхзначных, четырёхзначных, а также нечётких логик. Показано, что хорошим подходом к верификации является использование логик с векторными семантиками в форме V^{TF} -логик. Основанные на них экспертные системы смогут верифицировать свои БЗ без привлечения дополнительных (и внешних по отношению к ЭС) архитектурных элементов.

Ключевые слова: неклассические логики, логики с векторной семантикой, продукционная база знаний, верификация, экспертные системы.

Цитирование: Нитежук М. С., Аршинский Л. В.. Неклассические логики в задаче верификации продукционных баз знаний // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 36 – 51. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.003

Введение. Знаниевое моделирование и системы, основанные на знаниях (СОЗ), являются одним из устоявшихся подходов к формализации слабоструктурированных предметных областей. В то же время знаниевые модели, имеющие вид баз знаний (БЗ) экспертных систем (ЭС), особенно логические и продукционные, могут нести в себе артефакты, снижающие их ценность. Появление таких артефактов может быть обусловлено субъективным характером самих моделей, результатом технических ошибок, иными причинами. В любом случае необходимо предусматривать верификацию БЗ, проверяя их на полноту, достоверность, непротиворечивость, или хотя бы уверенно учитывать их с помощью соответствующих процедур. Причем, принимая во внимание большие размеры возможных БЗ, такие проверки желательно проводить в автоматическом или автоматизированном режиме.

Существующие подходы к верификации как правило используют методы и средства, не входящие в список штатных средств ЭС. Во многом это связано с тем, что используемые в них логики не предназначены или малопригодны для решения верификационных задач. Если статическая верификация еще может опираться на внелогические средства, то динамическая, выявляющая аномалии, возникающие в ходе логического вывода, уже тесно связана с

логикой. В работе обсуждается вопрос применения неклассических логик для динамической верификации продукционных БЗ ЭС. Затрагиваются логики и логические семантики Клини, Бочвара, Данна-Беллнана, нечёткие логики. Делается вывод о перспективности использования для этих задач логик с векторной семантикой в форме V^{TF} -логик, совмещающих в себе особенности нечётких и паранепротиворечивых логик. Обсуждаются особенности применения V^{TF} -логик для динамической верификации БЗ.

Неклассические логические исчисления в проблеме верификации. Не особо преувеличивая, можно сказать, что в основе логики как правило лежит её семантика. Именно она во многом придаёт логике те свойства и качества, ради которых логика создавалось. Выбор семантики определяет решаемый ею круг задач. Понимание этого породило в XX веке целое направление, названное неклассической логикой. Вернее, «неклассическими логиками», так как их количество на сегодняшний день крайне велико.

Анализ применимости различных логик для работы с артефактами продукционных БЗ проведём для трёх типов аномалий: ложность (малой) посылки, её противоречивость и отсутствие информации об истинности (Неопределённость). Импликацию, как ядро продукции, полагаем (строго) истинной, так как заведомо ложные знания в БЗ вряд ли будут вводиться.

Несмотря на общую направленность работы, исследование аномалий начнём с классической логики C_2 , для чего рассмотрим правило вывода *modus ponens* (MP):

$$a, a \rightarrow b \vdash b.$$

Здесь $\rightarrow$ связка импликации, $\vdash$ отделяет посылки от заключения.

Непригодность C_2 для работы с аномалиями обычно связывают с известным фактом:

$$F(a) \vdash b$$

– из лжи следует всё что угодно. Здесь $\neg$ символ отрицания. Правда для ЭС это имеет скорее общетеоретический, чем прикладной интерес, поскольку «всё что угодно» машина вывода не получит, интереснее здесь проанализировать таблицу истинности для импликации:

$a \rightarrow b$	1	0
1	1	0
0	1	1

Легко заметить, что при ложном a истинность b при истинной импликации может быть любой – и 0, и 1. Фактически это означает, что вывод в C_2 при ложном антецеденте импликации не даёт точного значения истинности её консеквента. Именно это представляется реальным препятствием для логического вывода при ложности малой посылки.

Другой особенностью C_2 является неспособность работать в ситуации противоречивости или логической неопределённости посылок, когда их значение истинности не известно. В C_2 отсутствуют значения истинности типа Противоречие и Неопределённость, работа которыми требует расширения логической семантики.

Как правило, все работы по неклассическим логиками так или иначе сводятся к одному: новая логика означает новую семантику, не сводящуюся к классическим Истине и Лжи, но имеющую их частными случаями. Именно расширение множества значений истинности даёт возможность обрабатывать ситуации, выходящие за традиционные (классические) рамки. Соответственно, для решения задачи верификации БЗ целесообразно

обращаться к логикам, способным работать в «экстремальной ситуации» артефактов знаниевой модели в силу своей семантики. Рассмотрим возможности некоторых из них.

О логиках с Противоречием, как дополнительным значением истинности, одним из первых заговорил Н.А. Васильев, который допускал существование противоречий и видел их причину в конфликте информации, поступающей из разных источников [14, 15]. Васильев высказал ряд интересных идей, но не привёл свою логику к символической форме, как это принято сегодня, и применять её для верификации достаточно проблематично.

Интересной с точки зрения верификации логикой является трёхзначная логика Клини $\mathbf{K}_3$ [19, 47] с дополнительным значением истинности, трактуемом как «неопределенно», «неизвестно», «неразрешимо». Причиной неразрешимости может стать неразрешимое противоречие, отсутствие сведений для вынесения однозначного заключения и т.п. Алгебраический аппарат логики Клини используется в нечетких логиках и связанных с ней теории нечетких множеств и отдельных разделов нечеткой математики. В частности, традиционные логические связки отрицания, дизъюнкции и конъюнкции в ней задаются как:

$$\begin{aligned} \|\sim a\| &= 1 - \|a\|; \\ \|a \vee b\| &= \max(\|a\|, \|b\|); \\ \|a \& b\| &= \min(\|a\|, \|b\|). \end{aligned}$$

Здесь a и b – суждения, $\|a\|$ и $\|b\|$ – их истинность. Таблица истинности для импликации в $\mathbf{K}_3$ выглядит следующим образом:

$a \rightarrow b$	1	$\frac{1}{2}$	0
1	1	$\frac{1}{2}$	0
$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
0	1	1	1

Легко видеть, по аналогии с $\mathbf{C}_2$, что ложность малой посылки здесь также приводит к неизвестному значению истинности заключения.

Логика $\mathbf{K}_3$ может работать с Неопределенностью. Однако при Неопределённости (неизвестности, неразрешимости) антецедента a импликация истинна только при истинном консеквенте b . Но это совпадает со случаем истинного антецедента, что может привести к коллизии. То есть $\mathbf{K}_3$ представляется плохим средством выявления таких аномалий.

Логикой «с противоречием» можно считать трёхзначную «логику бессмысленности» Д.А. Бочвара [13]. В ней введено третье значение истинности, которое разными исследователями трактуется как «противоречиво», «антиномично», «парадоксально» [28, 29, 35, 55]. Она тоже обладает свойствами, препятствующими её использованию для работы с аномалиями. Например, связка внешней импликации определяется как:

$a \rightarrow^N b$	1	$\frac{1}{2}$	0
1	1	$\frac{1}{2}$	0
$\frac{1}{2}$	1	1	1
0	1	1	1

Если организовать работу машины вывода так, что она будет способна обрабатывать сразу группу значений истинности, появление группы $\{0, \frac{1}{2}, 1\}$ становится индикатором как противоречивости, так и ложности малой посылки. То есть машина вывода не сможет разрешить эти два случая.

Своё представление многозначности предложил в работах [9-12] советский и российский логик К.И.Бахтияров. В основе разработанной им семантики лежит идея о том, что высказывания могут анализироваться с разных аспектов – сторон, мнений, позиций. При

этом каждый аспект влияет на величину истинности, а сама она способна принимать одно из трех значений: Истина «+1», Ложь «-1», Неопределенность «0». В результате истинность суждения представляет собой вектор, компоненты которого принадлежат множеству $\{-1, 0, +1\}$. Истинность сложных суждений рассчитывается покомпонентной обработкой векторов. Эта логика позволяет работать с логической неопределённостью и противоречием, но как специальное значение истинности выделена только Неопределённость. Значение Противоречие появляется неявно, когда разные аспекты принимают разные значения истинности, что также неудобно для автоматизированной верификации.

Для работы в условиях информационных проблем интересны так называемые паранепротиворечивые (параконсистентные) и релевантные логики. Достоинство паранепротиворечивых логик заключается в том, что они способны работать с неполной и/или противоречивой информацией. Ясно, что при работе с ПК достаточно типична ситуация внесения, например, в базу данных или базу знаний взаимоисключающих сведений. Если использовать их в ходе классического логического вывода, истинность заключения может быть любой. Паранепротиворечивые логики конструируются так, чтобы избежать подобных коллизий. Одни из первых исследований в это направлении провёл ещё в 50-х годах XX в. Ф.Асеньо [35].

В известном смысле к паранепротиворечивым логикам можно отнести логику K_3 и логику Бочвара. Однако паранепротиворечивость, основанная на трёх значениях истинности, ограничена по возможностям, поскольку третье значение может учитывать противоречие, либо истиннозначный провал (логическую неопределённость), но не обе ситуации вместе. Трёхзначные логики малопригодны для совместного выявления артефактов неполноты и противоречивости знаний. Единственное, сверх Истины и Лжи, значение истинности не позволяет различать эти два аномальных состояния одновременно. В связи с этим для комплексной верификации больше подходят как минимум четырехзначные логики, среди которых интерес представляет паранепротиворечивая логика Дж.М. Данна с семантикой Данна-Беллнапа [36-38, 42-44]. Она использует множество истинностных значений {Неопределённость, Ложь, Истина, Противоречие}. Здесь Ложь и Истина имеют традиционный смысл, Неопределённость связывается с отсутствием сведений (истиннозначный провал), а Противоречие с наличием сведений как подтверждающих, так и опровергающих суждение (пресыщенная оценка) [32, 33, 36-38]. Одна из трактовок этой семантики связана с концепцией множественности миров: Неопределённость – это отсутствие знания, Ложь – суждение ложно во всех мирах, Истина – оно во всех мирах истинно и Противоречие – ложно в одних и истинно в других мирах [32, 33]. Наконец её можно рассматривать совершенно отвлечённо, как множество всех подмножеств множества $\{0, 1\}$ (Ложь, Истина): $\{\emptyset, 0, 1, \{0, 1\}\}$ с тем же самым смыслом. Такая интерпретация, в частности, рассматривалась Данном [42-44].

Главным достоинством представленной семантики служит естественная формализация понятий неопределённости и противоречия. Если машина вывода ЭС работает по такой логике, она в принципе способна осуществлять логический вывод при появлении соответствующих артефактов. Если ,артефакт, появившись в посылках, даст о себе знать в ходе вывода, появляется возможность его обнаружить и устранить без использования дополнительных средств. То есть логика Данна в целом позволяет осуществлять

комплексную верификацию БЗ совместно с позиции противоречия и неполноты данных и знаний без включения в состав ЭС дополнительных средств. В частности, с её помощью возможно обнаруживать ситуации обрыва цепочек вывода, например, из-за всегда ложных посылок (следствие становится всегда неопределённым). Однако существенным её недостатком является невозможность работать с промежуточными значениями истинности подобно тому, как с ними работает логика нечёткая. Современное состояние дел в ИИ фактически требует от ЭС способности работать с непрерывными значениями истинности.

В середине 60-х гг XX в. трудами Л. Заде и его последователей были созданы теория нечётких множеств, нечёткая логика, теория нечётких чисел и нечетких отношений, и в целом нечёткая математика [21, 60]. Как известно, истинность суждений в ней (предикаты принадлежности, предикаты отношений и т.п.) выражается числом из интервала $[0,1]$. Теория нечётких множеств легла в основу специфического механизма вывода, основанного на понятиях нечёткого отношения, фаззификации и дефаззификации. Однако существуют и более простые механизмы нечёткого вывода, где термину приписывается число – степень его истинности, а не распределение $\mu_A(x)$ на множестве U . Такой взгляд связывают с представлением о «нечётких логиках в узком смысле» [45]. Более простую форму имеет в этом случае и процедура вывода. В качестве примера можно рассмотреть известную технику вывода, предложенную Шортлиффом и Бахананом в ставшей классической экспертной системе (ЭС) MYCIN [56, 57]. Роль истинности в ней играют факторы уверенности, принимающие значения из интервала $[-1, 1]$. Здесь -1 соответствует точной лжи, а $+1$ – точной истине. Фактор уверенности атомарного суждения в MYCIN определяется как разность степенью уверенности и степенью недоверия к соответствующему утверждению:

$$\|a\| = \text{Уверенность}(a) - \text{Недоверие}(a);$$

причем и степень уверенности, и степень недоверия лежат на отрезке $[0, 1]$.

Значения уверенности для конъюнкции и дизъюнкции определяются с помощью операций взятия минимума и максимума коэффициентов образующих суждений, как в логике Клини и нечетких логиках Л. Заде.

Знания в MYCIN представлены в форме продукций, правилом вывода служит МР, а истинность заключения рассчитывается в ходе присоединённого вывода как произведение истинностей посылки и соответствующей продукции:

$$a, a \rightarrow b \vdash b: \|b\| = \|a\| \cdot \|a \rightarrow b\|.$$

Неотъемлемой частью такого вывода служит процедура накопления свидетельств, выполняемая по схеме:

$$\|b\| = \|b\|_1 + \|b\|_2 - \|b\|_1 \cdot \|b\|_2,$$

если $\|b\|_1 \geq 0$ и $\|b\|_2 \geq 0$;

$$\|b\| = |\|b\|_1| + |\|b\|_2| - |\|b\|_1| \cdot |\|b\|_2|,$$

если $\|b\|_1 \leq 0$ и $\|b\|_2 \leq 0$; и

$$\|b\| = \frac{\|b\|_1 + \|b\|_2}{1 - \min(|\|b\|_1|, |\|b\|_2|)},$$

когда $\|b\|_1$ и $\|b\|_2$ имеют разные знаки. Здесь $\|b\|_1$ – начальное, а $\|b\|_2$ – полученное на очередном шаге вывода значение коэффициента уверенности (истинность) для b ; $|\dots|$ – модуль. Если ситуация априори неизвестная, берётся значение истинности (степень уверенности) $\|b\|=0$. Механизм выглядит привлекательным, но здесь также не удаётся

различить ситуацию, когда сведения об истинности отсутствуют с ситуацией, когда данные противоречивы.

Можно привести и другие примеры.

В принципе, нечеткая логика и её аналоги обладают определёнными возможностями по автоматизированному выявлению артефактов, но в их основе лежит соотношение:

$$\|a\| + \|\neg a\| = 1.$$

Как результат, они, как и упомянутые трёхзначные логики, не различают неполноту и противоречивость. Более перспективной в этом смысле выглядит векторная логика (логика с векторной семантикой), вариант которой – V^{TF} -логика – объединяет в себе свойства паранепротиворечивой и нечёткой логик [3-6].

Верификация с помощью V^{TF} -логик. Проблема выявления артефактов БЗ может решаться разными способами [1, 2, 16-18, 20, 22-27, 30, 31, 34, 39, 40, 41, 46, 48-54, 58, 59]. Как правило, все они в той или иной форме являются «надстройкой» над соответствующей ЭС. Это связано с тем, что используемые в ЭС логики слабо приспособлены или вовсе не приспособлены для работы с малодостоверными, противоречивыми, слабо обоснованными сведениями. В первую очередь это касается классической логики, вообще не признающей дефицита или противоречивости посылок. Любое суждение в ней истинно либо ложно, иного не дано. Такой взгляд хорош, когда мы имеем дело с идеальными мирами или владеем исчерпывающей информацией. Но в реальных задачах зачастую не так. Принимая те или иные решения, мы вынуждены руководствоваться сведениями, поступающими из разных источников, не проверенной информацией, опираться на ограниченный опыт свой, или других людей. Всё это порождает проблемы применимости классической логики для реальных предметных областей.

Привлекательной для задач верификации является вышеупомянутая логика Данна-Беллнэпа, которая способна работать как с обычными – истинными и ложными суждениями, так и с неопределённостью (в смысле дефицита обоснований) и противоречием. Однако общая обстановка в знаниевом моделировании, когда требуется работать не только с безусловно истинными, ложными, необоснованными и противоречивыми фактами и знаниями, но уметь обрабатывать частичную истинность, ложность, неполноту и противоречивость, выводит на передний план для задач верификации логики с векторной семантикой, в которых истинность представляется вектором

$$\|a\| = \langle a^1; \dots; a^i; \dots; a^n \rangle,$$

где n – число так называемых «аспектов истинности», числовых величин, выражающих степень подкреплённости суждения аргументами определённого класса [3]. При этом на практике достаточно ограничится V^{TF} -логиками, имеющих два аспекта: ⟨Истина, Ложь⟩, а саму верификацию реализовывать как логический вывод над БЗ в этих логиках. Следует уточнить, что речь идёт о динамической верификации. Статическая верификация может осуществляться внелогическими средствами [8].

Рассмотрим процедуру логического вывода в V^{TF} -логиках. В основе вывода в продукционной модели знаний лежит правило вывода *modus ponens*, включающее импликацию. В данных логиках рассматривается три сорта импликации [3, 4, 6]:

- формальная, выражаемая, в частности, дизъюнкцией $\neg a \vee b$;
- нестрогая, связанная с отношениями правдоподобия и доминирования;

- содержательная, в которой истинность присваивается целиком суждению $a \rightarrow b$.

В ЭС как правило используется третий вид импликации, так как силу причинно-следственной взаимосвязи задаёт эксперт. Подобная импликация названа содержательной. Правило *modus ponens* с участием содержательной импликации для V^{TF} -логик в простейшем случае выглядит как [3, 5]:

$$a, a \rightarrow b \vdash b: \|b\| = \|a \wedge i\| = \langle a^+ \bullet i^+; a^- \oplus i^- \rangle.$$

Здесь $\wedge$ – символ конъюнкции; $\bullet$ и $\oplus$ – триангулированные (треугольные) норма и ко-норма в инфиксной записи, причем дополнительно к аксиомам этих норм выполняется свойство:

$$1-x \bullet y = (1-x) \oplus (1-y);$$

и, соответственно,

$$1-x \oplus y = (1-x) \bullet (1-y).$$

Через двоеточие показано правило расчета истинности заключения на основе истинностей посылок при (вывод присоединённый).

Выражение $\|b\| = \|a \wedge i\| = \langle a^+ \bullet i^+; a^- \oplus i^- \rangle$ определяет наихудшее гарантированное значение истинности при данных посылах. Более общий случай даётся выражением

$$\|b\| = \langle a^+ \bullet i^+; a^- \oplus i^- \rangle \div \langle 1; 0 \rangle.$$

Здесь $\div$ означает диапазон значений от $\langle a^+ \bullet i^+; a^- \oplus i^- \rangle$ до $\langle 1; 0 \rangle$:

$$\|b\| = \langle [a^+ \bullet i^+, 1]; [0, a^- \oplus i^-] \rangle;$$

Графическое представление вектора истинности показано на рис. 1.

В работах [7, 8] изучено, как меняется область $\|b\|$ для различных предельных значений истинности посылок и как аномальные значения истинности влияют на ход вывода.

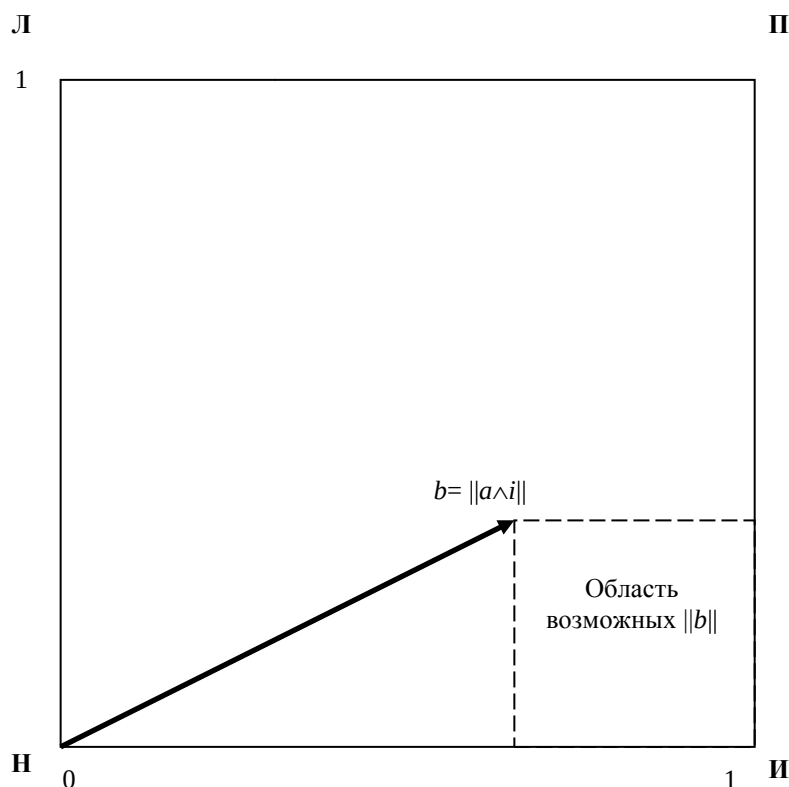


Рис. 1. Графическое представление вектора истинности $\|b\|$.

Установлено, что:

1. При строго ложном антецеденте, когда его вектор истинности равен $\langle 0;1 \rangle$, областью возможных значений истинности консеквента является вся область $[0,1] \times [0,1]$.
2. При неопределённом антецеденте, когда его вектор истинности равен $\langle 0;0 \rangle$, областью возможных значений истинности консеквента является область, близкая к $\langle 0;0 \rangle$.
3. При полностью противоречивом антецеденте, когда его вектор истинности равен $\langle 1;1 \rangle$, областью возможных значений истинности консеквента является область, близкая к $\langle 1;1 \rangle$.
4. Положение этой области сохраняется, если вывод будет продолжен.

То есть заключение, например, с истинностью $[0,1] \times [0,1]$ (вектор истинности принимает интервальное значение $\langle [0,1]; [0,1] \rangle$) порождает цепочку таких же значений вплоть до терминального факта – гипотезы. Аналогично векторы, близкие к $\langle 0;0 \rangle$ или $\langle 1;1 \rangle$, порождают цепочки таких же значений истинности вплоть до фактов-гипотез. Это позволяет выявлять факт аномалии, анализируя истинность гипотезы, а место появления такой аномалии устанавливать с помощью объяснительного компонента. Иначе говоря, использование V^{TF} -логик при разработке ЭС может способствовать выявлению соответствующих артефактов за счет штатных средств ЭС: машины вывода и объяснительного компонента, без использования дополнительных составляющих.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод, что применение V^{TF} -логик при проектировании ЭС с продукционной БЗ даёт возможность выявить ряд существенных аномалий БЗ средствами самой ЭС без привлечения дополнительных архитектурных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.М., Березкин Д.В., Симаков К.В. Особенности проектирования модели и онтологии предметной области для поиска противоречий в правовых электронных библиотеках. Режим доступа: <http://inteltec.ru/publish/articles/textan/RCDL2004.shtml>.
2. Аршинский В.Л., Проскуряков Д.П. Применение онтологий и рассуждения по прецедентам для обработки контекста в событийном моделировании в исследованиях энергетики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4 (52). С. 94-100.
3. Аршинский Л.В. Методы обработки нестрогих высказываний. Иркутск: Изд-во Восточно-Сибирского института МВД России. 1998. 40 с.
4. Аршинский Л.В. Многозначные логики с векторной семантикой. Деп. в ВИНТИ 13.02.03 №281-B2003. 46 с.
5. Аршинский Л.В. Содержательный и формальный выводы в логиках с векторной семантикой // Автоматика и телемеханика. 2007. № 1. С. 153-162.
6. Аршинский Л.В. Векторные логики: основания, концепции, модели. Иркутск: Изд-во Иркутского университета. 2007.
7. Аршинский Л.В. Логика с векторной семантикой как средство верификации баз знаний / Аршинский Л.В., А.А. Ермаков, М.С. Нитежук // Онтология проектирования. 2019. Т. 9, № 4(34). С. 510-521. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-510-521.
8. Аршинский Л.В. Комплексная верификация продукционных баз знаний с использованием V^{TF} -логик / Аршинский Л.В., А.А. Ермаков, М.С. Нитежук //

- Онтология проектирования. 2020. Т. 10, № 1(35). С. 112-120. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-112-120.
9. Бахтияров К.И. Об одном подходе к формализации парадоксальных ситуаций // Философские науки. №1. 1976. С. 52-62.
 10. Бахтияров К.И. Многоаспектный подход в логике: дисс. д.ф.н. 09.00.07 «Логика». – Москва: МГУ. 1989.
 11. Бахтияров К.И. Компьютеризация логики // Философские науки. № 9. 1990. С.117-122.
 12. Бахтияров К.И. Логика с точки зрения информатики: бестселлер в духе Льюиса Кэрролла (12 этюдов). – М.: Едиториал УРСС. 2002. 128 с.
 13. Бочвар Д.А. Об одном трехзначном исчислении и его применении к анализу парадоксов классического расширенного функционального исчисления // Математический сборник. Т. 4. № 2. 1938. С.287-308.
 14. Васильев Н.А. О частных суждениях, о треугольнике противоположностей, о законе исключенного четвертого. Казань. 1910.
 15. Васильев Н.А. Воображаемая логика. Избранные труды. М.: Наука. 1989. 264 с.
 16. Долина О.С. Разработка метода тестирования продукционных баз знаний экспертных систем с учетом ошибок типа «забывание об исключении»: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.14. Саратов. 1999. 174 с.
 17. Долинина О.Н. Классификация ошибок в базах знаний экспертных систем // Вестник СГТУ. 2010. № 4 (50). Вып. 2. С. 125–130.
 18. Иванов А.С. Математические модели и алгоритмы функционирования продукционных баз знаний: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 05.13.18. Саратов. 2008. 117 с.
 19. Карпенко, А.С. Многозначные логики / А.С. Карпенко. М.: Наука. 1997. 223 с.
 20. Логунова, Е.А. Обзор подходов к разрешению недостатков продукционной базы знаний системы логического вывода / Е.А. Логунова // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 9. С. 46-48.
 21. Нечеткая логика в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.. 1986. 312 с.
 22. Нитежук М.С. Верификация и поиск противоречий в базах знаний интеллектуальных систем [Электронный ресурс] / М.С. Нитежук // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. 2018. №2. Режим доступа: <http://mnv.ircups.ru/toma/22-2018>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 24.02.2020).
 23. Поспелова Л.Я., Чуканова О.В. Поиск противоречий в продукционных базах знаний. Режим доступа: <http://www.vmest.ru/nuda/poisk-protivorechij-v-produkcionnih-bazah-znaniy/main.html>.
 24. Пронина И.Г. Методы и инструментальные средства поддержки продукционных баз знаний, содержащих правила с интервальными значениями характеристик в предикатах: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.11. М.. 1994. 160 с.
 25. Проскуряков Д.П. Поиск противоречий с помощью стратегии управления продукциями на основе онтологии предметной области // Труды XIX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Ч. III. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2014. С. 166–170.

26. Проскуряков Д.П. Управление разрешением конфликтов в продукционных экспертных системах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 8. С. 47-51.
27. Проскуряков Д.П. Интеграция онтологического моделирования и рассуждений по прецедентам для обработки контекста в исследованиях энергетической безопасности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. том 21 № 4(123). С. 90-99.
28. Розоноэр Л.И. О выявлении противоречий в формальных теориях. I. // Автоматика и телемеханика. № 6. 1983. С.113-124.
29. Розоноэр Л.И. О выявлении противоречий в формальных теориях. II. // Автоматика и телемеханика. № 7. 1983. С.97-104.
30. Рыбина Г.В., Смирнов В.В. Особенности выявления статических аномалий в базах знаний, содержащих отдельные виды НЕ-факторов // 3 Международный научный и практический семинар «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. М.: Физматлит. 2005. С 358-363.
31. Смирнов, В.В. Методы и средства верификации баз знаний в интегрированных экспертных системах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11, Москва. 2006. 180 с.
32. Смирнова Е.Д. Логика и философия. М.: «Российская политическая энциклопедия» (РОССПЭН). 1996. 304 с.
33. Смирнова Е.Д. Вопросы семантики паранепротиворечивых логик // Online Journal “Logical Studies”. № 2. 1999. Режим оступа: <http://www.logic.ru/LogStud>.
34. Antoniou, G. Verification and Validation of Knowledge-Based Systems. Report on Two 1997 Events / G. Antoniou, F. van Harmelen, R. Plant, J. Vanthienen // AI Magazine: Workshop Report. 1998. V.19. № 3. pp. 123-126.
35. Asenjo F.G. La idea de un calculo de antinomias // Seminario Matematico. La Plata. 1954
36. Belnap N. A useful four-valued logic // J.M.Dunn and G.Epstein (eds.). Modern Uses of Multiple-Valued Logic. – Dordrecht: D. Reidel Publish. Co. 1977. Pp. 8-37.
37. Belnap N. How a computer should think // G. Ryle (ed.). Contemporary Aspects of Philosophy. – Stocksfield: Oriel Press Ltd., 1977. Pp. 30-55.
38. Belnap N.D. A formal analysis of entailment / Technical Rep. – Yale Univ., 1960. – N 7.
39. Benbasat, I. A framework for the validation of knowledge acquisition / I Benbasat, J. S. Dhaliwal, // Knowledge Acquisition. 1989. 1. Pp. 215–233.
40. Bindilatti, A. de A. Verification and validation of knowledge bases using test cases generated by restriction rules / A. de A. Bindilatti, A.E.A da Silva // International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems (IJAE). 2012. V. 3. Issue 4. Pp. 117-125.
41. Davis R. Applications of Meta Level Knowledge to the Construction, Maintenance, and Use of Large Knowledge Bases. Dept of Computer Science, Stanford Univ.. 1976. 291 p. STAN-CS-76-552a.
42. Dunn J.M. Algebra of Intensional Logics. Doctoral Dissertation University of Pittsburg, Ann Arbor. 1966.
43. Dunn J.M. Intuitive semantics for first-degree entailment and “coupled trees” // Philosophical Studies.Vol. 29. 1976. Pp.149-158.

44. Dunn J.M. Relevant Logic and Entailment // Handbook of Philosophical Logic. Vol. III: Alternatives to Classical Logic / D.Gabbay and Guenther (eds.). – Dordrecht: D.Reidel Publishing Company. 1986. Pp.117-224
45. Gottwald, S. Treatise on Many-Valued Logics / S. Gottwald. Leipzig. 2000. 604 p.
46. Hamilton, D. State-of-the-practice in knowledge-based system verification and validation / D. Hamilton, K. Kelley, C. Culbert // Expert Systems with Applications. 1991. 3. Pp. 403–410.
47. Kleene S.C. On a notation for ordinal numbers // The Journal of Symbolic Logic. Vol.3. 1938. Pp..150-155
48. Laurent, J-P. Proposals for a valid terminology in KBS validation. In B. Neuman, Ed. // Proceedings of the 10th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-92). 1992. Pp. 829–834
49. Marcot B. Testing your knowledge base // AI Expert. August. 1987. Pp. 43-47.
50. Meseguer P., Preece A. Verification and validation of knowledge-based systems with formal specifications // The Knowledge Engineering Review. 1995, v10, № 4. Pp.. 331-343. DOI: 10.1017/S0269888900007542
51. Nguyen, T.A. et al. Knowledge Base Verification // AI Magazine. 1987. V. 8. № 2. Pp. 69-75.
52. O'Leary D. Design, development and validation of expert systems: A survey of developers. In M. Ayel & J-P. Laurent, Eds. // Validation, Verification and Test of Knowledge-Based Systems. 1991. Pp. 3-20.
53. Preece A.D., Shinghal R., Batarekh A. Verifying expert systems: a logical framework and a practical tool // Expert systems with applications. 1992. Vol. 5. Pp.. 421-436.
54. Preece A.D. Evaluation of Verification Tools for Knowledge-Based Systems / A.D Preece, S. Talbot, L. Vignollet // Int. J. Hum.-Comput. Stud. 1997. V. 47. Pp. 629-658.
55. Prest G. The logic of paradox // Journal of Philosophical Logic. Vol. 8. № 2. 1979.
56. Shortliffe E.H., Buchanan B.G. A model of inexact reasoning in medicine // Mathematical Bioscience. 1975. 23. Pp.351-379.
57. Shortliffe E.H. Computer-Based Medical Consultation: MYCIN. – N.Y.: American Elsevier. 1976.
58. Tepandi J. Comparison of Expert System Verification Criteria: Redundancy // Proc. ECAI 90 Conf. Stockholm. 1990. Pp. 49-62.
59. Vermesan A.A. and Coenen F. (eds.) Validation and Verification of Knowledge Based System. Springer Science + Business Media, NY. 1999. DOI: 10/1007/978-1-4757-6916-6.
60. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. № 8 Pp. 338-353.

UDK 004.89

NONCLASSICAL LOGICS IN RULE-BASED SYSTEM VERIFICATION PROBLEM

Marina S. Nitezhuk

Senior lecturer, Department of Information Systems and Information Security,

e-mail: marino@mail.ru

Irkutsk State Transport University,

15, Chernyshevskiy Str., 664074 Irkutsk, Russia.

Leonid V. Arshinskiy

Dr., Head. Department of Information Systems and Information Security,

e-mail: larsh@mail.ru

Irkutsk State Transport University,

15, Chernyshevskiy Str., 664074 Irkutsk, Russia.

Abstract. The paper discusses the applicability of non-classical logical calculus to the problem of verification of rule-based knowledge bases. The possibilities of some three-digit, four-digit, and fuzzy logics are considered. It is shown that a good approach to verification is to use logics with vector semantics in the form of VTF-logics. Expert systems based on them will be able to verify their KB without involving additional (and external to ES) architectural elements.

Key words: non-classical logics, logics with vector semantics, rule-based knowledge base, verification, expert systems.

References

1. Andreev A.M., Berezkin D.V., Simakov K.V. Osobennosti proyektirovaniya modeli i ontologii predmetnoy oblasti dlya poiska protivorechiy v pravovykh elektronnykh bibliotekakh. [Features of model design and domain ontology for the search for contradictions in legal electronic libraries]. Available at: <http://inteltec.ru/publish/articles/textan/RCDL2004.shtml>. (in Russian).
2. Arshinskiy V.L., Proskuryakov D.P. Primeneniye ontologiy i rassuzhdeniya po pretsedentam dlya obrabotki konteksta v sobytiynom modelirovanii v issledovaniyakh energetiki [Application of ontologies and precedent reasoning for context processing in event modeling in energy research] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2016. № 4 (52). Pp. 94–100. (in Russian)
3. Arshinskiy L.V. Metody obrabotki nestrogikh vyskazyvaniy [Methods of processing of non-strict proposition]. Irkutsk: East-Siberian Institute of MIA of Russia. 1998. 40 p. (in Russian)
4. Arshinskiy L.V. Mnogoznachnyye logiki s vektornoy semantikoy [Multivalued logics with vector semantics]. Dep. v VINITI 13.02.03 № 281-V2003. 46 p. (in Russian)
5. Arshinskiy L.V. Soderzhatel'nyi i formal'nyi vyvody v logikakh s vektornoy semantikoy [Substantial and formal deductions in logics with vector semantics] // *Avtomatika i telemekhanika*. 2007. № 1. Pp. 153-162. (in Russian)
6. Arshinskiy L.V. Vektornyye logiki: osnovaniya, kontseptsii, modeli [Vector logic: foundations, concepts, models.]. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo universiteta, 2007. (in Russian)

7. Arshinskiy L.V. Logiki s vektornoy semantikoy kak sredstvo verifikatsii baz znaniy [Logic with vector semantic as a means of knowledge bases verification] / L.V. Arshinskiy, A.A. Yermakov, M.S. Nitezhuk // *Ontologiya proyektirovaniya*. 2019. T. 9, № 4 (34). Pp 510-521. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-510-521. (in Russian)
8. Arshinskiy L.V. Kompleksnaya verifikatsiya produktsionnykh baz znaniy s ispol'zovaniyem V^{TF} -logik [Complex verification of rule-based knowledge bases using V^{TF} -logic] / L.V. Arshinskiy, A.A. Yermakov, M.S. Nitezhuk // *Ontologiya proyektirovaniya*. 2020. T. 10, № 1(35). Pp. 112-120. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-112-120. (in Russian)
9. Bakhtiyarov K.I. Ob odnom podkhode k formalizatsii paradoksal'nykh situatsiy [About one approach to the formalization of paradoxical situations] // *Filosofskiye nauki*. №1. 1976. – Pp. 52-62. (in Russian)
10. Bakhtiyarov K.I. Mnogoaspektnyy podkhod v logike: diss. d.f.n. 09.00.07 «Logika» [A multidimensional approach in logic: diss. Doctor of Philosophy 09.00.07 “Logic”]. – Moskva: MGU. 1989. (in Russian)
11. Bakhtiyarov K.I. Komp'yuterizatsiya logiki [Computerization of Logic] // *Filosofskiye nauki*. №9. 1990. Pp. 117-122. (in Russian)
12. Bakhtiyarov K.I. Logika s tochki zreniya informatiki: bestseller v dukhe L'yuisa Kerrolla (12 etyudov) [Logic from the point of view of computer science: a bestseller in the style of Lewis Carroll (12 studies)]. – M.: Yeditorial URSS. 2002. 128 p. (in Russian)
13. Bochvar D.A. Ob odnom trekhznachnom ischislenii i yego primenenii k analizu paradoksov klassicheskogo rasshirennogo funktsional'nogo ischisleniya [About one three-valued calculus and its application to the analysis of the paradoxes of the classical extended functional calculus] // *Matematicheskiiy sbornik*. T. 4. № 2. 1938. Pp. 287-308. (in Russian)
14. Vasil'yev N.A. O chastnykh suzhdeniyakh, o treugol'nike protivopolozhnostey, o zakone is-klyuchennogo chetvertogo [On private judgments, on the triangle of opposites, on the law of the excluded fourth.]. Kazan. 2010. (in Russian)
15. Vasil'yev N.A. Voobrazhayemaya logika [Imaginary logic]. Izbrannyye trudy. M.: Nauka. 1989. 264 p. (in Russian)
16. Dolina O.S. Razrabotka metoda testirovaniya produktsionnykh baz znaniy ekspertnykh sistem s uchetom oshibok tipa «zabyvaniye ob isklyuchenii»: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.13.14 [Development of a method for testing production knowledge bases of expert systems taking into account errors of the “forgetting about exception” type: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.13.14]. Saratov. 1999. 174 p. (in Russian)
17. Dolinina O.N. Klassifikatsiya oshibok v bazakh znaniy ekspertnykh system [Error classification in the knowledge bases of expert systems] // *Vestnik SGTU*. 2010. № 4 (50). Vyp. 2. Pp. 125-130. (in Russian)
18. Ivanov A.S. Matematicheskiye modeli i algoritmy funktsionirovaniya produktsionnykh baz znaniy: dissertatsiya ... kandidata fiziko-matematicheskikh nauk: 05.13.18 [Mathematical models and functioning algorithms of production knowledge bases: the dissertation ...

- candidate of physical and mathematical sciences: 05.13.18]. Saratov. 2008. 117 p. (in Russian)
19. Karpenko, A.S. *Mnogoznachnyye logiki [Multivalued logics]* / A.S. Karpenko. M.: Nauka. 1997. 223 p. (in Russian)
 20. Logunova, Ye.A. *Obzor podkhodov k razresheniyu nedostatkov produktsionnoy bazy znaniy sistemy logicheskogo vyvoda [A review of approaches to resolving the shortcomings of the production base of knowledge of the logical inference system]* / Ye.A. Logunova // *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2015. № 9. Pp. 46-48. (in Russian)
 21. *Nechetkaya logika v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta [Fuzzy logic in control models and artificial intelligence]* / pod red. D.A. Pospelova. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. 1986. 312 p. (in Russian)
 22. Nitezhuk M.S. *Verifikaciya i poisk protivorechij v bazah znaniy intellektual'nykh sistem [Verification and search of contradictions in knowledge bases of the intelligent systems]*. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Young science of Siberia: electronic scientific journal]*. 2018. № 1. [Accessed 11/04/19]. (in Russian)
 23. Pospelova L.Ya., Chukanova O.V. *Poisk protivorechij v produktsionnykh bazakh znaniy [The search for contradictions in the rule-based knowledge bases]*. Available at: <http://www.vmest.ru/nuda/poisk-protivorechij-v-produkcionnih-bazah-znaniy/main.html>. (in Russian).
 24. Pronina I.G. *Metody i instrumental'nyye sredstva podderzhki produktsionnykh baz znaniy, sodержashchikh pravila s interval'nymi znacheniyami kharakteristik v predikatakh: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.13.11 [Methods and tools for supporting production knowledge bases containing rules with interval values of characteristics in predicates: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.13.11]*. M. 1994. 160 p. (in Russian).
 25. Proskuryakov D.P. *Poisk protivorechij s pomoshch'yu strategii upravleniya produktsiyami na osnove ontologii predmetnoy oblasti [Search for contradictions using the product management strategy based on the ontology of the subject area]* // *Trudy XIX Baykal'skoy Vserossiyskoy konferentsii «Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii»*. CH. III. Irkutsk: ISEM SO RAN. 2014. Pp. 166–170. (in Russian).
 26. Proskuryakov D.P. *Upravleniye razresheniyem konfliktov v produktsionnykh ekspertnykh sistemakh [Managing conflict resolution in rule-based expert systems]* // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. № 8. Pp. 47-51. (in Russian).
 27. Proskuryakov D.P. *Integratsiya ontologicheskogo modelirovaniya i rassuzhdeniy po pretsedentam dlya obrabotki konteksta v issledovaniyakh energeticheskoy bezopasnosti [Integration of ontological modeling and precedent reasoning for context processing in energy security research]* // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. tom 21 № 4(123). Pp. 90-99. (in Russian).
 28. Rozonoer L.I. *O vyyavlenii protivorechij v formal'nykh teoriyakh. I. [On the identification of contradictions in formal theories. I.]* // *Avtomatika i telemekhanika*. № 6. 1983. Pp.113-124. (in Russian).

29. Rozonoer L.I. O vyyavlenii protivorechiy v formal'nykh teoriyakh. II. [On the identification of contradictions in formal theories. II.] // *Avtomatika i telemekhanika*. № 7. 1983. Pp. 97-104. (in Russian).
30. Rybina G.V., Smirnov V.V. Osobennosti vyyavleniya staticheskikh anomalii v bazakh znaniy, soderzhashchikh otchel'nyye vidy NE-faktorov [Peculiarities of identifying static anomalies in knowledge bases containing certain types of NOT factors] // 3 Mezhdunarodnyy nauchnyy i prakticheskiy seminar «Integrirovannyye modeli i myagkiye vychisleniya v iskusstvennom in-tellekte. M.: Fizmatlit. 2005. Pp. 358-363. (in Russian).
31. Smirnov, V.V. Metody i sredstva verifikatsii baz znaniy v integrirovannykh ekspertnykh sistemakh: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.11 [Methods and means of verification of knowledge bases in integrated expert systems: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.13.11], Moskva. 2006. 180 p. (in Russian).
32. Smirnova Ye.D. Logika i filosofiya [Logic and philosophy]. // M.: «Rossiyskaya politicheskaya entsiklopediya» (ROSSPEN). 1996. 304 p. (in Russian).
33. Smirnova Ye.D. Voprosy semantiki paraneprotivorechivyykh logik [The semantics of paraconsistent logics] // Online Journal “Logical Studies”. №2. 1999. Available at: <http://www.logic.ru/LogStud>. (in Russian).
34. Antoniou, G. Verification and Validation of Knowledge-Based Systems. Report on Two 1997 Events / G. Antoniou, F. van Harmelen, R. Plant, J. Vanthienen // *AI Magazine: Workshop Report*. 1998. V.19. № 3. Pp. 123-126.
35. Asenjo F.G. La idea de un calculo de antinomias // *Seminario Matematico*. La Plata. 1954
36. Belnap N. A useful four-valued logic // J.M.Dunn and G.Epstein (eds.). *Modern Uses of Multiple-Valued Logic*. – Dordrecht: D. Reidel Publish. Co. 1977. Pp. 8-37.
37. Belnap N. How a computer should think // G. Ryle (ed.). *Contemporary Aspects of Philosophy*. – Stocksfield: Oriel Press Ltd., 1977. Pp. 30-55.
38. Belnap N.D. A formal analysis of entailment / Technical Rep. – Yale Univ., 1960. – N 7.
39. Benbasat, I. A framework for the validation of knowledge acquisition / I Benbasat, J. S. Dhaliwal, // *Knowledge Acquisition*. 1989. 1. Pp. 215–233.
40. Bindilatti, A. de A. Verification and validation of knowledge bases using test cases generated by restriction rules / A. de A. Bindilatti, A.E.A da Silva // *International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems (IJAE)*. 2012. V. 3. Issue 4. Pp. 117-125.
41. Davis R. Applications of Meta Level Knowledge to the Construction, Maintenance, and Use of Large Knowledge Bases. Dept of Computer Science, Stanford Univ.. 1976. 291 p. STAN-CS-76-552a.
42. Dunn J.M. Algebra of Intensional Logics. Doctoral Dissertation University of Pittsburg, Ann Arbor. 1966.
43. Dunn J.M. Intuitive semantics for first-degree entailment and “coupled trees” // *Philosophical Studies*. Vol. 29. 1976. Pp.149-158.
44. Dunn J.M. Relevant Logic and Entailment // *Handbook of Philosophical Logic*. Vol. III: Alternatives to Classical Logic / D.Gabbay and Guenther (eds.). – Dordrecht: D.Reidel Publishing Company. 1986. Pp.117-224
45. Gottwald, S. Treatise on Many-Valued Logics / S. Gottwald. Leipzig. 2000. 604 p.

46. Hamilton, D. State-of-the-practice in knowledge-based system verification and validation / D. Hamilton, K. Kelley, C. Culbert // Expert Systems with Applications. 1991. 3. Pp. 403–410.
47. Kleene S.C. On a notation for ordinal numbers // The Journal of Symbolic Logic. Vol.3. 1938. Pp.150-155
48. Laurent, J-P. Proposals for a valid terminology in KBS validation. In B. Neuman, Ed. // Proceedings of the 10th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-92). 1992. Pp. 829–834
49. Marcot B. Testing your knowledge base // AI Expert. August. 1987. Pp. 43-47.
50. Meseguer P., Preece A. Verification and validation of knowledge-based systems with formal specifications // The Knowledge Engineering Review. 1995, v10, № 4. Pp. 331-343. DOI: 10.1017/S0269888900007542
51. Nguyen, T.A. et al. Knowledge Base Verification // AI Magazine. 1987. V. 8. № 2. Pp. 69-75.
52. O'Leary D. Design, development and validation of expert systems: A survey of developers. In M. Ayel & J-P. Laurent, Eds. // Validation, Verification and Test of Knowledge-Based Systems. 1991. Pp. 3-20.
53. Preece A.D., Shinghal R., Batarekh A. Verifying expert systems: a logical framework and a practical tool // Expert systems with applications. 1992. Vol. 5. Pp. 421-436.
54. Preece A.D. Evaluation of Verification Tools for Knowledge-Based Systems / A.D Preece, S. Talbot, L. Vignollet // Int. J. Hum.-Comput. Stud. 1997. V. 47. Pp. 629-658.
55. Prest G. The logic of paradox // Journal of Philosophical Logic. Vol. 8. № 2. 1979.
56. Shortliffe E.H., Buchanan B.G. A model of inexact reasoning in medicine // Mathematical Bioscience. 1975. 23. Pp.351-379.
57. Shortliffe E.H. Computer-Based Medical Consultation: MYCIN. – N.Y.: American Elsevier. 1976.
58. Tepandi J. Comparison of Expert System Verification Criteria: Redundancy // Proc. ECAI 90 Conf. Stockholm. 1990. Pp. 49-62.
59. Vermesan A.A. and Coenen F. (eds.) Validation and Verification of Knowledge Based System. Springer Science + Business Media, NY. 1999. DOI: 10/1007/978-1-4757-6916-6.
60. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. № 8 Pp. 338-353.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ИНСТИТУТАМИ СО РАН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Клименко Ольга Анатольевна

с.н.с., к.ф.-м.н., e-mail: klimenko@ict.nsc.ru

Жижимов Олег Львович

д.ф.-м.н.

Юрченко Андрей Васильевич

первый заместитель директора, к.ф.-м.н., e-mail: yurchenko@ict.nsc.ru

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
630090 г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6

Аннотация. В работе предлагается способ выявления междисциплинарных связей между научными организациями, основанный на анализе данных разнородных информационных систем. Используются данные о публикациях сибирских институтов в электронной библиотеке eLIBRARY.RU за последние 5 лет и корпоративного сайта Сибирского отделения Российской академии наук «Портал СО РАН» www.sbras.ru. В результате исследований были выявлены новые направления исследований на стыке наук, которые ведутся в ряде сибирских институтов.

Ключевые слова: междисциплинарные связи, научно-технические тренды, информационные системы.

Цитирование: Клименко О.А., Жижимов О. Л., Юрченко А.В. Определение междисциплинарных связей между институтами СО РАН на основе анализа информационных систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 52 – 60. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.004

Введение. В Сибирском отделении (СО) РАН на протяжении 10 лет ведутся исследования интеграционных процессов и междисциплинарных связей научных организаций. Отличительной особенностью СО РАН являлось особое внимание к междисциплинарным исследованиям, проводились регулярные конкурсы междисциплинарных проектов, в реализации которых были задействованы институты из различных областей науки. В результате выполнения проектов возникали междисциплинарные связи между организациями, лабораториями, научными группами. Эти связи отражались в виртуальном пространстве в виде ссылок между сайтами институтов. Исследование сайтов сообщества сибирских научно-исследовательских институтов выявило несколько групп институтов, которые имели особенно тесные связи [3, 7, 9, 10]. Одна группа – институты физико-математической направленности, в нее также входили институты, занимающиеся механикой и энергетикой. Другую большую группу образовали химические и биологические институты. После 2013 года в эту группу вошли медицинские научные центры и институты. Институты наук о Земле образовывали одну большую группу с

небольшим числом внешних связей. Гуманитарные и экономические институты составляли одно достаточно замкнутое сообщество. Объединял все организации Портал СО РАН (<http://www.sbras.ru>) – корпоративный сайт Сибирского отделения РАН, который имел больше всего входящих и исходящих ссылок, включал полный каталог входящих в СО РАН организаций и ряд информационных ресурсов и механизмов освещения деятельности всей науки в Сибири.

1. Постановка задачи. В 2019 году у авторов статьи возникло предположение, что за последние 5 лет произошли серьезные изменения в направлениях исследований во всем мире и, в частности, в научно-исследовательских организациях СО РАН, отследить которые можно только мультимодальным анализом научного информационного пространства. В то же время ценность такой аналитической информации очень высока, так как она позволяет увидеть существующие тренды развития науки и спрогнозировать возникновение новых точек научно-технологического прорыва. Задачей определения научно-технических трендов занимаются в России, ФРГ, США, Великобритании, Китае и других странах, используя большие финансовые и кадровые ресурсы. Этим занимаются такие агентства, как Clarivate, Центр компетенций по возникающим технологиям Института системных и инновационных исследований Общества Фраунгофера в Германии [8]. Используются экономические методы, а также экспертные оценки, оценки публикационной активности. Недостаток этих инструментов в слабой изученности результатов их применения в России, особенно в разрезе регионов. Институт статистических исследований и экономики знаний Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» [2] развивает методологию и практику статистических измерений в сфере науки. Для этой цели используются экономические, экспертные оценки, форсайт сессии, анализ патентной активности. Анализом публикаций научных организаций Сибири занимаются в ГПНТБ СО РАН [1,4], используя методы вебометрики и тексты аннотаций статей. Для анализа и поиска оптимальных путей развития сибирской науки требуется найти относительно простой способ выявления научных трендов внутри сообщества сибирских исследователей.

2. Исследование аффилиаций авторов статей. Аффилиация (affiliation) в переводе с английского языка означает установление связи. Понятие institutional affiliation или academic affiliation указывают на место выполнения работы, результаты которой изложены в научной статье. Например, в качестве аффилиации указывается исследовательский институт, университет, научный центр. Авторы исходили из предположения, что анализ аффилиаций публикаций научной организации позволяет выявить новые направления, в первую очередь – междисциплинарных исследований. А именно, если наблюдается рост совместных публикаций институтов из разных предметных областей, можно предположить, что ведутся новые исследования на стыках соответствующих наук. Для проверки гипотезы проанализированы публикации нескольких институтов на основе открытых данных электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>).

Институт автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО РАН относится к Объединенному ученому совету СО РАН по физическим наукам и имеет больше всего совместных публикаций с Новосибирским государственным университетом (НГУ) и Институтом физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (табл. 1). Тесная аффилированность с НГУ – общий тренд для институтов Новосибирского научного центра (ННЦ), связанный с тем, что НГУ изначально, уже в 60-е годы 20 века стал главной образовательной базой для научных

институтов ННЦ, сотрудники которых всегда принимали самое активное участие в обучении студентов НГУ, а сами институты были производственной базой, на которой студенты проходили свою научно-производственную практику. За последние годы у ИАиЭ СО РАН произошел рост совместных публикаций с институтами из Объединенного ученого совета СО РАН по наукам о Земле. Отметим, что связи ИАиЭ с Институтом вычислительных технологий СО РАН (ныне – ФИЦ ИВТ) уже более 10 лет активно развиваются, как в направлении математического моделирования физических процессов, так и в направлении анализа изображений и данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Таблица 1. Связи Института автоматики и электрометрии СО РАН

1	Институт автоматики и электрометрии СО РАН	4347
2	Новосибирский национальный исследовательский государственный университет	806
3	Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН	171
4	Новосибирский государственный технический университет	156
5	Институт вычислительной техники СО РАН	104
6	Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН	87
7	Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН	70
8	Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН	60
9	Институт лазерной физики СО РАН	55
10	Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН	46
11	Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН	43
12	Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН	41
13	Федеральный исследовательский центр институт цитологии и генетики СО РАН	36
14	Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины	36
15	Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН	35
16	Научный центр волоконной оптики РАН	28
17	Max Planck Institute of Quantum Optics	27
18	Национальный исследовательский Томский государственный университет	26
19	Федеральный научно-исследовательский центр “Кристаллография и Фотоника” РАН	23
20	Институт сильноточной электроники СО РАН	22

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (ныне – ФИЦ ИК СО РАН) сотрудничает с большим числом химических институтов (табл. 2). Однако за последние 5 лет заметно возросло число публикаций с Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Институтом физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. Заметным является рост совместных публикаций с Институтом геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Для Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН новым стало все более широкое применение методов математического моделирования и других математических инструментов на основе высокопроизводительных вычислений для решения геологических и геофизических задач, а также усиливающееся взаимодействие с Институтом экономики и организации промышленного производства СО РАН (табл. 3)

Федеральный исследовательский центр «Институт цитологии и генетики СО РАН» (ФИЦ ИЦиГ СО РАН) представляет собой крупный научно-исследовательский центр, проводящий исследования практически по всем направлениям общей, молекулярной, медицинской и сельскохозяйственной генетики, клеточной биологии, генетических основ биотехнологий, биоинформатики и системной биологии. Широкая тематика исследований в ФИЦ ИЦиГ СО РАН отражается в связях с биологическими, химическими, медицинскими и аграрными институтами (рис. 4). В последние годы произошел рост совместных публикаций с Институтом математики им. С.Л. Соболева СО РАН и Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Таблица 2. Связи Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН

1	Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН	18728
2	Новосибирский национальный исследовательский государственный университет	1983
3	Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН	718
4	Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН	684
5	Новосибирский государственный технический университет	460
6	Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН	409
7	Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН	321
8	Институт проблем переработки углеводородов СО РАН	281
9	Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова	271
10	Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН	255
11	Национальный исследовательский Томский государственный университет	254
12	Красноярский научный центр СО РАН	226
13	Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН	144
14	Национальный исследовательский Томский политехнический университет	142
15	Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева	139
16	Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН	138
17	Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН	137
18	Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН	122
19	Институт химической кинетики и горения СО РАН	111
20	Федеральный исследовательский центр институт цитологии и генетики СО РАН	102

Таблица 3. Связи Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

1	Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН	7236
2	Новосибирский национальный исследовательский государственный университет	1344
3	Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН	1032
4	Единая геофизическая служба РАН	970
5	Национальный исследовательский Томский политехнический университет	375
6	Институт химии нефти СО РАН	335
7	Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН	290
8	Новосибирский государственный технический университет	248
9	Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН	217
10	Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН	215
11	Тюменский индустриальный университет	214
12	Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и	166

	минерального сырья	
13	Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН	126
14	Институт археологии и этнографии СО РАН	122
15	Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН	118
16	Институт физики прочности и материаловедения СО РАН	118
17	Геологический институт РАН	117
18	Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН	110
19	Институт земной коры СО РАН	102
20	Национальный исследовательский Томский государственный университет	98

Таблица 4. Связи Федерального исследовательского центра
Институт цитологии и генетики СО РАН

1	Федеральный исследовательский центр институт цитологии и генетики СО РАН	14334
2	Новосибирский национальный исследовательский государственный университет	1810
3	Новосибирский государственный медицинский университет	923
4	Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины	636
5	Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН	469
6	Научно-исследовательский институт физиологии и фундаментальной медицины СО РАН	422
7	Новосибирский государственный аграрный университет	305
8	Научно-исследовательский институт фундаментальной и клинической иммунологии	289
9	Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН	257
10	Национальный медицинский исследовательский центр им. акад. Е.Н. Мешалкина	229
11	Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора	227
12	Томский национальный исследовательский медицинский центр	224
13	Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН	186
14	Институт систематики и экологии животных СО РАН	140
15	Национальный исследовательский Томский государственный университет	132
16	Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН	118
17	Институт химической кинетики и горения СО РАН	109
18	Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН	106
19	Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН	104

3. Анализ научных новостей на Портале СО РАН. Корпоративный сайт Сибирского отделения СО РАН – Портал СО РАН содержит базу данных о совместных исследованиях институтов из разных предметных областей. Информационная система устроена таким образом, что каждая запись в ней привязывается к одной, двум или нескольким предметным областям. Анализ показал, что если в 2017 году записей, относящихся одновременно к математике и наукам о Земле, не было, то в 2018 году их было 4, а в 2019 году – уже 15. Большой прирост отмечен в совместных исследованиях по химии и наукам о Земле: с 19 в 2017 году до 32 в 2019 году. Исследования на стыке химии и физики были отражены на Портале СО РАН в 16 публикациях в 2017 году, в 23 – в 2018 и 27 – в 2019 году. Последние 3 года устойчивой тенденцией является большое число совместных

публикаций по биологическим и медицинским наукам: 2017 -19, 2018 – 25, 2019 – 28. Отмечен рост публикаций по гуманитарным наукам и информационным технологиям, которые связаны с цифровизацией археологии, языкознания и других гуманитарных областей, а частично – с принятием информационных технологий, как области на стыке гуманитарных и технических наук. Устойчивой тенденцией являются исследования в области применения цифровых технологий в энергетике (рис. 1).

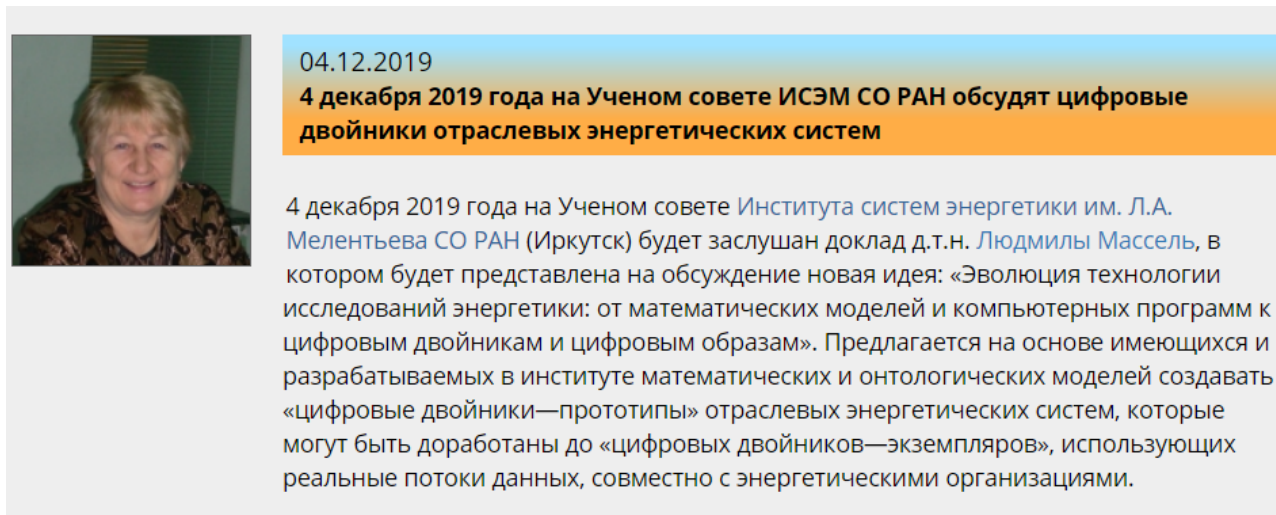


Рис. 1. Пример новости на Портале СО РАН по энергетике и информационным технологиям¹.

Заключение. На примере сибирских научных институтов показано, что в естественных науках происходит рост исследований на стыке химии и физики с приложениями в материаловедении, органической электронике, медицине и других областях. Отчетливым трендом является внедрение цифровых технологий, методов математического моделирования и других математических инструментов во все науки. Образуется новое сообщество организаций, вовлеченных в исследования с помощью синхротронного излучения. Это связано с созданием Центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (СКИФ) [5] на территории Новосибирской области. Другое большое сообщество специалистов в цифровых технологиях, вычислительных методах и программировании образуется в связи с продвижением проекта Сибирского национального центра высокопроизводительных вычислений, обработки и хранения данных (СНЦ ВВОД) [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуськов А.Е., Быховцев Е.С., Косяков Д.В. Альтернативная вебометрика: исследование веб-трафика сайтов научных организаций // Научно-техническая информация. Серия 1. Организация и методика информационной работы. 2015. № 12. С. 12-28
2. Институт статистических исследований и экономики знаний Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Режим доступа: <https://issek.hse.ru/> (дата обращения 29.05.2020).

¹ Статья по результатам выступления опубликована в журнале «Информационные и математические технологии в науке и управлении», №4, 2019 (прим. ред).

3. Клименко О.А., Рычкова Е.В., Шабальников И.В. Корпоративный портал Сибирского отделения РАН: модель, аналитика, вебометрика // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 2(6). С. 44-50. ISSN 2413-0133.
4. Селиванова И.В., Косяков Д.В., Гуськов А.Е. Классификация научных текстов на основе компрессии аннотаций публикаций // Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. 2019. № 12. С. 25-38.
5. СКИФ – Сибирский кольцевой источник фотонов. Проект программы «Академгородок 2.0». Режим доступа: <http://www.akademgorodok2.ru/prj-synchrotron-skif> (дата обращения 29.05.2020)
6. СНЦ ВВОД – Сибирский национальный центр высокопроизводительных вычислений, обработки и хранения данных. Проект программы «Академгородок 2.0». Режим доступа <http://www.akademgorodok2.ru/prj-big-data> (дата обращения 29.05.2020)
7. Шокин Ю.И., Веснин А.Ю., Добрынин А.А., Клименко О.А., Рычкова Е.В. Анализ веб-пространства академических сообществ методами вебометрики и теории графов // Информационные технологии. 2014. № 12. С. 31-40. ISSN 1684-6400.
8. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. Режим доступа: <https://www.isi.fraunhofer.de/en.html> (дата обращения 29.05.2020).
9. Klimenko O.A., Use of color for arrangement of web publication of science news on the corporate site of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences // A.P. Ershov Informatics Conference (Novosibirsk, Russia, 02.07-05.07.2019): Preliminary Proceedings. 2019. Novosibirsk: IPC NSU. Pp.134-140. ISBN: 978-5-4437-0911-6.
10. Shokin Yu.I., Vesnin A.Yu., Dobrynin A.A., Klimenko O.A., Konstantinova E.V., Rychkova E.V., Savin M.Yu. Studying of scientific web space by webometrics and graph theory methods // Zbornik radova konferencije MIT. 2013. 2014: University of Pristina. Pp. 629-639. ISBN: 978-86-80795-20-1.

DEFINITION OF INTERDISCIPLINARY CONNECTIONS BETWEEN THE INSTITUTES OF THE SB RAS BASED ON ANALYSIS OF INFORMATION SYSTEMS

Olga A. Klimenko

Senior Researcher, Ph.D.

e-mail: klimenko@ict.nsc.ru

Oleg L. Zhizhimov

Doctor of Sciences

Andrey V. Yurchenko

First Deputy Director for Science, Ph.D.

e-mail: yurchenko@ict.nsc.ru

Federal Research Center for Information and Computational Technologies
6, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russia,

Abstract. The paper proposes a method for identifying interdisciplinary connections between scientific organizations, based on the analysis of data from heterogeneous information systems. The data on publications of Siberian institutes in the electronic library eLIBRARY.RU for the last 5 years and the corporate website of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences “Portal of the SB RAS” www.sbras.ru are used. As a result of research, new areas of research at the intersection of sciences that are being conducted at a number of Siberian institutes have been identified.

Keywords: Interdisciplinary communications, Scientific and technical trends, Information systems.

References

1. Gus'kov A.E., Byhovcev E.S., Kosyakov D.V. Al'ternativnaya vebometrika: issledovanie veb-trafika sajtov nauchnyh organizacij [Alternative webometrics: research of web traffic of sites of scientific organizations] Nauchno-tehnicheskaya informaciya. Seriya 1. Organizaciya i metodika informacionnoj raboty = Scientific and technical information. Series 1. Organization and methods of information work. 2015. № 12. Pp. 12-28 (in Russian).
2. Institut statisticheskikh issledovanij i ekonomiki znaniy Nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta «Vysshaya shkola ekonomiki» = Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, National Research University Higher School of Economics. Available at: <https://issek.hse.ru/> (date of the application: 29.05.2020) (in Russian).
3. Klimenko O.A., Rychkova E.V., Shabal'nikov I.V. Korporativnyj portal Sibirskogo otdelenija RAN: model', analitika, vebometrika [Corporate portal of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences: model, analytics, webometrics] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2017. № 2(6). Pp. 44-50. ISSN 2413-0133.
4. Selivanova I.V., Kosjakov D.V., Gus'kov A.E. Klassifikacija nauchnyh tekstov na os-nove kompressii annotacij publikacij [Classification of scientific texts based on the compression

- of publication abstracts] // Nauchno-tehnicheskaja informacija. Serija 2. Informacionnye processy i sistemy = Scientific and technical information. Series 2. Information processes and systems. 2019. № 12. Pp. 25-38
5. SKIF – Sibirskij kol'cevoj istochnik fotonov. Proekt programmy «Akademgorodok 2.0» [SKIF - Siberian ring photon source. Project of the program "Akademgorodok 2.0"]. Access mode: <http://www.akademgorodok2.ru/prj-synchrotron-skif> (date of the application: 29.05.2020)
 6. SNC VVOD – Sibirskij nacional'nyj centr vysokoproizvoditel'nyh vychislenij, obrabotki i hranenija dannyh. Proekt programmy «Akademgorodok 2.0» [SNC VVOD - Siberian National Center for High Performance Computing, Data Processing and Storage. Project of the program "Akademgorodok 2.0"]. Available at: <http://www.akademgorodok2.ru/prj-big-data> (date of the application: 29.05.2020)
 7. Shokin Ju.I., Vesnin A.Ju., Dobrynin A.A., Klimenko O.A., Rychkova E.V. Analiz veb-prostranstva akademicheskikh soobshhestv metodami vebometрики i teorii grafov [Analysis of the web space of academic communities by webometrics and graph theory] // Informacionnye tehnologii = Information Technologies. 2014. № 12. Pp.31-40. ISSN 1684-6400.
 8. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. Available at: <https://www.isi.fraunhofer.de/en.html> (date of the application: 29.05.2020).
 9. Klimenko O.A. Use of color for arrangement of web publication of science news on the corporate site of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences // A.P. Ershov Informatics Conference (Novosibirsk, Russia, 02.07-05.07.2019): Preliminary Proceedings. 2019. Novosibirsk: IPC NSU. Pp.134-140. ISBN: 978-5-4437-0911-6.
 10. Shokin Yu.I., Vesnin A.Yu., Dobrynin A.A., Klimenko O.A., Konstantinova E.V., Rychkova E.V., Savin M.Yu. Studying of scientific web space by webometrics and graph theory methods // Zbornik radova konferencije MIT'2013. University of Pristina. 2014. Pp. 629-639. ISBN: 978-86-80795-20-1.

**ПРИЧИННОСТИ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ:
ВЫВОДИМОСТЬ ИЛИ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ?**

Давтян Александр Григорьевич

Доцент, к.т.н., e-mail: agvs@mail.ru,

Россия, г. Москва, Московский физико-технический институт.

Шабалина Ольга Аркадьевна

Доцент, к.т.н., e-mail: O.A.Shabalina@gmail.com,

Россия, г. Волгоград, Волгоградский государственный технический университет.

Берестнева Ольга Григорьевна

Д.т.н., профессор, e-mail: ogb@tpu.ru,

Россия, 634050, г. Томск, Томский политехнический университет.

Лызин Иван Александрович

Аспирант, e-mail: Lyzin@tpu.ru

Россия, 634050, г. Томск, Томский политехнический университет.

Аннотация. Работа посвящена анализу существующих подходов к моделированию причинностей в социально-экономические системы. Описаны способы и формы представления причинностей. Показан субъективный характер причинностей в социально-экономических системах, определяющий условия практической применимости математических моделей социально-экономических систем к решению задач управления в таких системах.

Ключевые слова: Социально-экономическая система, управление в социально-экономических системах, модель социально-экономической системы, причинность, субъективная причинность, нарративное управление.

Цитирование: Давтян А. Г., Шабалина О. А., Берестнева О. Г., Лызин И. А. Причинности в социально-экономических системах: выводимость или интерпретация? // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 61-72. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.005

Введение. Развитие современного общества как сложной фрактальной социально-экономической системы характеризуется усилением роли информационных технологий в организации управления на всех уровнях системы.

Появление кибернетики как науки об общих принципах управления привело к развитию исследований, связанных с применением кибернетических принципов для разработки математических моделей поведения социально-экономических систем по аналогии с тем, как эти принципы успешно реализуются в моделях технических систем. Направленность общества на повсеместную автоматизацию и цифровизацию потребовала новых способов представления социально-экономических систем для размещения их в открытом информационном пространстве, и организации управления такими системами в режиме реального времени. Это привело к появлению большого количества исследований,

посвященных разработке моделей социально-экономических систем и методов управления такими системами [1, 3, 15, 18, 26, 39].

Формализация поддержки управления в социально-экономических системах сводится к задаче выбора управленческих решений из множества альтернатив, для формирования которого применяют различные модели системы. Широкое применение в моделировании различных систем находят математические модели, которые основаны на функциональных зависимостях между наблюдаемыми параметрами системы, моделирующих причинности связей как логическую выводимость одних параметров через другие. Математические модели сами по себе не устанавливают причинности связей, они их фиксируют, и изучение причинностей заменяется изучением функциональных зависимостей математической модели системы. Однако в отличие от математических моделей физических систем, в которых причинно-следственные связи установлены априори самой природой и формализованы в виде соответствующих физических законов, именно представление причинностей и составляет основную проблему моделирования социально-экономических систем.

Работа посвящена анализу существующих подходов к моделированию социально-экономических систем, форм представления причинностей в моделях этих систем, и оценке их применимости к поддержке управления в социально-экономических системах.

Подходы к моделированию социально-экономических систем. Для моделирования социально-экономических процессов, которые допускают описание количественными переменными, применяют методы теории дифференциальных уравнений, методы оптимизации, методы вычислительной математики и т.д. [2, 11, 20-22]. Такие математические модели применяют для моделирования макроэкономических процессов, в которых в качестве переменных выступают наблюдаемые и измеримые параметры, допускающие интерпретацию как непрерывных величин (количество людей, денег, объемов производства, потребляемой электроэнергии и т.д.). Функциональные зависимости между переменными модели, объявляемые причинностями моделируемых процессов, задаются разработчиком модели на основе его знаний и опыта в исследуемой предметной области, т.е. задача моделирования социально-экономических процессов в таких случаях сводится к задаче идентификации причинностей. Человек в таких моделях явно не присутствует, моделируются связи между результатами его деятельности, отождествляемые с самой деятельностью.

Для моделирования деятельности человека, как социального объекта, обладающего способностью к целенаправленному поведению в соответствии с собственными предпочтениями (интересами), применяются методы теории активных систем, агентного моделирования, теории игр, и т.д. Деятельность человека в таких моделях представляется в виде алгоритма, определяемого соответствующей теорией, то есть человеку предписывается состояние, отвечающее этой теории, и поведение, определяемое этой теорией, которому он должен неукоснительно следовать в реальной ситуации. Например, в моделях, основанных на теории игр, реализуется концепция максимизации полезности, в рамках которой предполагается, что человек ведет себя «рационально», т.е. таким образом, чтобы максимизировать свою полезность. Функциональные связи в таких моделях, определяющие причинности моделируемых процессов, априори детерминированы в рамках соответствующей теории, и не требуют обоснований в контексте поведения моделируемой социально-экономической системы.

Для отображения свойств динамически меняющихся систем применяют имитационные методы [4] и методы качественного моделирования. Для построения сценарных моделей, как правило, используются теоретико-графовые подходы, на основе которых реализованы, например, методы когнитивного моделирования [2, 9], системной динамики [18]. Поведение системы в таких моделях представляется как изменение ее состояния в пространстве возможных состояний. Управление системой представляет собой выбор траектории ее развития как упорядоченного набора состояний, приводящей систему из исходного в заданное целевое состояние, неизменяемое в процессе развития системы. Причинность в таких моделях задается в виде бинарного отношения на множестве наблюдаемых параметров системы, выбираемого, в свою очередь, на множестве допустимых бинарных отношений. Таким образом, задача моделирования причинности представляет собой задачу идентификации бинарных отношений.

Социофизические модели описывают предиктивное подражательное поведение человека как деиндивидуализированного элемента социума. В сфере социофизических исследований известны работы, связанные с анализом социального неравенства, моделированием распространения информации в социальных сетях), моделированием поведения толпы (crowdsourcing), моделированием миграционных процессов, энергетическим менеджментом. Социофизический подход к моделированию социально-экономических процессов основан на идентификации социальных объектов с физическими объектами и переносом причинностей физических явлений на социальные явления.

Поиск характерных закономерностей в больших данных (Big Data) и универсальных статистических законов привело к появлению самостоятельного направления социофизики – эконофизики [20, 21, 22, 23]. В статистической эконофизике [24] причинность рассматривается с точки зрения наличия стохастических закономерностей. Динамическая эконофизика [26, 27, 28] оперирует динамикой стохастических параметров и устанавливает причинности, как функциональные зависимости этих параметров на основе существования предельных теорем.

Таким образом, независимо от выбираемого математического аппарата, при разработке моделей социально-экономических систем причинности связей параметров системы декларируются и идентифицируются каким-либо способом, либо отождествляются с причинностями физического мира или закономерностями стохастических систем. Применимость таких моделей для организации функционирования социально-экономической системы определяется не адекватностью самих моделей, а адекватностью моделируемой системы, как объекта моделирования этой модели.

В целом математические модели социально-экономических процессов основаны на предположении, что в их основе лежит причинность, как универсальная категория объяснения явлений. Однако, существует и иная категоризация связей в социально-экономических процессах («детерминация» по Бунге [4]), в рамках которой причинность рассматривается как один из видов связей, причем наименее распространенных. При этом наличие причинности в математической форме описания связей не представляется обязательной.

Подтверждением такого понимания связей являются последние тенденции в моделировании социально-экономических процессов, связанные с применением методов анализа больших данных [33, 34, 35], получаемых от окружения системы с помощью

Интернет-технологий. При этом целью анализа данных является не поиск причинностей тех или иных социальных процессов, а детерминация связей наблюдаемых параметров системы [43].

Поэтому современные тенденции в моделировании социально-экономических систем в условиях всеобщей дигитализации характеризуются переходом от математических моделей к дигитальным, не требующим формализации причинностей социально-экономических процессов, а позволяющим наблюдать состояние системы в режиме реального времени.

Однако отсутствие причинностей в дигитальных моделях системы приводит к необходимости разрабатывать новые способы управления ее развитием в условиях непосредственного взаимодействия с цифровым окружением на основе цифровых данных [28].

Нарратив как форма представления причинностей в моделях социально-экономических систем. В [13, 27, 38] предложен способ управления в социально-экономических системах, в котором развитие системы рассматривается с позиций нарративной практики, т.е. субъективное представление человека, как участника процесса управления в настоящем, о будущем, определяющим не столько будущее состояние системы, сколько само существование системы в будущем. При этом принятие решений по организации управления и ответственность за эти действия участников процесса управления лежат на самих участниках. Математические методы используются для динамического формирования стратегий управления и обеспечения управляемости системы в условиях управленческой деятельности в социально-экономической системе на основе субъективных причинностей, назначенных участниками процесса управления.

С точки зрения управления нарратив задает связи между настоящим и будущим, как причинности, «выводимые» человеком из своего субъективного опыта прошлого, которое он переносит на будущее. Таким образом, причинность не формализуется в виде математической функции, а представляется как функция мышления человека, определяющая функционирование системы.

Нарратив задает упорядоченность действий, реализующих функцию мышления, и, таким образом, определяет управление в системе. Нарратив имплицитно социально-экономической системе упорядоченность действий, требуемых для ее целенаправленного функционирования, и, таким образом, задает управление в системе, как реализацию субъективной причинности. Соответственно, в предложенной модели нарративного управления причинности не моделируются, а “вымысливаются” человеком и принимают форму нарратива. Для поддержки нарративного управления с участием авторов разработана система, реализующая функции сбора и анализа данных о системе и ее окружении в режиме реального времени [45].

Заключение. В отличие от технических «неживых» систем, в основе которых лежат детерминированные закономерности, относящиеся к природным явлениям, социально-экономические системы – “живые”, они энтропийны, неповторяемы и конечны. В силу таких особенностей, установить закономерности в социально-экономических процессах, вечно присущие всем социально-экономическим системам, не представляется возможным. Поэтому представление причинностей в моделях таких систем носит характер субъективных предметных аналогий, определяемый сферой деятельности, квалификацией и другими

особенностями разработчика модели. Эффективность применения таких математических моделей к решению задач управления социально-экономической системой зависит от того, насколько выбранная модель причинностей оказалась «угаданной», т.е. отражающей по факту реальное поведение системы. Однако, в любом случае, субъективность самих причинностей в социально-экономических системах приводит к необходимости постоянного мониторинга состояния системы и корректировки стратегии управления, выбранной на основе разработанной модели системы.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-07-00250-а и № 18-07-00543.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриянов С.В. Развитие методологических основ моделирования социально-экономических систем в контексте управления развитием // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. №5 (53). (дата обращения: 04.07.2020).
2. Авдеева, З. К. Когнитивный подход в управлении / З. К. Авдеева, С. В. Коврига, Д. И. Макаренко, В. И. Максимов // Проблемы управления. 2007. № 3. С. 2-8.
3. Белак И. А. Особенности моделирования социально-экономических систем // YOUNG SCIENCE . Том 2. № 4. 2015. С. 13-20.
4. Бунге М. (2010). Причинность. Место принципа причинности в современной науке. М.: Едиториал УРСС.
5. Бурков, В. Н. Теория активных систем (история развития и современное состояние) [Электронный ресурс] / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков // Проблемы управления. 2009. № 3.1. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-aktivnyh-sistem-istoriya-razvitiya-i-sovremennoe-sostoyanie>.
6. Бурков, В. Н. Теория графов в управлении организационными системами / В. Н. Бурков, А. Ю., Заложнев, Д. А. Новиков // Серия «Управление организационными системами». М. 2001. 124 с.
7. Вайдлих В. Социодинамика: системный подход к математическому моделированию в социальных науках: Пер. с англ. /Под ред. Ю.С. Попкова, А.Е. Семечкина. Изд. 2-е, стереотипное. М.: Едиториал УРСС. 2005. 480 с.
8. Губко М. В., Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Сетевые игры и игры на сетях / Труды международной конференции «Сетевые игры и менеджмент». Петрозаводск: ИПМИ РАН. 2009. С. 13-17.
9. Дли М. И., Какатунова Т. В. Применение аппарата когнитивного моделирования для анализа сложных систем // ТДР. 2013. № 4. (дата обращения: 28.06.2020).
10. Давтян А.Г., Шабалина О.А., Садовникова Н.П. Казуальность в исследовании и моделировании социальных систем //ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. № 4 (8). С. 20-23.
11. Давтян А.Г., Шабалина О.А., Садовникова Н.П., Парыгин Д.С., Еркин Д.А. Динамическое целеполагание в социально-экономических системах // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 11 (149). С. 46-56.

12. Давтян А.Г., Шабалина О.А., Садовникова Н.П. Генезис нарративности управления социальными системами // Информационные технологии в науке, образовании и управлении: материалы XLIV международной конференции и XIV международной конференции молодых учёных IT + S&E 16. 2016. С. 158-160.
13. Зенкевич Н., Петросян Л., Янг Д. Динамические игры и их приложения в менеджменте. СПб: Изд-во Высш. шк. Менеджмента. 2009. 415 с.
14. Клевцова А.Б. Анализ методик формирования и декомпозиции целей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 11. С. 169-173.
15. Кузьмина С. Н., Андросенко Н. В. Использование методов математического моделирования и инструментов экономики качества для обеспечения устойчивого развития социально-экономических систем // Вестник евразийской науки. 2014. № 6 (25). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metodov-matematicheskogo-modelirovaniya-i-instrumentov-ekonomiki-kachestva-dlya-obespecheniya-ustoychivogo-razvitiya>
16. Лычкина Н.Н. Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития. Журнал «Бизнес-информатика». М.: НИУ ВШЭ. № 3(9). 2009. С. 55-67.
17. Мачуева Д.А. Современные методы анализа и оценки социально-экономических систем // ИВД. 2016. № 4 (43). (дата обращения: 28.06.2020).
18. Мазуров М. Е. Моделирование распределенных социальных и экономических систем // Статистика и экономика. 2014. № 2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-raspredeleennyh-sotsialnyh-i-ekonomicheskikh-sistem>
19. Путилов В.А., Горохов А.В. Системная динамика регионального развития. / В. А. Путилов, А. В. Горохов. Мурманск: НИЦ «Пазори». 2002. 306 с.
20. Павлов В.А. Математические модели социально-экономических процессов в обществе // Вестник Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина. 2011. № 33. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-modeli-sotsialno-ekonomicheskikh-protsessov-v-obschestve>
21. Паринов С.И. Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем// Искусственные общества. 2007. № 3-4.
22. Парыгин Д.С., Садовникова Н.П., Шабалина О.А., Корнеев И.М. Формирование целевой иерархии в задачах управления организационными системами // Онтология проектирования. 2017. Т. 7. № 4 (26). С. 496-509.
23. Самсонова Н. А. Методология моделирования социально-экономических систем. Вестник ЦЭМИ РАН. Выпуск 4. 2018
24. Словохотов Ю.Л. Физика и социофизика // Проблемы управления. 2012. № 2. С. 2–31.
25. Черноус Г. Моделирование образов социально-экономических систем на основе сбалансированных методик стратегических измерений // Вестник Киевского национального университета им. Тараса Шевченко. Серия: Экономика. 2012. № 135. (дата обращения: 28.06.2020).
26. Шабалина О.А., Давтян А.Г., Садовникова Н.П., Парыгин Д.С. Управление в социально-экономических системах: оптимальность или нарратив? //

- Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сб. науч. тр. IV междунар. конф. Томск. 2017. С. 435-438.
27. Шабалина О.А., Давтян А.Г., Садовникова Н.П., Парыгин Д.С. Моделирование динамического целеполагания в социально-экономических системах: монография. Волгоград. 2017. 76 с.
 28. Шабалина О.А., Садовникова Н.П., Парыгин Д.С., Образцов Е.А., Рубанюк В.Н. Система поддержки нарративного управления в социально-экономических системах // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2019. Режим доступа http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_3_Shabalina_Sadovnikova.pdf_17937e01aa.pdf (дата обращения: 19.03.2020).
 29. Basar T., Olsder G.J. Dynamic noncooperative game theory. 2nd ed. Philadelphia: SIAM. 1999. 511 p. (Classics Appl. Math.) DOI: 10.1137/1.9781611971132.
 30. Chatterjee, A., Ghosh, A., Inoue, J. -, & Chakrabarti, B. K. 2015. Social inequality: From data to statistical physics modeling. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 638(1). DOI:10.1088/1742-6596/638/1/012014
 31. Coldwell, D. A. L. Social physics, crowdsourcing and multicultural collaborative research practice in the social sciences: E pluribus unum? Electronic Journal of Business Research Methods. 15(1). 2017. Pp. 17-28.
 32. Christakis, N. Computational Social Science. Science VOL 323 2009
 33. Christensen, C. Using graph concepts to understand the organization of complex systems / C. Christensen, R. Albert // International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering. 2007. Vol. 17. Iss. 7. Pp. 2201-2214.
 34. Cognitive Mapping and Diagnostic Aspects of Organizational Change. Режим доступа: <http://www.highbeam.com/doc/1P3-1430205861.html> (дата обращения: 06.08.2015).
 35. Clancey, W. J. Cognitive modeling of social behaviors / W. J. Clancey, M. Sierhuis, B.Damer, B.Brodsky. 2004. Режим доступа: <http://cogprints.org/3966/1/CogSocialModelingClancey.pdf> (дата обращения 25.08.2018).
 36. Duhaime I. M., Schwenk C. R. Conjectures on Cognitive Simplification in Acquisition and Divestment Decision-Making // Academy of Management Review. 1985. Pp. 287-295.
 37. Ding, L., & Yun-Lin, W. (2009). Social physics and the flow of migrant peasant workers doi:10.1007/978-3-642-02469-6_105
 38. Galam S. Sociophysics A Physicist's Modeling of Psycho-Political Phenomena. Springer. 2012. 439 p. Ishii, A., Mizuno, T., & Kawahata, Y. 2018. Position-sensitive propagation of information on social media using social physics approach. Paper presented at the Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Big Data "Big Data 2017". 2018-January. Pp. 3078-3085. DOI:10.1109/BigData.2017.8258281
 39. Liu B. Modeling of Social Economic Systems Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017546996>.
 40. Langley, P. Cognitive architectures: Research issues and challenges / P. Langley // Cognitive Systems Research. 2009. Vol. 10. № 2. Pp. 141-160.
 41. Myerson, B. Game Theory: Analysis of Conflict. London: Harvard Univ. Press, 1991.
 42. Pentland A. / Social Physics: How Social Networks Can Make Us Smarter // Reissue Edition Penguin Random House. 2014. 360 p.

43. Papageorgiou, G. Strategic Management via System Dynamics Simulation Models / G. Papageorgiou, A. Hadjis // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. Pp. 227-232.
 44. Schweitzer F. Sociophysics // Physics Today. 2018. № 71 (2). Pp. 41-46. <https://DOI.org/10.1063/PT.3.3845>
 45. Shabalina, O., Davtian, A., Sadovnikova, N., Parygin, D., Erkin, D. Narrative-based management in socio-economic systems // International Conference ICT, Society and Human Beings. Lisbon, Portugal. 2017. Pp. 73-79. UDK 004.942
-

UDK 004.942

CAUSES IN SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS: FERTILITY OR INTERPRETATION?

Alexander G. Davtian

PhD, researcher, e-mail: agvs@mail.ru,

Russia, Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology,

Olga A. Shabalina

PhD, researcher, e-mail: O.A.Shabalina@gmail.com

Volgograd State Technical University,

Russia, Volgograd, **Olga G. Berestneva**

Dr.Sc, Professor, e-mail: ogb@tpu.ru

Russia, Tomsk, Tomsk Polytechnic University,

Ivan A. Lyzin

PhD student, e-mail: Lyzin@tpu.ru ,

Russia, Tomsk, Tomsk Polytechnic University

Abstract. The paper considers existing approaches to modeling causalities in socio-economic systems. Methods and forms of causality representation are described. The subjective nature of causality in socio-economic systems is shown, which determines conditions for practical applicability of mathematical models of socio-economic systems to solving management problems in such systems.

Keywords: socio-economic system, management in socio-economic systems, model of socio-economic system, causality, subjective causality, narrative management

References

1. Andriyanov S.V. Razvitie metodologicheskikh osnov modelirovaniya social'no-ekonomicheskikh sistem v kontekste upravleniya razvitiem [Development of methodological foundations for modeling socio-economic systems in the context of development management] // Vestnik Bryanskogo gosudar-stvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Bryansk state technical University. 2016. №5 (53). (data obrashcheniya: 04.07.2020) (in Russian).

2. Avdeeva, Z. K. Kognitivnyj podhod v upravlenii [Cognitive approach in management]/ Z. K. Avdeeva, S. V. Kovriga, D. I. Makarenko, V. I. Maksimov // Problemy upravleniya = Management problem. 2007. № 3. Pp. 2-8 (in Russian).
3. Belak I. A. Osobennosti modelirovaniya social'no-ekonomicheskikh system [Features of modeling socio-economic systems] // YOUNG SCIENCE Tom 2. № 4. 2015. Pp. 13-20 (in Russian).
4. Bunge M. (2010). Prichinnost'. Mesto principa prichinnosti v sovremennoj nauke [Causality. The place of the principle of causality in modern science]. M.: Editorial URSS (in Russian).
5. Burkov, V. N. Teoriya aktivnykh sistem (istoriya razvitiya i sovremennoe sostoyanie) [Elektronnyj resurs] [Theory of active systems (history of development and current state) [Electronic resource] / V. N. Burkov, D. A. Novikov // Problemy upravleniya = Management problem. 2009. № 3.1. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-aktivnykh-sistem-istoriya-razvitiya-i-sovremennoe-sostoyanie> (in Russian).
6. Burkov, V. N. Teoriya grafov v upravlenii organizacionnymi sistemami [Graph theory in management of organizational systems]/ V. N. Burkov, A. YU., Zalozhnev, D. A. Novikov // Seriya «Upravlenie organizacionnymi sistemami» = Series "Management of organizational systems". M. 2001. 124 p (in Russian).
7. Vajdlil V. Sociodinamika: sistemnyj podhod k matematicheskomu modelirovaniyu v social'nykh naukah: Per. s angl. [Sociodynamics: a systematic approach to mathematical modelling in the social Sciences: TRANS. from English]/Pod red. YU.S. Popkova, A.E. Semechkina. Izd. 2-e, ste-reotipnoe. M.: Editorial URSS = Editorial URSS. 2005. 480 p. (in Russian).
8. Gubko M. V., Novikov D. A., CHkhartishvili A. G. Setevye igry i igry na setyah [Network games and games on networks] / Tru-dy mezhdunarodnoj konferencii «Setevye igry i menedzhment» = Proceedings of the international conference "Network games and management". Petrozavodsk: IPMI RAN. 2009. Pp. 13-17 (in Russian).
9. Dli M. I., Kakatunova T. V. Primenenie apparata kognitivnogo modelirovaniya dlya analiza slozhnykh sistem [Application of the cognitive modeling apparatus for the analysis of complex systems] // TDR. 2013. №4. (data obrashcheniya: 28.06.2020) (in Russian).
10. Davtyan A.G., SHabalina O.A., Sadovnikova N.P. Kazual'nost' v issledovanii i modelirovanii social'nykh sistem [Casualness in research and modeling of social systems] //ITNOU: Informacionnye tekhnologii v nauke, obra-zovanii i upravlenii = TONU: Information technologies in science, education and management. 2018. № 4 (8). Pp. 20-23 (in Russian).
11. Davtyan A.G., SHabalina O.A., Sadovnikova N.P., Parygin D.S., Erkin D.A. Dinamicheskoe celepolaganie v social'no-ekonomicheskikh sistemah [Dynamic goal setting in socio-economic systems]// Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tekhnologij = Bulletin of computer and information technologies. 2016. № 11 (149). Pp. 46-56 (in Russian).
12. Davtyan A.G., SHabalina O.A., Sadovnikova N.P. Genezis narrativnosti upravleniya social'nymi sistemami [Genesis of narrative management of social systems]//Informacionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i uprav-lenii: materialy XLIV mezhdunarodnoj konferencii i XIV mezhdunarodnoj konfe-rencii molodykh uchyonykh IT + S&E` = Information technologies in science, education and management: proceedings of

- the XLIV international conference and the XIV international conference of young scientists IT + S&E 16, 2016. Pp. 158-160 (in Russian).
13. Zenkevich N., Petrosyan L., YAng D. Dinamicheskie igry i ih prilozheniya v menedzhmente. [Dynamic games and their applications in management.] SPb: Izd-vo Vyssh. shk. menedzhmenta = Saint Petersburg: publishing house of Higher school of management, 2009. 415 p. (in Russian).
 14. Klevцова A.B. Analiz metodik formirovaniya i dekompozicii celej [Analysis of methods for forming and decomposing goal]// Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki = SFU news. Technical science. 2008. №11. Pp. 169-173 (in Russian).
 15. Kuz'mina S. N., Androsenko N. V. Ispol'zovanie metodov matematicheskogo modelirovaniya i instrumentov ekonomiki kachestva dlya obespecheniya ustoychivogo razvitiya social'no-ekonomicheskikh sistem [Using mathematical modeling methods and tools of quality Economics to ensure sustainable development of socio-economic systems]// Vestnik evrazijskoj nauki = Bulletin of Eurasian science. 2014. №6 (25). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metodov-matematicheskogo-modelirovaniya-i-instrumentov-ekonomiki-kachestva-dlya-obespecheniya-ustoychivogo-razvitiya> (in Russian).
 16. Lychkina N.N. Retrospektiva i perspektiva sistemnoj dinamiki. Analiz dinamiki razvitiya [Retrospect and perspective of system dynamics. The analysis of the dynamics of development.]. Zhurnal «Biznes-informatika» = Business Informatics journal. M.: NIU VSHE. №3 (9). 2009. Pp. 55-67 (in Russian).
 17. Machueva D.A. Sovremennye metody analiza i ochenki social'no-ekonomicheskikh sistem [Modern methods of analysis and evaluation of socio-economic systems] // IVD. 2016. №4 (43). (data obrashcheniya: 28.06.2020) (in Russian).
 18. Mazurov M. E. Modelirovanie raspredelennykh social'nykh i ekonomicheskikh sistem [Modeling of distributed social and economic systems] // Statistika i ekonomika = Statistics and Economics. 2014. №2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-raspredelennykh-sotsialnykh-i-ekonomicheskikh-sistem/> (in Russian).
 19. Putilov V.A., Gorohov A.V. Sistemnaya dinamika regional'nogo razvitiya [System dynamics of regional development] / V. A. Putilov, A. V. Gorohov. Murmansk: NIC = SIC «Pazori». 2002. 306 p. (in Russian).
 20. Pavlov V.A. Matematicheskie modeli social'no-ekonomicheskikh processov v obshchestve [Mathematical models of socio-economic processes in society] // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta im. S.A. Esenina. = Bulletin of the Ryazan state University named after S. A. Yesenin. 2011. №33. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-modeli-sotsialno-ekonomicheskikh-protsessov-v-obshchestve> (in Russian).
 21. Parinov S.I. Novye vozmozhnosti imitacionnogo modelirovaniya social'no-ekonomicheskikh sistem [New opportunities for simulation of socio-economic systems]// Iskusstvennye obshchestva = Artificial societies, 2007. №3-4 (in Russian).
 22. Parygin D.S., Sadovnikova N.P., SHabalina O.A., Korneev I.M. Formirovanie celevoj ierarhii v zadachah upravleniya organizacionnymi sistemami [Formation of the target

- hierarchy in organizational systems management tasks] // *Ontologiya proektirovaniya* = *Ontology of Designing*. 2017. T. 7. № 4 (26). Pp. 496-509 (in Russian).
23. Samsonova N. A. Metodologiya modelirovaniya social'no-ekonomicheskikh sistem [Methodology of modeling socio-economic systems] *Vestnik CEMI RAN*. Vypusk 4. = *Bulletin of the CEMI RAS*. Issue 4. 2018 (in Russian).
24. Slovohotov YU.L. Fizika i sociofizika [Physics and sociophysics]//*Problemy upravleniya* = *Management problem*. 2012. № 2. Pp. 2–31 (in Russian).
25. Chernous G. Modelirovanie obrazov social'no-ekonomicheskikh sistem na osnove sbalansirovannykh metodik strategicheskikh izmerenij [Modeling images of socio-economic systems based on balanced methods of strategic measurements]// *Vestnik Kievskogo nacional'nogo universiteta im. Tarasa Shevchenko* = *Bulletin of the Kiev national University named Taras Shevchenko*. Seriya: Ekonomika. 2012. №135. (data obrashcheniya: 28.06.2020) (in Russian).
26. Shabalina O.A., Davtyan A.G., Sadovnikova N.P., Parygin D.S. Upravlenie v social'no-ekonomicheskikh sistemah: optimal'nost' ili narrativ? [Management in socio-economic systems: optimality or narrative?]/ *Informacionnye tekhnologii v nauke, upravlenii, social'noj sfere i medicine: sb. nauch. tr. IV mezhdunar. konf.* = *Information technologies in science, management, social sphere and medicine: collection of scientific Tr. IV international Conf. Tomsk*. 2017. Pp. 435-438 (in Russian).
27. Shabalina O.A., Davtyan A.G., Sadovnikova N.P., Parygin D.S. Modelirovanie dinamicheskogo celepolaganiya v social'no-ekonomicheskikh sistemah: monogr. [Modeling of dynamic goal setting in socio-economic systems: monograph] Volgograd. 2017. 76 p. (in Russian).
28. Shabalina O.A., Sadovnikova N.P., Parygin D.S., Obrazcov E.A., Rubanyuk V.N. Sistema podderzhki narrativnogo upravleniya v social'no-ekonomicheskikh sistemah [System of support for narrative management in socio-economic systems] // *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Inzhenernyy vestnik Dona»* = *Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the don"*. 2019. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_3_Shabalina_Sadovnikova.pdf 17937e01aa.pdf (accessed: 19.03.2020) (in Russian).
29. Basar T., Olsder G.J. *Dynamic noncooperative game theory*. 2nd ed. Philadelphia: SIAM. 1999. 511 p. (Classics Appl. Math.) DOI: 10.1137/1.9781611971132.
30. Chatterjee, A., Ghosh, A., Inoue, J. -, & Chakrabarti, B. K. 2015. Social inequality: From data to statistical physics modeling. Paper presented at the *Journal of Physics: Conference Series*, 638(1). DOI:10.1088/1742-6596/638/1/012014
31. Coldwell, D. A. L. Social physics, crowdsourcing and multicultural collaborative research practice in the social sciences: E pluribus unum? *Electronic Journal of Business Research Methods*. 15(1). 2017. Pp. 17-28.
32. Christakis, N. *Computational Social Science*. Science VOL 323 2009
33. Christensen, C. Using graph concepts to understand the organization of complex systems / C. Christensen, R. Albert // *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering*. 2007. Vol. 17. Iss. 7. Pp. 2201-2214.
34. *Cognitive Mapping and Diagnostic Aspects of Organizational Change*. Режим доступа: <http://www.highbeam.com/doc/1P3-1430205861.html> (дата обращения: 06.08.2015).

35. Clancey, W. J. Cognitive modeling of social behaviors / W. J. Clancey, M. Sierhuis, B.Damer, B.Brodsky. 2004. Режим доступа: <http://cogprints.org/3966/1/CogSocialModelingClancey.pdf> (дата обращения 25.08.2018).
36. Duhaime I. M., Schwenk C. R. Conjectures on Cognitive Simplification in Acquisition and Divestment Decision-Making // Academy of Management Review. 1985. Pp. 287-295.
37. Ding, L., & Yun-Lin, W. (2009). Social physics and the flow of migrant peasant workers doi:10.1007/978-3-642-02469-6_105
38. Galam S. Sociophysics A Physicist's Modeling of Psycho-Political Phenomena. Springer. 2012. 439 p. Ishii, A., Mizuno, T., & Kawahata, Y. 2018. Position-sensitive propagation of information on social media using social physics approach. Paper presented at the Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Big Data "Big Data 2017". 2018-January. Pp. 3078-3085. DOI:10.1109/BigData.2017.8258281
39. Liu B. Modeling of Social Economic Systems Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017546996>.
40. Langley, P. Cognitive architectures: Research issues and challenges / P. Langley // Cognitive Systems Research. 2009. Vol. 10. № 2. Pp. 141-160.
41. Myerson, B. Game Theory: Analysis of Conflict. London: Harvard Univ. Press, 1991.
42. Pentland A. / Social Physics: How Social Networks Can Make Us Smarter // Reissue Edition Penguin Random House. 2014. 360 p.
43. Papageorgiou, G. Strategic Management via System Dynamics Simulation Models / G. Papageorgiou, A. Hadjis // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. Pp. 227-232.
44. Schweitzer F. Sociophysics // Physics Today. 2018. № 71 (2). Pp. 41-46. <https://DOI.org/10.1063/PT.3.3845>
45. Shabalina, O., Davtian, A., Sadovnikova, N., Parygin, D., Erkin, D. Narrative-based management in socio-economic systems // International Conference ICT, Society and Human Beings. Lisbon, Portugal. 2017. Pp. 73-79. UDK 004.942

УДК 004.94:004.89

**УПРАВЛЕНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА
ПРОБЛЕМНЫХ СИТУАЦИЙ**

Черняховская Лилия Рашитовна

Д.т.н., профессор кафедры технической кибернетики

e-mail: lr_chern@yandex.ru

Никулина Наталья Олеговна

К.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления

e-mail: [nikulinano@outlook.com](mailto:nikulino@outlook.com)

Гарайшин Шамиль Гилемшинович

К.т.н., заведующий кафедрой геофизики

e-mail: gsg@bngf.ru

Малахова Анна Ивановна

К.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления

e-mail: aimalakhova@gmail.com

Ярмухаметова Гульнара Ильдаровна

Студентка 4-го курса кафедры автоматизированных систем управления

e-mail: yarmuhametova.gulnara@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

Аннотация. Современные условия ведения бизнеса вынуждают руководство компаний постоянно искать новые способы повышения эффективности деятельности, опирающиеся на использование информационных технологий, тщательно подобранных, спроектированных и настроенных под нужды и особенности конкретного предприятия. Для настройки проектных решений, в качестве которых могут выступать системы управления бизнес-процессами, применяются математические методы и инструментальные средства имитационного моделирования. Результаты моделирования дают возможность более точно распределить функции между участниками бизнес-процессов, а также обосновать необходимость внедрения технологий искусственного интеллекта на отдельных этапах. В статье предлагается подход, позволяющий на основе моделирования бизнес-процессов и анализа проблемных ситуаций, возникающих в ходе их исполнения, рекомендовать сочетание различных информационных и интеллектуальных технологий, обеспечивающих более качественное выполнение бизнес-процессов. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант №19-08-00937 «Методы и модели интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении программными проектами, реализуемыми в среде производственных предприятий».

Ключевые слова: управление бизнес-процессами, имитационная модель, программный робот, учебно-научный центр, обучение персонала.

Цитирование: Черняховская Л. Р., Никулина Н. О., Гарайшин Ш. Г., Малахова А. И., Ярмухаметова Г. И. Управление бизнес-процессами на основе результатов имитационного моделирования и анализа проблемных ситуаций. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 73 – 83. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.006.

Введение. Одной из самых распространенных технологий, позволяющих решать проблемы повышения управляемости, является технология Workflow (поток работ), рассматриваемая большинством аналитиков как важнейшая составляющая современных корпоративных информационных систем. Продукты класса Workflow присутствуют на рынке программных средств уже более двух десятков лет и за это время приобрели огромную популярность, как наиболее перспективные технологии управления бизнес-процессами. Они обеспечивают полную или частичную координацию выполнения производственных задач, составляющих структурированные бизнес-процессы компании [2]. В условиях динамически меняющейся внешней и внутренней среды предприятия потребность в координации действий сотрудников при выполнении бизнес-процессов только растет, а у лиц, принимающих решения (ЛПР), одной из самых насущных проблем является необходимость решать большое число задач в условиях ограниченного рабочего времени. Помимо указанной проблемы, в работе руководителя любого уровня возникают и другие:

- необходимость обработки огромного количества документов, которые требуют реакции, согласования, исполнения и отслеживания;
- одновременное исполнение нескольких ролей в бизнес-процессах – ответственного исполнителя, контролера, инициатора;
- анализ и отслеживание разнородной информации, необходимой для принятия решений, связанных с исполнением должностных обязанностей, причем объем этой информации постоянно растет.

С каждым днем все большее значение приобретают оперативность принятия решений, отслеживание их исполнения, рациональное использование собранной информации, анализ и обобщение корпоративного опыта и знаний. В этой связи как нельзя более уместен переход к использованию искусственного интеллекта в тех бизнес-процессах, которые не требуют серьезных интеллектуальных усилий со стороны человека, а напротив – сопряжены с рутинной работой вкупе с повышенной вероятностью совершения ошибки. Конечно, надо принимать во внимание тот факт, что и системы искусственного интеллекта могут ошибаться, поэтому авторы предлагают подход, облегчающий переход к использованию подобных технологий на примере бизнес-процессов, ошибки в которых не влияют на обеспечение жизнедеятельности человека и не критичны по отношению к общей эффективности работы предприятия. Тем не менее, результаты исследований можно тиражировать и на другие бизнес-процессы, схожие по структуре и принципам управления.

1. Технологии искусственного интеллекта в системах управления бизнес-процессами. С появлением концепции BPM (Business Process Management, управление бизнес-процессами) технология Workflow получила новое развитие, а программные средства, реализующие эту технологию – название “BPMS (Business Process Management System)”, системы управления бизнес-процессами. BPM – концепция процессного управления предприятием, которая рассматривает бизнес-процессы в качестве особой категории ресурсов предприятия, непрерывно изменяемых с целью их адаптации к изменчивой внешней и внутренней среде функционирования [3]. При этом работа всего предприятия в

концепции BPM представлена как структурированная совокупность бизнес-процессов. В фокусе BPMS находится не работа отдельных структурных подразделений, а сквозные бизнес-процессы, составляющие суть деятельности предприятия [7,8]. Удобная и понятная пользователям нотация моделирования BPMN (Business Process Management Notation), нотация моделирования бизнес-процессов, позволила перевести разработку систем управления бизнес-процессами на новый уровень, вовлекая рядовых сотрудников предприятия в процесс постоянного улучшения бизнес-процессов.

Практика внедрения BPMS в России в последние годы [9] свидетельствует о том, что автоматизация бизнес-процессов сама по себе уже не рассматривается как приоритетная цель, расчет делается на то, что после внедрения BPM-системы в компании создается инструмент для непрерывного управления бизнес-процессами. Это позволяет задать требуемый алгоритм работы компании и контролировать его соответствующее выполнение, тем самым повышая дисциплину исполнителей, и, как следствие, эффективность их деятельности. За последнее время российский рынок стал заметно активнее развиваться в данном направлении. Основная причина состоит в том, что почти все, что могло быть оптимизировано без применения BPM, уже выполнено и достигнутые эффекты к настоящему моменту уже успели обесцениться [6]. В связи с политикой импортозамещения предприятия России все чаще предпочитают решениям иностранных разработчиков отечественные, что придает значительный стимул российским компаниям создавать BPM-системы высокого качества и широкой функциональности [9, 6]. Одной из последних тенденций в развитии систем управления бизнес-процессами является их интеграция с технологиями искусственного интеллекта. Эксперты называют следующие основные предпосылки внедрения технологий искусственного интеллекта для бизнес-направлений в России [6]:

- растущие требования к оперативности онлайн-сервисов по выдаче корректной информации для сотрудников различных бизнес-подразделений (поддержка внутреннего и внешнего клиента);
- необходимость в использовании при управлении предприятием накопленного опыта и знаний, а также сохранение компетенций при кадровой ротации;
- устойчивый тренд на интеллектуализацию: цифровизацию бизнес-процессов и роботизацию труда.

Главными и первоочерёдными потребителями интеллектуальных систем являются бизнес-направления со следующими отличительными особенностями [6]:

- множество различных транзакций в процессах оказания услуг;
- структурированные и формализованные бизнес-процессы;
- сложность и разнообразие при выборе вариантов действий;
- высокий уровень стандартизации процессов;
- потребность в оперативной информационно-консультационной поддержке.

Таким образом, наиболее актуальными для России сферами применения технологий искусственного интеллекта являются банковский сектор, ритейл, страховые компании, телекоммуникационные компании, нефтяная промышленность, предприятия военно-промышленного комплекса, беспилотный транспорт и «Умный город».

2. Внедрение системы управления бизнес-процессами в учебном центре производственного предприятия. Особенности проекта внедрения системы управления бизнес-процессами на производственном предприятии были рассмотрены на примере

учебно-научного центра (УНЦ) крупного нефтесервисного предприятия. УНЦ был выбран в качестве объекта исследования не случайно. Во-первых, бизнес-процессы, протекающие в нем, удовлетворяют характеристикам тех направлений, для которых наиболее оправдано применение технологий искусственного интеллекта при внедрении информационных систем [6]. Во-вторых, УНЦ обслуживает потребности предприятия в высококвалифицированных кадрах во всех областях его деятельности. Производственные технологии, а, значит, и бизнес-процессы, связанные с их поддержкой, меняются довольно часто. Чтобы обеспечить конкурентоспособность предприятия, необходимо поддерживать квалификацию сотрудников на постоянно высоком уровне, соответствующем требованиям профессиональных стандартов, а также нормативно-законодательной базы (федеральных законов, кодексов и т.п.) и внутренних регламентных документов, на основе которых функционирует предприятие. В связи с этим всё большее внимание уделяется своевременному планированию потребностей производственного предприятия в персонале определенного профессионального уровня и компетенций [9]. Выполнение этих задач является прямой обязанностью сотрудников учебного центра. Повышенные требования к квалификации персонала возникают в связи с появлением нового высокотехнологичного оборудования, неправильная эксплуатация которого может повлечь за собой крупные финансовые потери для предприятия. Характерной особенностью нефтесервисного предприятия является большое количество производственных процессов, выполнение которых сопряжено с повышенной опасностью для жизни и здоровья людей [1]. Поэтому отслеживание изменений бизнес-процессов и соответствие знаний и навыков сотрудников, задействованных в них, являются одними из основных обязанностей специалистов УНЦ и службы управления персоналом предприятия.

При всей значимости учебных центров для предприятия, они обычно находятся на периферии внимания руководства, поскольку их деятельность напрямую прибыли не приносит. Они чаще всего являются центрами затрат, а не доходов, поэтому проблема с их своевременным финансированием и оснащением может стать достаточно острой. С этим связано и ограничение на количество сотрудников, обеспечивающих поддержку учебного процесса. С учетом того, что стандарты профессионального образования, а также требования законодательства в области регулирования деятельности образовательных учреждений в последние годы меняются стремительно, и эти изменения влекут за собой лавинообразное увеличение количества документов, требующих своевременного изучения и соблюдения заявленных в них требований, становится необходимой информационная поддержка сотрудников УНЦ.

Следует отметить, что технологически процессы обучения и повышения квалификации сотрудников меняются нечасто, стандартной является и совокупность решаемых задач (сбор и обработка заявок на обучение, формирование групп, обучение, проверка знаний, выпуск необходимых документов).

В последнее время наблюдается рост количества заявок на повышение квалификации и заявок на подтверждение соответствующих уровней допуска к различному оборудованию. Ситуация обусловлена тем, что на предприятии имеются категории сотрудников, которые проходят обучение практически каждый месяц. Кроме того, накладывает свой отпечаток сезонность работ, в связи с чем возникает потребность в проверке наличия допуска к работе с оборудованием на все то время, на которое трудоустраиваются сотрудники. В период

набора персонала на сезон сотрудникам УНЦ приходится в кратчайшие сроки обрабатывать большое количество заявок, проводить аттестацию и выдавать документы. Ошибки крайне негативно сказываются на работе предприятия, так как сотрудники в составе партий отправляются на удалённые точки, транспортное сообщение с которыми затруднено.

В рамках диагностики существующей системы организации работы УНЦ была произведена оценка текущего состояния автоматизации процессов этого подразделения предприятия. Подпроцессы, поддерживающие выполнение образовательного процесса (регистрация обучаемых, формирование групп и подготовка организационно-распорядительной документации), частично автоматизированы и выполняются с использованием CRM-системы. Обучение полностью или частично (в программах, где это возможно) реализуется с использованием системы дистанционного обучения Moodle, интегрированной с CRM-системой. Подпроцесс сбора и первичной обработки заявок на обучение не автоматизирован, и именно в этом подпроцессе чаще всего возникают проблемные ситуации, связанные с ошибками сотрудников.

Автоматизация любой деятельности предполагает ее моделирование, которое позволит оценить имеющиеся проблемы и возможные пути их решения. В рамках проведенных ранее исследований [1] для рассматриваемого предприятия было рекомендовано внедрение системы управления бизнес-процессами ELMA [4]. Одним из ее достоинств является возможность автоматизации бизнес-процессов «на лету» – путем построения и запуска BPMN-моделей. Обследование и моделирование образовательного процесса позволило выявить большое количество задач, которые целесообразно автоматизировать – прием заявок, отправка логинов и паролей обучаемым, отправка приглашений на аттестацию, подготовка документации. На рис. 1 изображен фрагмент BPMN-модели процесса сбора и обработки заявок на обучение.

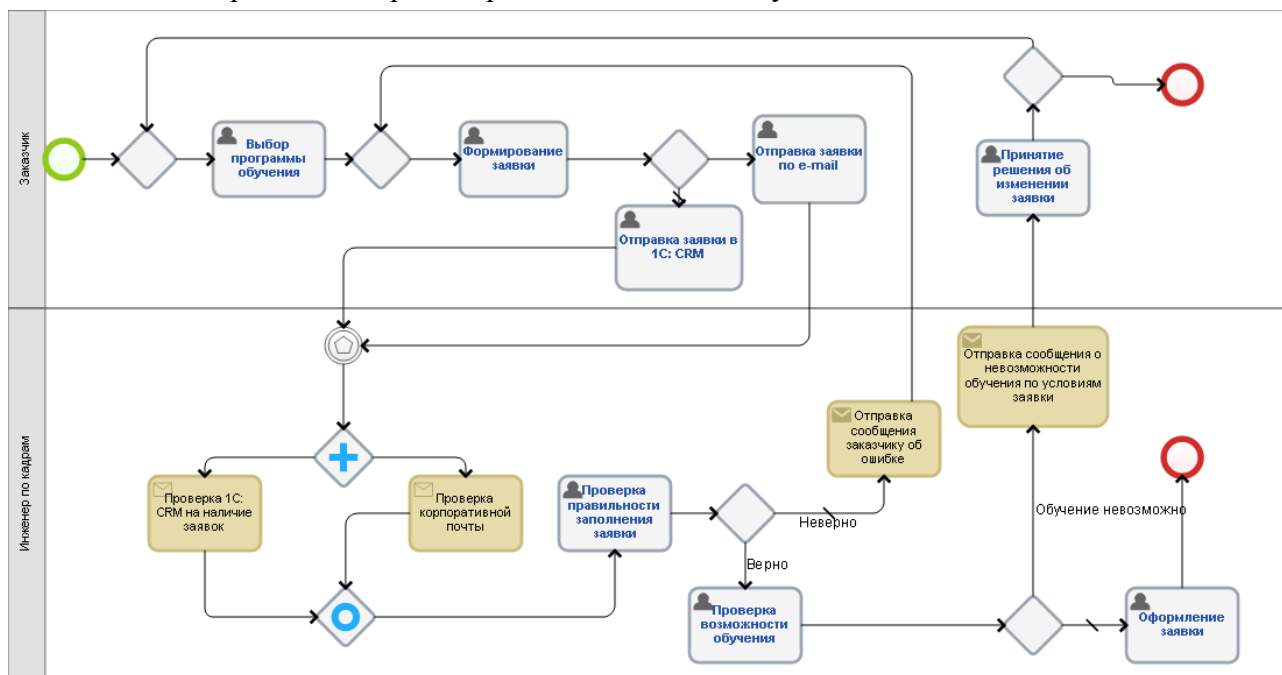


Рис. 1. Подпроцесс «Оформление заявки»

Исполнителем процесса является сотрудник УНЦ в должности инженера по кадрам, принимающий заявки, отправленные заказчиками на корпоративную электронную почту УНЦ, или поступающие автоматически в CRM-систему из подразделений предприятия.

3. Имитационное моделирование процесса обработки заявок на обучение. BPMN-

модель процесса оформления заявок отражает факт наличия большого количества рутинных операций, что делает возможным и целесообразным внедрение программного робота (RPA, Robotic Process Automation) в этот процесс. RPA – это технология, позволяющая конфигурировать программные роботы для выполнения однотипных действий на уровне пользовательского интерфейса. Программные роботы отлично подходят для повторяемых задач, не требующих принятия решений человеком. Это, прежде всего, ручные, структурированные задачи, реализующиеся при возникновении некоторого события (заполнение форм, повторный ввод данных с клавиатуры, сложные вычисления и т.д.). Основные преимущества RPA заключаются в следующем [8]:

- они выполняют свою работу быстро и не допускают ошибок;
- доступны для решения задач в любое время суток;
- позволяют освободить сотрудников от рутинной работы, сокращая 50–70% операционных затрат;
- работают с существующими системами, приложениями.

В автоматизируемом процессе оформления заявок на обучение программному роботу можно «поручить» принимать почту, оценивать правильность оформления заявок, регистрировать слушателей и формировать группы в соответствии с программами обучения. В настоящее время существуют несколько платформ, на базе которых могут быть разработаны программные роботы, например, платформа UiPath Community Edition. Робот способен идентифицировать веб-элементы по их атрибутам, независимо от версии браузера, положения и размера экрана. Кроме того, с одной стороны, этот продукт находится в свободном доступе, что позволит существенно сократить затраты на автоматизацию бизнес-процессов учебно-научного центра, а с другой – в системе управления бизнес-процессами ELMA есть возможность использования программных роботов, разработанных на этой платформе [1].

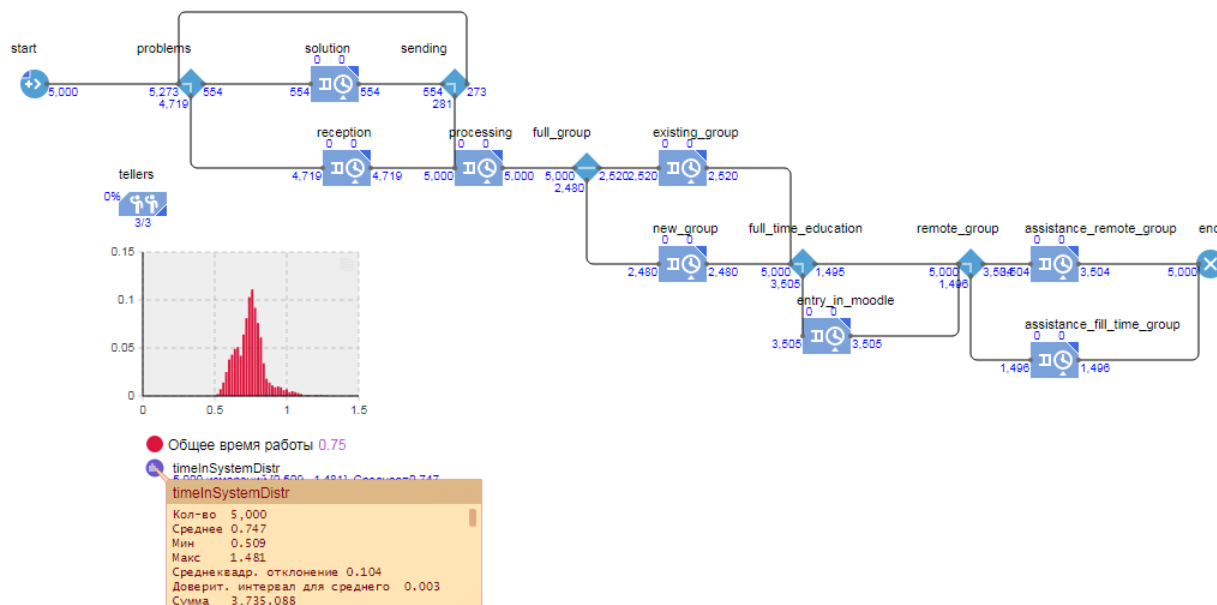
Для ответа на вопрос «Какое количество сотрудников может быть заменено программным роботом?» была построена имитационная модель с использованием системы имитационного моделирования AnyLogic [5]. Этот продукт пользуется заслуженной популярностью среди специалистов-аналитиков различных предметных областей, так как позволяет получать детальное представление о бизнес-процессах и оптимизировать их.

Для решения задачи о сокращении времени на обработку заявок в качестве параметров были взяты количество заявок и приблизительное время, требуемое на их обработку. Известно, что на рассматриваемом предприятии более 6700 сотрудников, примерно для 75% сотрудников в течение года периодически требуется обучение, аттестация и/или повышение квалификации. Количественные оценки времени, затрачиваемые на обработку заявок, получены методом наблюдения и хронометража в течение 1 месяца (табл. 1). При этом в ходе наблюдений за выполнением процесса приема заявок выяснилось, что примерно с каждой десятой заявкой возникают проблемы при обработке, решение которых требует дополнительного времени.

Таблица 1. Параметры имитационной модели процесса обработки заявок

Параметр	Значение
Количество обучаемых	5000 чел.
Количество инженеров по кадрам, обрабатывающих заявки	3 чел.
Минимальное время обработки одной заявки	2,5 мин
Максимальное время обработки одной заявки	9 мин
Среднее время обработки одной заявки	6 мин
Количество проблемных ситуаций от числа заявок	10%

На основании исходных данных и принятых допущений в среде AnyLogic была построена имитационная модель (рис. 2).

**Рис. 2.** Модель обработки заявок на обучение при участии трех сотрудников

Для оценки возможности и целесообразности применения программного робота была разработана модель обработки заявок с его участием. В модели были приняты следующие допущения при том же исходном количестве заявок (табл. 2):

Таблица 2. Параметры имитационной модели процесса обработки заявок с участием программного робота

Параметр	Значение
Минимальное время обработки заявки роботом	0,8 мин
Максимальное время обработки заявки роботом	3,5 мин
Среднее время обработки заявки роботом	1,5 мин

Однако, обработка заявок только лишь программным роботом нецелесообразна, так как в ходе анализа процесса были выявлены случаи возникновения проблемных ситуаций, с которыми робот справиться не может. К ним относятся: нарушение заказчиком правил оформления и подачи заявок, отсутствие четких правил формирования групп в случае совмещения очной и дистанционной формы обучения слушателей в одной программе обучения, сбои программного обеспечения и вычислительной техники. Время ликвидации проблемных ситуаций зависит от ее тяжести и варьируется от нескольких минут до нескольких часов, а их количество составляет около 10% от всех принимаемых заявок. Для

оценки времени выполнения процесса была разработана имитационная модель с совместным участием программного робота и инженеров по кадрам (рис. 3). В модели были приняты допущения, аналогичные приведенным в табл. 1 и табл. 2.

Для уточнения деталей и описания конкретных шагов алгоритма работы была построена модель бизнес-процесса в ELMA, в которой отмечено, какие задачи передаются программному роботу, а какие решения могут быть приняты только человеком. На рис. 4 изображен фрагмент подпроцесса «Оформление заявок», описанного ранее, с использованием программного робота. Программный робот с заданной периодичностью выполняет вход в корпоративную почту учебного центра для поиска заявок, просматривает полученные заявки на соответствие шаблонам различных программ обучения, включая анализ на правильность заполнения всех полей. В случае возникновения каких-либо ошибок по заполнению заявок программный робот передает управление процессом инженеру по кадрам, который решает проблемы. Если же шаблон заявки соответствует выбранной программе и все поля заполнены, робот сохраняет на локальном сервере полученную заявку, что делает возможным переход к следующему этапу образовательного процесса – формированию групп обучающихся и оформлению сопроводительной документации.

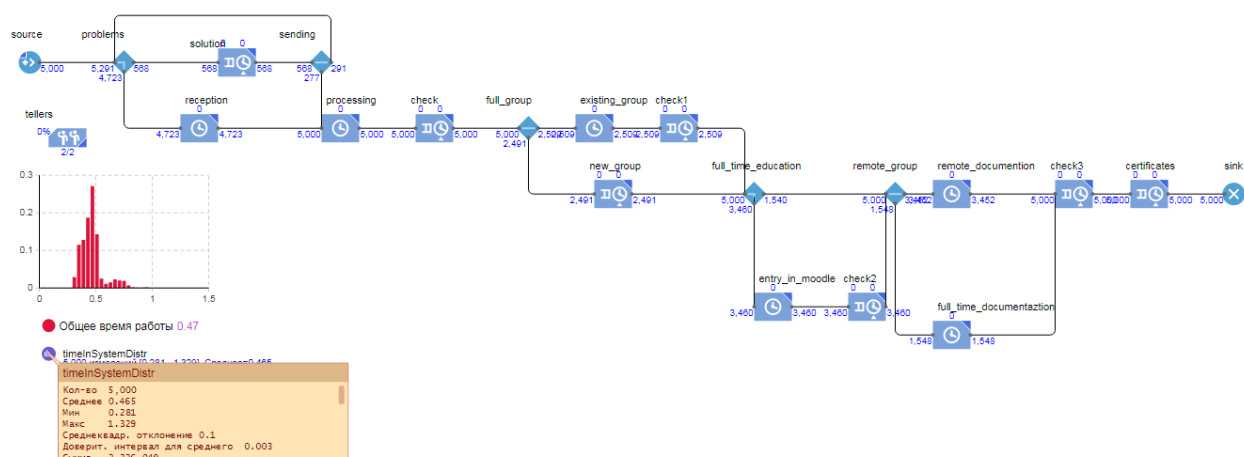


Рис. 3. Имитационная модель обработки заявок на обучение с использованием программного робота и сотрудника УНЦ

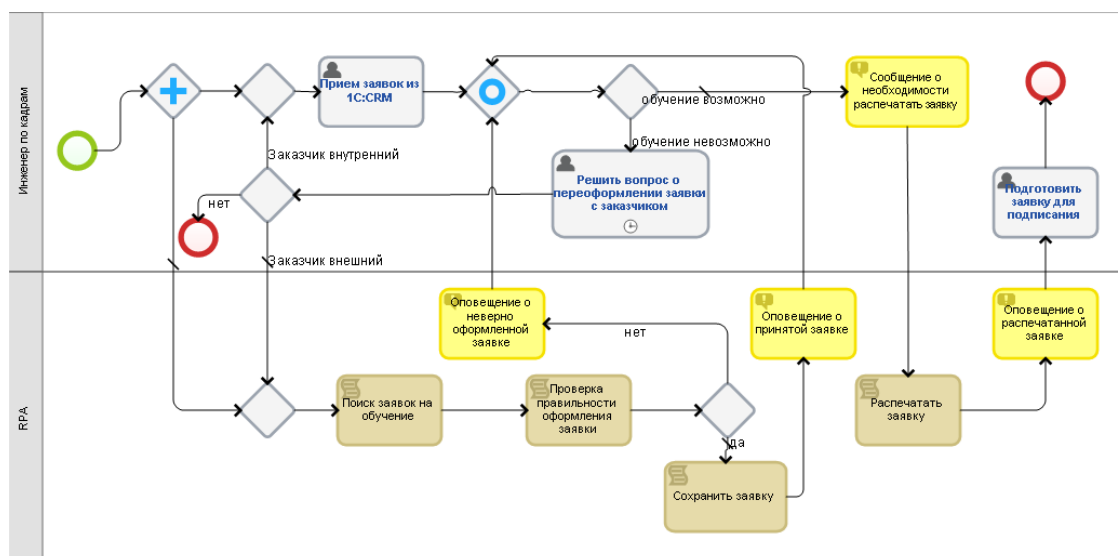


Рис. 4. Фрагмент подпроцесса оформления заявок с использованием программного робота

Анализ содержания бизнес-процесса и его имитационное моделирование показали, что оптимальным вариантом его реализации является совмещение деятельности 2-х сотрудников УНЦ и программного робота. Выделение 2-х сотрудников УНЦ обусловлено характером возникающих проблемных ситуаций: часть их связана с нарушением регламента, а часть – сбоями в работе программно-аппаратного комплекса.

Заключение. В статье рассматриваются новые способы повышения эффективности деятельности, опирающиеся на использование информационных технологий. Предлагается подход, позволяющий на основе моделирования бизнес-процессов и анализа проблемных ситуаций, возникающих в ходе их исполнения, рекомендовать сочетание различных информационных и интеллектуальных технологий, обеспечивающих более качественное выполнение бизнес-процессов. Имитационное моделирование проводится для определения частоты проблемных ситуаций, приводящих к привлечению специалистов для решения вопроса, с которым не справился программный робот. Тщательное изучение и формализация описаний проблемных ситуаций позволит обучить робота необходимым действиям и расширит круг его применения. Описание проблемных ситуаций предполагает фиксацию события, приводящего к остановке бизнес-процесса, выявление причин возникновения этого события и (в зависимости от причины) определение тактики по устранению проблемы, а также возможные состояния бизнес-процесса после применения управляющих воздействий. Для формализованного описания проблемных ситуаций используются методы инженерии знаний, в частности онтологический анализ предметной области, дающий возможность сформировать правила принятия решений на основании возникавших ранее прецедентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белайчук А.А., Елифёров В.Г., Свод знаний по управлению бизнес-процессами: BPM СВОК 3.0. М.: Альпина Паблишер. 2018. 480 с.
2. Громов А., Каменнова М., Старыгин А. Управление бизнес-процессами на основе технологии Workflow // Открытые системы. СУБД. 1997. №1. Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/1997/01/179063>. (Дата обращения 05.03.2020).
3. Калянов Г. Н. О теории бизнес-процессов // Программная инженерия. 2018. №9(3). С. 99-109. DOI: 10.17587/prin.9.99-108
4. Митрофанова Е.А., Коновалова В.Г., Митрофанова А.Е. Технология определения и планирования потребности в персонале определенного профессионального уровня и компетенций // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной научной конференции. Самара: ООО «Офорт». 2019. Т. 2. С. 455-460.
5. Новиков И. Почему программные роботы стали вдруг так популярны? Режим доступа: https://cnews.ru/articles/2020-02-04_pochemu_programmnye_roboty_rpa_stali. Дата обращения 05.03.2020
6. Обзор: Искусственный интеллект 2018. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php>. (Дата обращения 27.02.2020).
7. Официальный сайт компании AnyLogic. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru>. (Дата обращения 20.03.2020).
8. Официальный сайт компании ELMA. Режим доступа: <https://www.elma-bpm.ru>. (Дата обращения 12.03.2020).

9. Черняховская Л.Р., Никулина Н.О., Малахова А.И., Гарайшин Ш.Г., Нагимов Т.Р. Проектирование системы управления бизнес-процессами на основе онтологического анализа и имитационного моделирования предметной области // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №3 (15). С. 18-30. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-02
 10. Business Process Management System - Управление бизнес-процессами (рынок России): обзор российского рынка BPM-систем. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php/BPM>. (Дата обращения 27.02.2020).
-

UDK 004.94:004.89

BUSINESS PROCESS MANAGEMENT BASED ON THE RESULTS OF SIMULATION MODELLING AND PROBLEM SITUATIONS ANALYSIS

Liliya R. Chernyakhovskaya

Doctor of technical sciences, professor of Technical Cybernetics Department

e-mail: lr_chern@yandex.ru

Natalya O. Nikulina

Candidate of technical sciences, docent of Automated Management Systems Department

e-mail: nikulinano@outlook.com

Anna I. Malakhova

Candidate of technical sciences, docent of Automated Management Systems Department

e-mail: aimalakhova@gmail.com

Shamil G. Garaishin

Candidate of technical sciences, head of the Department of Geophysics

e-mail: gsg@bngf.ru

Gulnara I. Yarmuhametova

4th year student of Automated Management Systems Department

e-mail: yarmuhametova.gulnara@yandex.ru

Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marks Str., 450008, Ufa, Russia

Abstract. Current business environment forces the companies constantly look for new ways to improve the efficiency of its activities, based on the use of information technologies, which are carefully selected, designed and configured for the needs and characteristics of a particular enterprise. Mathematical methods and simulation modelling tools are used to configure project solutions, in which quality can act business process management systems. Modeling results make it possible to distribute functions between business process participants more accurately, as well as to justify the need to implement artificial intelligence technologies at its certain stages. The article offers an approach that allows, basing on business process modeling and problem situations analysis, arising during its execution, to recommend a combination of various information and intelligent technologies that provide better business process performance. The research is carried out with the financial support of RFBR grant №

19-08-00937 "Models and methods of intellectual decision making support in software project management realized on manufacturing enterprises".

Keywords: business process management, simulation model, business process management system (BPMS), Robotic Process Automation, educational and research center, personnel training.

References

1. Belaychuk A.A., Yeliforov V.G.; Svod znaniy po upravleniyu Ofitsial'nyy sayt kompanii ELMA biznes-protsessami: BPM CBOK 3.0. [Management Body of Knowledge ELMA Official Business Process Website: BPM CBOK 3.0]. M.: Alpina Publisher = Al'pina Publisher. 2018. 480 p. (in Russian).
2. Gromov A., Kamennova M., Sarygin A. Upravleniye biznes-protsessami na osnove tekhnologii Workflow [The management of business processes based on Workflow technology]. // Otkrytyye sistemy. SUBD =Open Systems. DBMS. 1997. №1. Available at: <https://www.osp.ru/os/1997/01/179063>. Accessed: 05.03.2020 (in Russian).
3. Kalyanov G. N. O teorii biznes-protsessov [On the Theory of Business Processes] // Programmnaya Ingeneria= Software Engineering. 2018. Vol. 9. №. 3. Pp. 99-108. DOI: 10.17587/prin.9.99-108. (in Russian).
4. Mitrofanova A.E., Konovalova V.G., Mitrofanova E.A. Tekhnologiya opredeleniya i planirovaniya potrebnosti v personale opredelennogo professional'nogo urovnya i kompetentsiy [Technology for determining and planning the need for personnel of a certain professional level and competencies] // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh: Trudy XXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Samara: OOO «Ofort» = Problems of management and modeling in complex systems: Proceedings of the XXI International Scientific Conference. - Samara: Etching LLC. 2019. Vol. 2. Pp. 455-460. (in Russian).
5. Novikov I. Pochemu programmnyye roboty stali vdrug tak populyarny? [Why did software robots suddenly become so popular?]. Available at: https://cnews.ru/articles/2020-02-04_pochemu_programmnye_roboty_rpa_stali. Accessed: 05.03.2020. (in Russian).
6. Obzor: Iskusstvennyy intellekt 2018 [Review: Artificial Intelligence 2018]. Available at: <http://www.tadviser.ru/index.php>. Accessed: 27.02.2020. (in Russian).
7. Ofitsial'nyy sayt kompanii AnyLogic [Official website of AnyLogic]. Available at: <https://www.anylogic.ru>. Accessed: 20.03.2020. (in Russian).
8. Ofitsial'nyy sayt kompanii ELMA [Official website of ELMA]. Available at: <https://www.elma-bpm.ru>. Accessed: 12.03.2020. (in Russian).
9. Chernyakhovskaya L.R., Nikulina N.O., Malakhova A.I., Garayshin SH.G., Nagimov T.R. Proyektirovaniye sistemy upravleniya biznes-protsessami na osnove ontologicheskogo analiza i imitatsionnogo modelirovaniya predmetnoy oblasti [Designing a business process management system based on ontological analysis and domain modeling] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii= Information and mathematical technologies in science and management. 2019. №3 (15). Pp. 18-30. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-02 (in Russian).
10. Business Process Management System (rynok Rossii): obzor rossiyskogo rynka BPM-sistem [(Russian market): a review of the Russian market of BPM systems]. Available at: <http://www.tadviser.ru/index.php/BPM>. Accessed: 27.02.2020/ (in Russian).

СИСТЕМА ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ

Артемяева Ирина Леонидовна

Д.т.н., профессор, зав. кафедрой прикладной математики, механики,
управления и программного обеспечения
e-mail: artemeva.il@dvfu.ru,

Ромашкевич Полина Станиславовна

Магистрант, e-mail: romashkevich.ps@students.dvfu.ru,

Дальневосточный федеральный университет,
690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Аннотация. В статье рассматривается проблема оценки показателей эффективности компаний различных отраслей и родов деятельности. Дается обзор существующих систем аналогичной направленности для определения требований создаваемой системы. Определяются основные компоненты компании, влияющие на оценку эффективности и ставятся задачи, которые будет решать система.

Ключевые слова: эффективность компаний, оценка эффективности, анализ показателей, программная система, исследование.

Цитирование: Артемяева И. Л., Ромашкевич П. С., Система для отслеживания эффективности экономических компаний различных отраслей// Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 84-93. DOI 10.38028/ESI.2020.18.2.007.

Введение. Любая компания стремится увеличить доходность и продуктивность работы, вне зависимости от ее отрасли. Лучший способ повысить эффективность – отслеживать важнейшие показатели компании и прогнозировать результат, отталкиваясь от них. Для качественной и количественной оценки также необходимо опираться на совокупность показателей, причем, как на общие для любого рода компании, так и на индивидуальные относительно специфики отрасли. Так, правильная оценка основных показателей позволит определить, насколько эффективна компания в целом, какие ее направления прибыльные, а какие – убыточные. Такая оценка позволит правильно расставить приоритеты в компании и поднимет ее деятельность на более высокий уровень [26].

Сейчас существуют некоторые приложения, которые позволяют решать задачу оценки показателей компаний в каждом роде деятельности или отрасли. К примеру, в нефтегазовой отрасли такой функциональностью обладают программы: COMFAR, PROSPIN [12], Альт-Инвест [15], Project expert [9] и ИС для исследования инновационной активности нефтегазовых предприятий РФ [22].

Для того, чтобы решить задачу оценки показателей компаний, необходимо знать словарь терминов для каждой отрасли компании. Этот словарь может задавать онтология. Так как каждую область необходимо рассматривать в отдельности и на данный момент

системы автоматизации процесса исследования эффективности различных видов компаний отсутствуют, возникает сложность в создании такой системы, которая использовала бы свой набор характеристик и правил и проводила анализ на их основе с целью улучшения эффективности компании при помощи рекомендаций. Однако, онтология предметной области задает информацию об определенном типе компаний, схожих по характеристикам (например, по роду деятельности или по отраслевой принадлежности). Задачу поддержки в системе нескольких видов компаний способны решать специализированные оболочки, разработка которых основана на метаонтологии предметной области, в терминах которой определяются онтологии нескольких областей [3].

С учетом сказанного, можно сделать вывод, что создание инструмента для поддержки исследований эффективности компаний является актуальной проблемой.

Обзор существующих программных продуктов. Существуют различные программные продукты, которые позволяют создавать сбалансированные системы показателей, а также дорабатывать их с учетом особенностей конкретной компании: «KPI MONITOR», «Audit Expert», «bambooBSC», «Программное обеспечение от компании «Бизнес технологии»», «Forecast NOW!». Для определения требований к создаваемой системе имеет смысл проанализировать вышеперечисленные системы по следующим пунктам:

1. Структура системы (тип системы, интерфейс);
2. «Язык» задания набора характеристик;
3. «Язык» задания правил вычисления значений показателей;
4. Форма представления результата анализа.

«KPI MONITOR» [18] представляет собой готовое решение для оперативной и качественной оценки эффективности работы компании посредством автоматизации системы управления Ключевыми Показателями Эффективности. Является клиент-серверным приложением, где клиентом может выступать web или мобильное приложение. Основные элементы интерфейса: показатели, системы показателей, отчеты, панели мониторов и стратегические карты. Система показателей представляется в виде древовидной структуры. Вложенность узлов «дерева» не ограничена. Созданные показатели собираются в узлы дерева по смысловому содержанию. В целях осуществления ручного сбора данных о фактических и/или плановых значениях показателей в системе KPI MONITOR позволено вводить, корректировать значения показателей. Язык задания правил вычисления аналогичен Excel. Доступные в программе формы отчетов позволяют использовать мастер создания табличных отчетов по различным показателям в разрезе аналитических параметров, настроенных для конкретной модели.

«Audit Expert» [17] – аналитическая система диагностики, оценки и мониторинга финансового состояния одного или группы предприятий на основе данных финансовой и управленческой, в том числе консолидированной отчетности. Представляет собой десктопное приложение, где все файлы проекта для анализа компании хранятся локально на компьютере. Система позволяет проводить финансовый анализ для любого типа компании для показателей, которые пользователь задает самостоятельно. В ходе анализа результативности финансово-хозяйственной деятельности и финансового состояния предприятия возникает проблема выбора состава и количества показателей, оценки их практичности и сбалансированности. Избежать ее позволяет коэффициентный анализ –

наиболее широко используемая методика финансового анализа. Методика заключается в расчете на основании данных баланса и отчета о прибылях и убытках четырех основных групп показателей: рентабельности, ликвидности, деловой активности и структуры капитала. Язык задания правил вычисления в программе Audit Expert аналогичен предыдущему примеру. По результатам финансового анализа в Audit Expert формируется широкий спектр графиков и диаграмм.

«bambooBSC» [24] – web-приложение с открытым исходным кодом для отслеживания и балансирования системы показателей. Является клиент-серверным приложением, где клиентом может выступать web или мобильное приложение. Данная система позволяет проводить финансовый анализ для любого типа компании для ключевых показателей. Язык задания набора характеристик представляет собой либо создание и редактирование реляционных таблиц, либо ручной ввод значений через web-интерфейс. Все формулы добавляются через API приложения с помощью языка программирования Java. Для этого необходимо сгенерировать название формулы (появится в web-интерфейсе приложения), затем необходимо написать собственный метод для работы формулы с полученными данными. В bambooBSC результат может быть представлен как в виде графиков, так и в виде диаграмм, отчетов, причем не только по какому-то конкретному показателю, но и по их совокупности.

Программное обеспечение от компании «Бизнес технологии». Данная компания предлагает клиент-серверное приложение [16] для различных отраслей для внедрения на предприятии. Система Global предлагает решения в следующих областях: туристический бизнес, складской учёт, подбор и управление персоналом, управление учебными центрами, управление клиникой и медицинскими учреждениями, управление складом. Язык задания набора характеристик представляет собой ручной ввод значений в поля форм. Внутри каждого приложения присутствует модуль для оценки показателей компании. «Язык» задания правил вычисления значений показателей не предусмотрен программным средством. Данная программа позволяет выводить результат в виде графиков, диаграмм для одного или нескольких показателей сразу.

«Forecast NOW!» [19] – это программное обеспечение для управления запасами, которое предназначено для розничных и оптовых торговых предприятий, а также аутсорсинговых компаний в сфере управления складскими запасами. Система управления запасами «Forecast NOW!» получает данные из программ автоматизации пользователя и производит прогнозирование спроса. Программное обеспечение представляет собой клиент-серверную архитектуру, где в качестве клиента используется десктопное приложение. Существуют три версии программы – корпоративная, максимальная и под ключ. В зависимости от версии предоставляется та или иная функциональность. Программа предназначена только для торговых предприятий. Язык задания набора характеристик представляет собой приведение данных компании к типу данных, используемых в приложении. Ключевым объектом в данной программе является товар, и соответственно, задавать необходимо только его характеристики. Для их задания необходимо добавить новый товар и сразу при добавлении задать его характеристики и, возможно, их значения. Язык задания правил вычисления значений недоступен для пользователя, возможно только изменение исходных кодов при внедрении приложения на конкретном предприятии. Формулы в данной программе задаются с помощью специального интерфейса ввода.

Оценить показатели можно по конкретным товарам, группам товаров, поставщикам, менеджерам по ассортименту

Таким образом, ни одна из рассмотренных систем не учитывает специфические характеристики компании в зависимости от классификации. Также в предложенных приложениях отсутствует заложенная рекомендательная система на основе динамики совокупности показателей. Это значит, что на данный момент нет инструмента для поддержки исследований эффективности компаний, соответствующего всем пунктам следующих требований:

1. Учет различных возможных классификаций компаний по роду деятельности, отраслевой принадлежности и контролю.
2. Клиент-серверный тип приложений (так как данные должны храниться на централизованном сервере, а клиент должен иметь возможность манипулировать с данными без дополнительной нагрузки на сервер).
3. Интуитивно понятный интерфейс (не каждая вышеперечисленная система будет понятна обычному сотруднику компании).
4. Учет специфических для своей области показателей, помимо анализа ключевые показатели эффективности для любого типа компаний.
5. Возможность расширения пользователем языка набора характеристик.
6. Возможность расширения пользователем языка задания правил вычисления значений и удобный способ их подсчета.
7. Как минимум, предоставление результата анализа показателей в виде графиков, диаграмм, отчетов как для одной характеристики или объекта, так и для их совокупности.

Компоненты для оценки эффективности. Как можно увидеть на рис. 1, влияющими на компанию факторами являются ее структура, форма контроля, наличие у нее штатов и оценка эффективности, влияние на которую оказывает преимущественно деятельность компании. В свою очередь, деятельность компании складывается из рода деятельности и отрасли. Рассмотрим подробнее эти классификации.

1. По роду деятельности [23]:

1.1. Производственные – это обособленные специализированные единицы, основанием которых являются профессионально-организованные трудовые коллективы, способные изготовить нужную потребителям продукцию [13].

1.2. Посреднические – это коммерческие предприятия или организации, стоящие между производителями и потребителями товаров и содействующие реализации последних [20].

1.3. Информационные – самостоятельные хозяйствующие субъекты, производящие и реализующие информационную продукцию и оказывающие информационные услуги в целях удовлетворения общественных потребностей в информации и получения прибыли [8].

1.4. Консультационные – самостоятельные, независимые коммерческие организации, оказывающие услуги на договорной основе [5].

1.5. Брокерские – это организации, субъекты рынка, цель которых состоит в систематическом получении прибыли [14].

1.6. Инвестиционные – это организации, осуществляющие коллективные инвестиции [21].

1.7. Аудиторские – это юридические лица, как правило со специальной, исключительной или ограниченной правоспособностью, созданные в соответствии с национальным законодательством о бухгалтерском учёте и аудиторской деятельности [6].

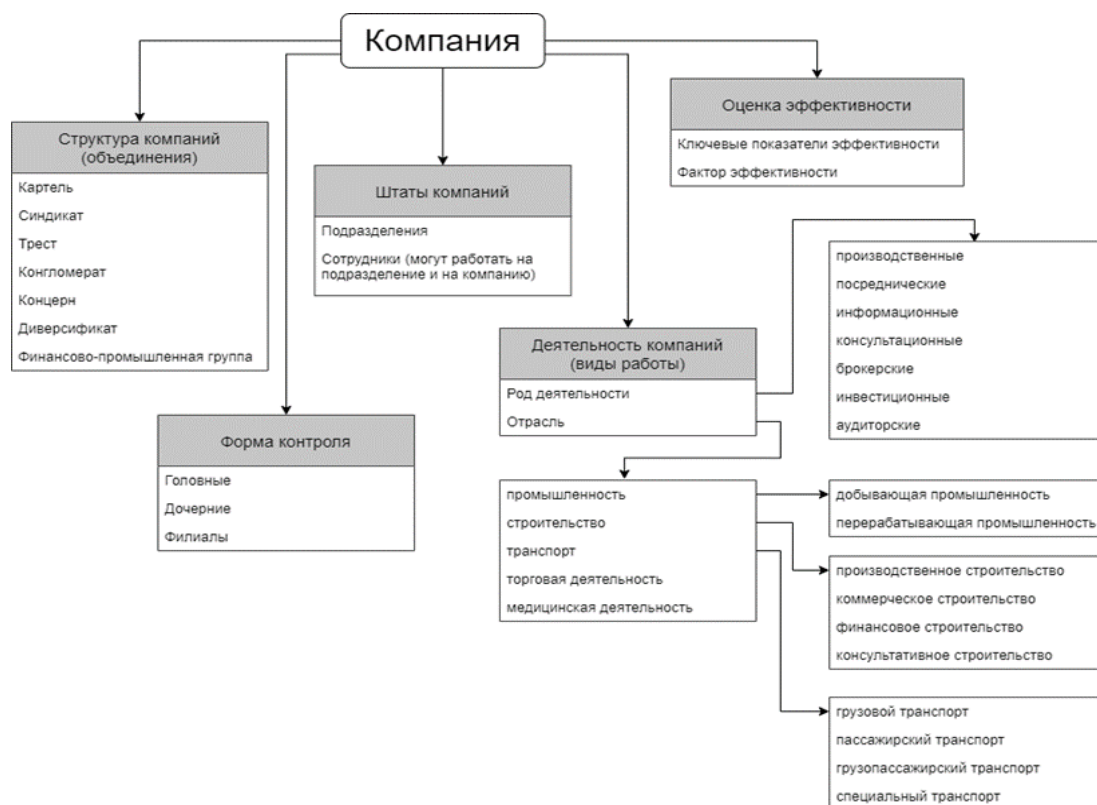


Рис. 1. Иерархия важнейших компонентов компании

2. По отраслевой принадлежности [10]:

2.1. Промышленные – организации, производящие промышленную продукцию и являющиеся, как правило, точечными объектами: завод, фабрика, шахта, карьер, рудник, комбинат и др. [4].

2.2. Строительные производственные – предприятия по выполнению комплекса подготовительных и основных строительно-монтажных и специальных строительных работ при возведении и реконструкции, техническом перевооружении, капитальном ремонте всех типов зданий и сооружений в любых климатических зонах [25]; строительные коммерческие – организационно-правовые формы юридического лица, преследующего прибыль в качестве основной цели своей деятельности, в отличие от некоммерческой организации, которая не имеет целью извлечение прибыли и не распределяет полученную прибыль между участниками [7]; строительные финансовые – организации, определенные финансовые институты, основной функцией которых является аккумуляция свободных денежных средств разных экономических субъектов и предоставление их от своего имени на определенных условиях другим субъектам, нуждающимся в этих средствах [11]; строительные консультативные – предпринимательские компании, сущность

которых составляют консультирование производителей, продавцов, покупателей по обширному кругу юридических, управленческих и экономических вопросов (финансы, создание и регистрация фирм, внешнеэкономические связи, исследование и прогнозирование товаров, ценных бумаг, инноваций), а также подготовка документов, необходимых при создании новых организаций и фирм [1].

2.3. Транспортные – предприятия, основной задачей которых является перевозка людей и/или транспортировка грузов [2].

Для каждого из вышеперечисленных родов деятельности есть свои показатели эффективности и формулы их вычисления. Для большинства отраслей предприятий также существуют свои формулы и ключевые показатели. Для тех же видов отраслей, для которых формулы затруднительно найти или которых на данный момент нет (например, грузопассажирский или специальный транспорт) в системе будет возможность в дальнейшем эти формулы добавить и расширить язык, то есть добавить свои ключевые показатели для исследований. Таким образом, можно перейти к задачам системы поддержки исследований эффективности компаний.

Задачи создаваемой системы. Основная задача – исследование эффективности компаний путем анализа ее ключевых показателей. Исследование выражается в подсчете определенных коэффициентов и построении диаграмм на их основе. Кроме этого, будут решаться следующие задачи:

1. Хранение информации о пользователях, компаниях и их роде деятельности, отрасли, форме контроля, сотрудниках и подразделениях компании, значениях ключевых показателей для каждой компании (подразделения, сотрудника) за заданный период времени и результате эффективности компании (подразделения, сотрудника).
2. Обработки:
 - Чтение ключевых показателей из файловой таблицы.
 - Анализ информации о компании (подразделении, сотруднике) – подсчет ключевых коэффициентов для определения эффективности.
 - Составление результата (отчета) по информации об эффективности компании (подразделения, сотрудника).
3. Передачи:
 - Загрузка ключевых показателей для каждой компании (подразделения, сотрудника) за заданный период времени из файловой таблицы.
 - Экспорт результата об эффективности компании (подразделения, сотрудника) в файловую базу данных.
 - Экспорт результата в виде графиков/диаграмм/гистограмм в форматах jpeg, png на компьютер.
 - Экспорт выбранных данных в электронные таблицы (MS Excel).

Заключение. Таким образом, можно сказать, что в современном мире развивающейся экономики и увеличения масштабов этой отрасли, становится все более актуальным исследование эффективности компании для дальнейшего принятия решения о ее развитии. Отсюда и возрастает потребность в разработке систем, позволяющих проводить такой анализ с учетом специфики отрасли компании и рода деятельности. Не менее важной является возможность задания формул (правил) вычисления показателей и расширения языка, ведь

параметры оценки меняются и развиваются, появляются новые коэффициенты и показатели, современная система должна удовлетворять темпу развития экономической отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев А. И. Предпринимательство: проблемы собственности и культуры. М. 1991. 106 с.
2. Анисимов А. П., Юфин В. К. Экономика, организация и планирование автомобильного транспорта: Учебник для учащихся автотранспортных техникумов. 1986. - 328 с.
3. Артемьева И. Л. Многоуровневые модели сложно-структурированных предметных областей и их использование при разработке систем, основанных на знаниях / Автореферат диссертации доктора технических наук: 05.13.17. Москва. 2008. 47 с.
4. Белкин М. В., Епишкин И. А. Организация производства. Учебное пособие для бакалавров направлений «Экономика», «Управление персоналом» и «Менеджмент». М.: МИИТ. 2014. 64 с.
5. Бросалин В. И., Крылова Н. Н. Коммерческая деятельность: учеб. пособие для студентов. Саратов: Саратовский социально-экономический институт (филиал) РЭУ им. Г. В. Плеханова. 2016. 92 с.
6. Герасименко А. В. Финансовая отчетность для руководителей и начинающих специалистов. М.: Альпина Паблишер. 2012. 436 с.
7. Гражданский кодекс Российской Федерации. Статья 50. Коммерческие и некоммерческие организации.
8. Исаев Г. Н. Предпринимательство в информационной сфере: учебное пособие // 2-е изд., перераб. и доп. Москва: КНОРУС. 2019. 286 с.
9. Кабанов В. А. Практикум Project Expert: учебное пособие. Сергиев Посад: Филиал ФГБОУ ВПО «МГИУ». 2015. 100 с.
10. Казанцева И. Г., Гущева Л. А. Экономика и менеджмент горного производства: учебное пособие. Пермь: Изд-во ПНИПУ. 2013. 105 с.
11. Ковалев В. В. Финансы. М.: ТК Велби, Издательство Проспект. 2008. 634с.
12. Корнюшин В. Ю. Программные средства бизнес-планирования: COMFAR & PROPSPIN. Режим доступа: <http://www.comprice.ru/articles/detail.php?ID=42976>
13. Лекции по менеджменту, Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана. Режим доступа: <https://www.intuit.ru/studies/courses/3640/882/lecture/31207>
14. Основные понятия брокерских фирм. Режим доступа: <https://utmagazine.ru/posts/8365-brokerskie-firmy>
15. Официальный сайт компании «Альт-Инвест». Режим доступа: <https://www.alt-invest.ru/program/>
16. Официальный сайт программного обеспечения Global от компании «Бизнес технологии». Режим доступа: <https://global-system.ru>
17. Официальный сайт Audit Expert. Режим доступа: <https://www.expert-systems.com>
18. Официальный сайт KPI Software. Режим доступа: <https://www.simplekpi.com>
19. Официальный сайт Forecast NOW!. Режим доступа: <https://fnow.ru>

20. Посредники во внешней и внутренней торговле: их функции, виды и особенности работы, НП ЦДО «ЭЛИТАРИУМ». Режим доступа: <https://www.elitarium.ru/posrednik-torgovlja-predstavitel-komissioner-komitent-dogovor-postavki-prodazhi/>
21. Прохоров А. М. Большой энциклопедический словарь. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Науч. изд-во Большая Российская энциклопедия. СПб.: Норинт. 2000. 1456 с.
22. Ромашкевич П. С. Разработка серверной части информационной системы для исследования инновационной деятельности нефтегазовых компаний РФ: выпускная квалификационная работа. Владивосток: ДВФУ. 2019. 90 с.
23. Рощина Н. В. Формы и методы функционирования хозяйственных организаций: Курс лекций. Академия труда и социальных отношений Федерации Независимых Профсоюзов России. Москва. 2011.
24. Сайт с открытым исходным кодом bambooBSC Режим доступа: <https://github.com/billchen198318/bamboobsc>
25. Усенко В. М. Строительное производство. М.: Медиа. 1995. 395 с.
26. Хорунжина К. С. Проблемы анализа показателей бизнес-процессов торговых предприятий. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. 2016. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/problems-of-analysis-of-business-process-indicators-of-trade-enterprises/viewer>

UDK 004.89

SYSTEM FOR TRACKING THE EFFICIENCY OF ECONOMIC COMPANIES IN VARIOUS INDUSTRIES

Artemieva Irina Leonidovna

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department
of Applied Mathematics, Mechanics, Control and Software,

e-mail: artemeva.il@dvfu.ru

Romashkevich Polina Stanislavovna

Master's Student, e-mail: romashkevich.ps@students.dvfu.ru

Far Eastern Federal University,

690922, Primorskiy Krai, Vladivostok, Russian island, Ajax v., 10,

Abstract. The article deals with the problem of evaluating the performance indicators of companies in various industries and types of activities. An overview of existing systems of a similar orientation is given to determine the requirements of the system being created. The main components of the company that affect the performance assessment are identified and the tasks that the system will solve are set.

Keywords: efficiency of companies, evaluation of efficiency, analysis of indicators, software system, research.

References

1. Ageev A. I. Predprinimatel'stvo: problemy sobstvennosti i kul'tury [Entrepreneurship: problems of property and culture]. Moscow. 1991. 106 p. (in Russian).

2. Anisimov A. P., Yufin V. K. *Ekonomika, organizatsiya i planirovaniye avtomobil'nogo transporta: Uchebnik dlya uchashchikhsya avtotransp. Tekhnikumov* [Economics, organization and planning of automobile transport: Textbook for students of automobile technical schools]. 1986. 328 p. (in Russian).
3. Artemieva I. L. *Mnogourovnevyye modeli slozhno-strukturirovannykh predmetnykh oblastey i ikh ispol'zovaniye pri razrabotke sistem, osnovannykh na znaniyakh: avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk*, [Multilevel models of complex-structured subject areas and their use in the development of systems based on knowledge: abstract of the dissertation of the doctor of technical Sciences: 05.13.17]. Moscow. 2008. 47 p. (in Russian).
4. Belkin M. V., Epishkin I. A. *Organizatsiya proizvodstva. Uchebnoye posobiye dlya bakalavrov napravleniy «Ekonomika», «Upravleniye personalom» i «Menedzhment»* [Organization of production. Training manual for bachelors in the areas of "Economics", "personnel Management" and "Management"]. Moscow: MIIT. 2014. 64 p. (in Russian).
5. Brosalin V. I., Krylova N. N. *Kommercheskaya deyatel'nost': ucheb. posobiye dlya studentov/* [Commercial activity: textbook manual for students] // Saratov: Saratovskiy sotsial'no-ekonomicheskii institut (filial) REU im. G. V. Plekhanova = Saratov socio-economic Institute (branch) Plekhanov Russian University of Economics. 2016. 92 p. (in Russian).
6. Gerasimenko A.V. *Finansovaya otchetnost' dlya rukovoditeley i nachinayushchikh spetsialistov/* [Financial reporting for managers and novice specialists]. Moscow: Al'pina Publisher = Alpina publisher. 2012. 436 p. (in Russian).
7. *Grazhdanskiy kodeks Rossiyskoy Federatsii. Stat'ya 50. Kommercheskiye i nekommercheskiye organizatsii.* [Civil code of the Russian Federation. Article 50. Commercial and non-profit organizations] (in Russian).
8. Isaev G. N. *Predprinimatel'stvo v informatsionnoy sfere: uchebnoye posobiye. 2 izd., pererab. and dop.* [Entrepreneurship in the information sphere: a textbook. 2nd ed., revised and enlarged]. Moskva: KNORUS= Moscow: KNORUS. 2019. 286 p. (in Russian).
9. Kabanov V. A. *Praktikum Project Expert: uchebnoye posobiye* [Project Expert Workshop: tutorial]. Sergiev Posad: Filial FGBOU VPO «MGIU»= The Branch of FSBEI of HPE "MSIU". 2015. 100 p. (in Russian).
10. Kazantseva I. G., Gushcheva L. A. *Ekonomika i menedzhment gornogo proizvodstva: uchebnoye posobiye* [Economics and management of mining production: textbook] // Perm: Izd-vo PNIPU =Publishing house of PERM National Research Polytechnic University. 2013. 105 p. (in Russian).
11. Kovalev V. V. *Finansy* [Finance]. Moscow: TK Velbi, Izdatel'stvo Prospekt = Publishing TC velby, House Prospekt. 2008. 634p. (in Russian).
12. Korniyushin V.Yu. *Programmnyye sredstva biznes-planirovaniya: COMFAR & PROPSPIN* [Software tools for business planning: COMFAR & PROPSPIN]. Available at: <http://www.comprice.ru/articles/detail.php?ID=42976> (in Russian).
13. *Lektsii po menedzhmentu, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. H.E.Baumana.* [Lectures on Management, Bauman Moscow State Technical University]. Available at: <https://www.intuit.ru/studies/courses/3640/882/lecture/31207> (in Russian).

14. Osnovnyye ponyatiya brokerskikh firms [Basic concepts of brokerage firms]. Available at: <https://utmagazine.ru/posts/8365-brokerskie-firmy> (in Russian).
15. Ofitsial'nyy sayt kompanii «Alt-Invest» [Official website of the company "Alt-invest"]. Available at: <https://www.alt-invest.ru/program/> (in Russian).
16. Ofitsial'nyy sayt programmogo obespecheniya Global ot kompanii «Biznes tekhnologii» [Official website of Global software from the company "Business technologies"]. Available at: <https://global-system.ru> (in Russian).
17. Ofitsial'nyy sayt Audit Expert [Official website of Audit Expert]. Available at: <https://www.expert-systems.com> (in Russian).
18. Oficial'nyj sayt KPI Software [Official website of KPI Software]. Available at: <https://www.simplekpi.com> (in Russian).
19. Ofitsial'nyy sayt Forecast NOW! [Official website of Forecast NOW!]. Available at: <https://fnow.ru> (in Russian).
20. Posredniki vo vneshney i vnutrenney torgovle: ikh funktsii, vidy i osobennosti raboty, NP TSDO «ELITARIUM» [Intermediaries in external and internal trade: their functions, types and characteristics of work, NP CDR "ELITARIUM"]. Available at: <https://www.elitarium.ru/posrednik-torgovlja-predstavitel-komissioner-komitent-dogovor-postavki-prodazhi/> (in Russian).
21. Prokhorov, A. M. Bol'shoy entsiklopedicheskiy slovar'. 2-e izd, per. i dop.. [Great encyclopedic dictionary. 2nd edd, rev. and add]. M.: Nauch. izd-vo Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya; SPb.: Norint = Scientific publishing house Big Russian encyclopedia; St. Petersburg: Norint. 2000. 1456 p. (in Russian).
22. Romashkevich P. S. Razrabotka servernoy chasti informatsionnoy sistemy dlya issledovaniya innovatsionnoy deyatel'nosti neftegazovykh kompaniy RF: vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota [Development of the server part of the information system for research of innovative activity of oil and gas companies of the Russian Federation: final qualification work]. Vladivostok: DVFU = far Eastern Federal University. 2019. 90 p. (in Russian).
23. Roshchina N. V. Formy i metody funktsionirovaniya khozyaystvennykh organizatsiy: Kurs lektsiy [Forms and methods of functioning of economic organizations: a course of lectures] // Akademiya truda i sotsial'nykh otnosheniy Federatsii Nezavisimyykh Profsoyuzov Rossii = Academy of labor and social relations of the Federation of Independent trade Unions of Russia. Moscow. 2011. (in Russian).
24. Sayt s otkrytym iskhodnym kodom bambooBSC [Website with open source code bambooBSC]. Available at: <https://github.com/billchen198318/bamboobsc> (in Russian).
25. Usenko V. M. Stroitel'noye proizvodstvo [Construction production] // Moskva: Media = Moscow: Media. 1995. 395 p. (in Russian).
26. Khorunzhina K. S. Problemy analiza pokazateley biznes-protssesov torgovykh predpriyatiy [Problems of analysis of indicators of business processes of trade enterprises]. Moskovskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet im. N. Je. Baumana = Bauman Moscow State Technical University. 2016. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-analiza-pokazateley-biznes-protssesov-torgovyh-predpriyatiy/viewer> (in Russian).

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Ковалева Евгения Александровна

аспирант кафедры информатики и математического моделирования,

e-mail: zhenia-93com@ya.ru,

Иваньо Ярослав Михайлович

д.т.н., профессор, проректор по научной работе,

e-mail: pnr@igsha.ru,

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,

664038, Иркутский р-он, п. Молодежный, 1/1

Аннотация. Описан программный комплекс для эколого-математического моделирования производства сельскохозяйственной продукции со специальным математическим и алгоритмическим обеспечением. Приведена частная эколого-математическая модель оптимизации производства сельскохозяйственной продукции на богарных и орошаемых землях с усредненными показателями. Кратко описано алгоритмическое обеспечение. Программный комплекс содержит базу данных временных рядов производственно-экономических, природно-климатических и показателей загрязнения и деградации сельскохозяйственных угодий. В информационное обеспечение входит также «Справочник», который содержит нормативные данные по загрязнению почвы и водной среды. Рассмотрен пользовательский интерфейс. С помощью программного комплекса реализована эколого-математическая модель оптимизации производства сельскохозяйственной продукции для одного из предприятий Иркутской области.

Ключевые слова: программный комплекс, эколого-математическая модель, оптимизация, аграрная продукция.

Цитирование: Ковалева Е.А., Иваньо Я. М. Программный комплекс для эколого-математического моделирования производства сельскохозяйственной продукции // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 94 –106. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.008.

Введение. На производство сельскохозяйственной продукции воздействует множество природных и техногенных факторов. В частности, к снижению объемов и качества продукции может привести распространение эродированности земель, а также загрязнение водных и земельных ресурсов.

Для сохранения окружающей среды в условиях интенсификации сельскохозяйственного производства актуальным является использование эколого-математических моделей производства сельскохозяйственной продукции с целевой функцией в виде минимизации ущерба окружающей среде или максимизации прибыли с учетом ущербов, нанесенных природе. При этом следует иметь ввиду большое число параметров модели, многие из которых являются случайными или интервальными. По этой

причине необходимо создание специализированных программных комплексов для решения задач оптимизации производства аграрной продукции в условиях неопределенности при минимизации ущерба окружающей среде.

Целью работы является описание разработанного программного комплекса «Эколого-математическое моделирование производства продовольственной продукции».

Для достижения цели решались следующие задачи:

- 1) рассмотрение математического и алгоритмического обеспечения;
- 2) описание информационного обеспечения;
- 3) апробация работы программного комплекса на реальном объекте.

Математические методы и состав информации. При построении эколого-математических моделей для оптимизации производства сельскохозяйственной продукции в программном комплексе использованы следующие группы многолетних показателей: производственно-экономические, природно-климатические и оценки загрязнения и деградации сельскохозяйственных угодий. К производственно-экономическим показателям относятся: площади сельскохозяйственных угодий, урожайность сельскохозяйственных культур, поголовье и продуктивность животных, затраты на производство по статьям расходов, прибыль с единицы площади и головы, объемы воды для нужд сельского хозяйства и др. Природно-климатические показатели включают в себя: температуру воздуха и почвы, количество осадков, гидрометеорологические явления, скорость ветра, характеристики рельефа, качество почвы и др. Показатели загрязнения и деградации почв характеризуются фоновым и фактическим содержанием вредных веществ в почве и воде, концентрациями загрязнителей, площадью эрозии и др.

Источниками информации являются многолетние данные бухгалтерской отчетности сельскохозяйственной организации, регионального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, материалы государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области», карты состояния почвенного покрова сельскохозяйственных угодий региона, сведения территориального органа Федеральной службы государственной статистики.

Для оценки свойств изменчивости показателей, входящих в эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции, применены методы теории вероятностей и математической статистики [1, 5, 16 - 18], в частности, способы построения законов распределения вероятностей, корреляционно-регрессионный, автокорреляционный анализ, метод статистических испытаний и др. При определении потерь плодородного слоя почвы использован метод оценки потенциальной опасности эрозии почв под воздействием дождей и расчетная формула интенсивности выноса почвы от ветровой эрозии [3, 6]. Решение прикладных экстремальных задач основано на методах математического программирования в условиях неопределенности [11- 13]. Кроме того, использованы методы проектирования программных комплексов [4, 14-15]. Предложенный программный комплекс включает в себя математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение. Используется математическое обеспечение, описанное в работах [2, 7, 9, 10], рассматривается ниже.

Математическое и информационное обеспечение программного комплекса. Учитывая экологические факторы, неопределенность показателей разработанных моделей, вид критерия оптимальности и неоднородность сельскохозяйственных земель по виду

мелиоративных работ, в статье [2] приведена классификация эколого-математических моделей производства аграрной продукции на богарных и орошаемых землях с учетом ущербов от негативного влияния природных и техногенных факторов на окружающую среду.

В зависимости от использования орошения предложены три группы эколого-математических моделей оптимизации отраслей аграрного производства и их сочетания для: неорошаемого, орошаемого и смешанного земледелия.

По отраслевому признаку эколого-математические модели оптимизации производства продовольственной продукции подразделяются на производство растениеводческой, животноводческой продукции и их сочетания.

Критерием оптимальности в этих задачах может быть максимум прибыли, минимум затрат и минимум ущерба окружающей среде. Из перечисленных целевых функций предлагается использовать максимум прибыли сельскохозяйственной продукции на богарных и орошаемых землях с учетом ущербов окружающей среде.

По степени неопределённости эколого-математические модели подразделяют на модели с детерминированными показателями, интервальными и вероятностными оценками. Кроме того, можно рассматривать задачи с сочетанием интервальных и вероятностных оценок.

В зависимости от признаков техногенного и природного воздействия, вида отрасли, неопределенности показателей и содержания критерия оптимальности формулируется задача оптимизации сельскохозяйственного производства, соответствующая реальной ситуации.

Приведем линейную детерминированную эколого-математическую модель для производства сельскохозяйственной продукции на богарных и орошаемых землях [10]. В качестве критерия оптимальности модели аграрного производства для сочетания отраслей при использовании богарных и орошаемых земель принята максимальная прибыль:

$$f = \sum_{i \in I} (1-l_i) c_i p_i x_i + \sum_{i \in I} (1-l'_i) c'_i p'_i x'_i + \sum_{k \in K} (1-\alpha_k) c_k r_k y_k \rightarrow \max, \quad (1)$$

где c_i, c'_i - прибыль, получаемая от продажи 1 ц товарной продукции культуры вида i при богарном и орошаемом земледелии; c_k - прибыль, получаемая от продажи 1 ц товарной продукции животных вида k ; x_i, x'_i - площадь богарных и орошаемых земель; p_i, p'_i - урожайность при богарном и орошаемом земледелии; r_k - продуктивность животных k ; l_i, l'_i - коэффициенты негативного воздействия техногенных и природных процессов на почву на богарных и орошаемых землях при возделывании культуры i ; α_k - коэффициент негативного воздействия на окружающую среду при выращивании животных k ; y_k - количество животных.

Ограничения по минимальному объему производства товарной растениеводческой продукции на предприятии выглядят так

$$\sum_{i \in I} (1-l_i) p_i x_i + \sum_{i \in I} (1-l'_i) p'_i x'_i \geq S_i, \quad (2)$$

где S_i - минимальный объем производства растениеводческой продукции.

Ограничения по минимальному объему производства животноводческой продукции имеют вид

$$\sum_{k \in K} (1 - \alpha_k) r_k y_k \geq S_k, \quad (3)$$

где S_k - минимальный объем производства животноводческой продукции.

Ограничения по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства записываются так:

$$S_i \geq \sum_{k \in K} h_{ik} y_k \quad (i \in I), \quad (4)$$

где h_{ik} - потребность животных вида k в корме с использованием культуры i .

Ограничения по наличию трудовых ресурсов имеют вид

$$\sum_{i \in I} b_i x_i + \sum_{i \in I} b'_i x'_i + \sum_{k \in K} b_k y_k \leq B, \quad (5)$$

где b_i , b'_i - затраты трудовых ресурсов на обработку 1 га богарных и орошаемых земель, соответственно; b_k - затраты трудовых ресурсов для ухода за животными; B - имеющиеся трудовые ресурсы.

Условия по предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в почве выглядят так:

$$\sum_{i \in I} \varphi_{ij} x_i + \sum_{i \in I} \varphi'_{ij} x'_i + \sum_{i \in I} \nu_{ij} x_i + \sum_{i \in I} \nu'_{ij} x'_i \leq \omega_j \quad (j \in J), \quad (6)$$

где φ_{ij} , φ'_{ij} - исходная концентрация вредного вещества j на богарных и орошаемых землях, соответственно; ν_{ij} , ν'_{ij} - концентрация вредного вещества j , попавшего на богарные и орошаемые земли; ω_j - величина предельно допустимой концентрации вредного вещества j в почве. Показатели φ_{ij} , φ'_{ij} , ν_{ij} и ν'_{ij} являются приведенными к единице площади сельскохозяйственных угодий.

Ограничения на водозабор в реке имеют вид

$$\sum_{i \in I} q_i x'_i \leq T' \xi, \quad (7)$$

где q_i - оросительная норма культуры i ; T' - вегетационный период; ξ - расход воды реки.

Условие по предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в реке записываются в виде

$$\psi_j T' \xi + \mu_j \sum_{i \in I} ((q_i + \lambda) x'_i + \lambda x_i) \leq W_j \quad (j \in J), \quad (8)$$

где ψ_j - исходная концентрация вредного вещества j в реке; μ_j - концентрация вредного вещества j в единице объема возвратных вод хозяйства; λ - осадки, выпадающие за вегетационный период; W_j - заданные величины предельно допустимой концентрации вредного вещества j в реке.

Ограничение на почвенные потери от водной и ветровой эрозии имеет вид:

$$\sum_{i \in I} R U_i D_i V_i C_i P_i x_i + \sum_{i \in I} R U_i D_i V_i C_i P_i x'_i + \sum_{i \in I} M_i T \leq \eta, \quad (9)$$

где η_i - максимальные годовые почвенные потери (т/га); R - эродирующая способность дождей; U_i - фактор податливости почв эрозии (т/га); D_i - фактор длины склона; V_i - фактор крутизны склона; C_i - фактор растительности и севооборота; P_i - фактор эффективности противоэрозионных мероприятий; M_i - интенсивность выноса почвы, т/га в 1 час, T - время, в течение которого почва разрушается, ч.

Интенсивность выноса почвы от ветровой эрозии зависит от скорости ветра и типов почв $M_i = f(v_e)$. На скорость ветра влияют формы рельефа, а также степень защищенности территории лесными полосами. Расчетная скорость ветра v_e (м/с) для определения выноса почвы с участков, имеющих выраженный рельеф местности и защищенных лесными полосами, вычисляется по формуле

$$v_e = v_\phi K_{pm} K_{лп}, \quad (10)$$

где v_ϕ - скорость ветра пыльных бурь, регистрируемая метеостанциями и приведенная к скорости ветра в аэродинамической трубе; K_{pm} - коэффициент изменения скорости ветра с учетом рельефа местности; $K_{лп}$ - коэффициент защищенности территории.

В программном комплексе используется алгоритмическое обеспечение, описанное в работах [2, 7, 9 - 10].

При использовании детерминированных эколого-математических моделей (1) – (10) результатом моделирования является одно оптимальное решение с учетом усредненных коэффициентов при неизвестных в целевой функции и ограничениях.

В моделях с интервальными показателями между нижней и верхней оценками может меняться коэффициент негативного влияния на окружающую среду (1), а также коэффициенты при неизвестных в левых частях ограничений или правые части неравенств. Результатом применения таких моделей является не одно, а множество решений, среди которых выделены верхние и нижние оценки прибыли, получаемой хозяйством и соответствующие им оптимальные планы.

При реализации моделей с вероятностными оценками определяется распределения значений критерия оптимальности и соответствующие им оптимальные планы.

Особенностями данных моделей является учет ущербов от техногенных и природных факторов на окружающую среду. Ущерб от эрозии и загрязнения земельных ресурсов предлагается учитывать с помощью введения в математическую модель коэффициентов негативного воздействия на природную среду. В статье [7] приведена схема последовательных операций по определению коэффициента негативного влияния природных и техногенных факторов на почву и водную среду.

Информационное обеспечение программного комплекса состоит из базы данных и справочника и реализовано в СУБД Microsoft Access 2010. База данных включает в себя информацию об урожайности различных культур, площадях посевов, поголовье животных, а также данные о климатических показателях (скорость ветра и объем осадков) за многолетний

период по муниципальным районам Иркутской области. В справочник входят данные о предельно-допустимых концентрациях вредных веществ в почве и воде, их фоновое содержание, а также материалы о рельефе и почве на различных территориях региона.

Типы показателей описаны в разделе «Методы и состав информации». Источниками данных являются местные министерства природных ресурсов и экологии (МПРиЭ) и сельского хозяйства (МСХ), центр агрохимической службы, Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Иркутское УГМС), предприятия агропромышленного комплекса (АПК) региона, Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области. База данных может периодически дополняться из формализованных таблиц. Большое значение для оценки эрозии почвы имеют картографические материалы.

Реализация программного комплекса для эколого-математического моделирования производства продовольственной продукции. На основании математического, алгоритмического и информационного обеспечения разработан программный комплекс для эколого-математического моделирования производства продовольственной продукции, схема функционирования которого показана на рис. 1.

Программный комплекс решает прикладные задачи с использованием информационного обеспечения.

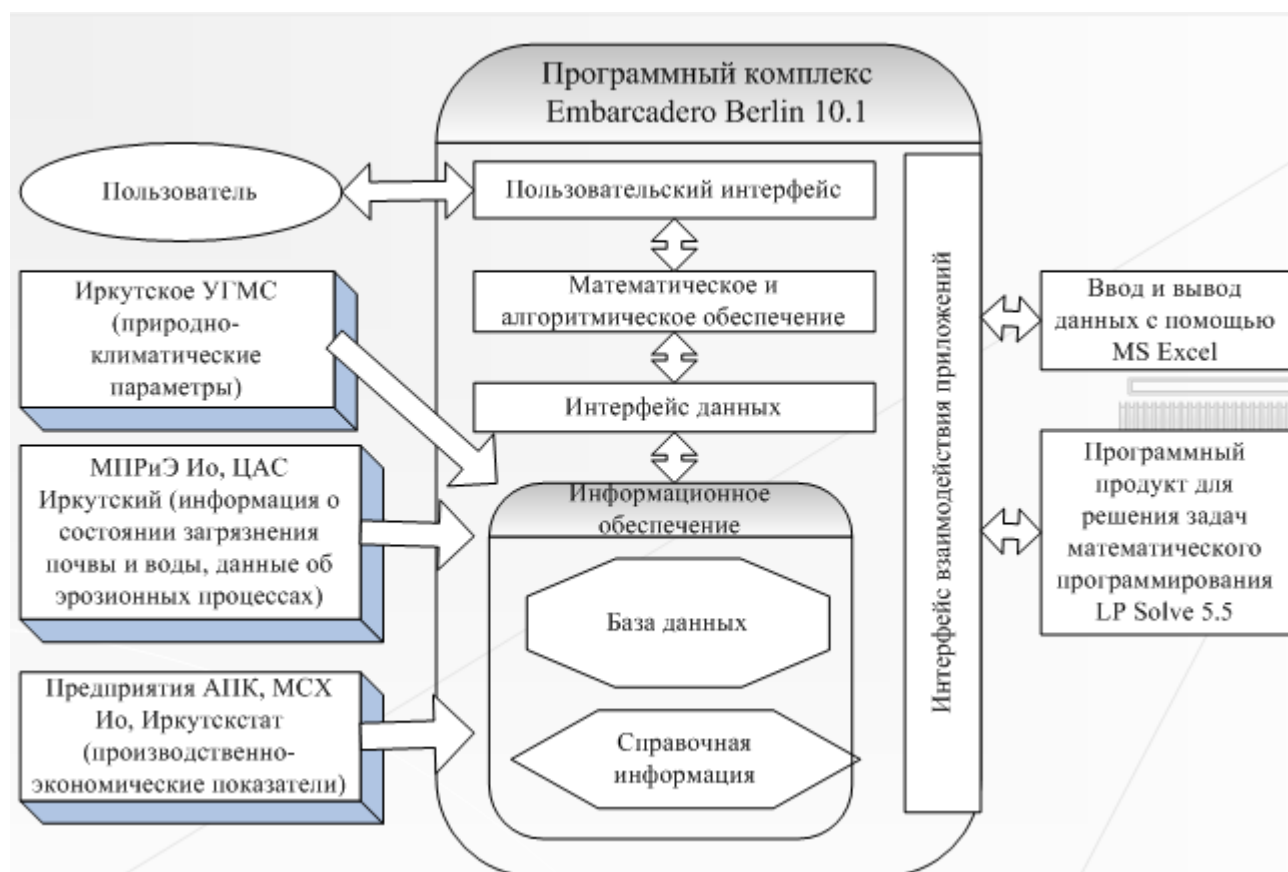


Рис. 1. Схема функционирования программного комплекса для эколого-математического моделирования производства продовольственной продукции

Реализация интерфейса программного комплекса и методов математической статистики осуществлялась при помощи интегрированной среды разработки Embarcadero

Berlin 10.1. Алгоритмическое обеспечение представляет собой разработанные алгоритмы решения эколого-математических задач с использованием имитационного моделирования. Для реализации моделей планирования производства продовольственной продукции применен программный продукт LP Solve 5.5. Результаты статистической обработки данных, решений задач математического программирования и сведения из базы данных можно сохранять в виде таблиц в приложении MS Excel. Кроме того, с помощью программной среды реализованы различные методы оценки статистических параметров, критерии соответствия аналитических законов распределения вероятностей эмпирическим функциям и др.

Интерфейс программного комплекса состоит из трех пунктов меню: «Классификаторы», «Исходная информация» и «Моделирование».

Для работы с сущностями базы данных используется меню «Классификаторы»: Муниципальные образования, Сельскохозяйственные культуры, Животноводство, Загрязнение, Эрозия, Тяжелые металлы.

С помощью меню «Исходная информация» осуществляется дополнение, обновление и удаление сведений в базе данных; просмотр, загрузка их для произведения расчетов (рис. 2). Кроме того, пункт «Импортирование» позволяет перемещать данные из формализованных таблиц приложения MS Excel в базу данных посредством пользовательского интерфейса программного комплекса.

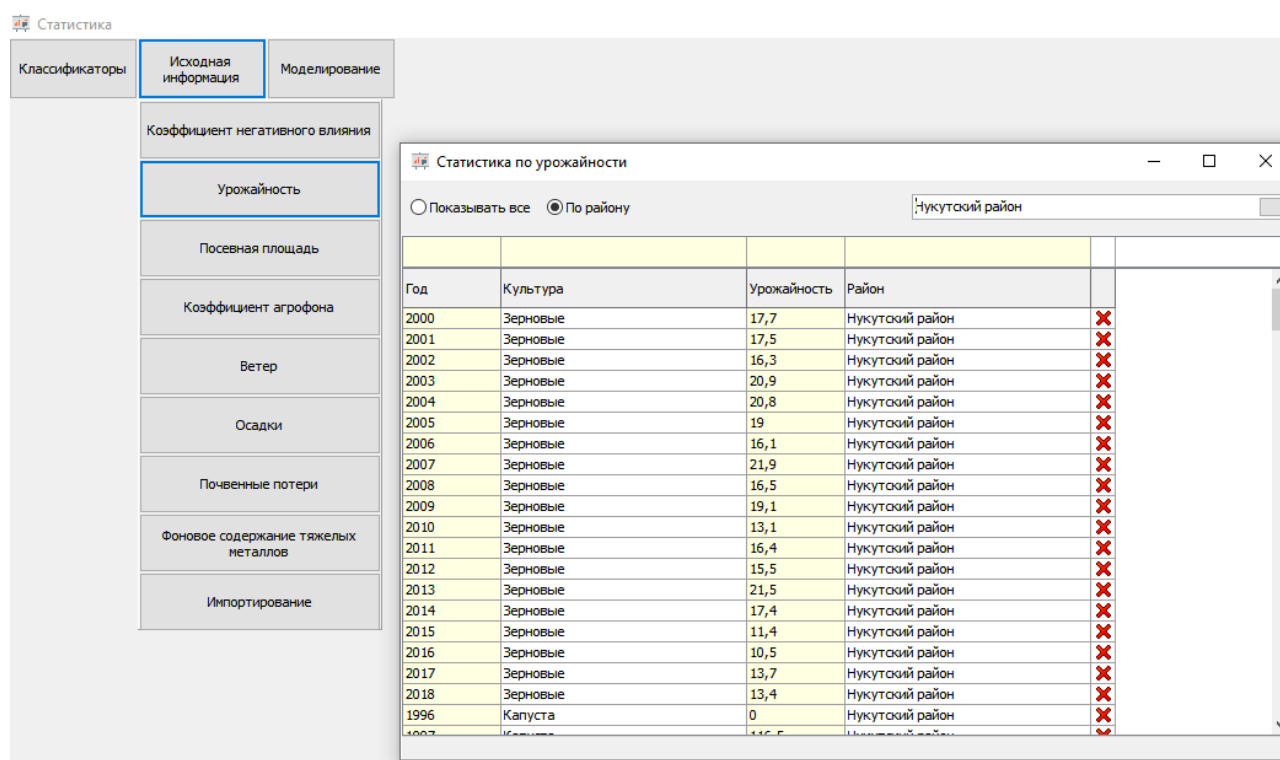


Рис. 2. Окна содержимого базы данных показателей многолетних наблюдений и выбора данных для выполнения расчетов

В меню «Моделирование» можно активизировать два пункта: «Статистические показатели» и «Оптимизация».

С помощью пункта «Статистические показатели» (рис. 3) осуществляется статистическая обработка данных с использованием метода моментов, приближенно максимального правдоподобия, и модифицированного метода моментов, а также подбор закона распределения вероятностей [8].

Показатель	Значение
Среднее	16,7736841001009
Стандартное отклонение	3,32563141164514
Медиана	16,5
Мода	
Стандартная ошибка	0,762952170885562
Дисперсия	11,0598242861208
Максимум	21,8999996185303
Минимум	10,5
Интервал	11,3999996185303
Количество интервалов	6
Размер интервала	2,27999992370605
Сумма	318,699997901916
Счет	19
Коэффициент вариации (Cv)	0,198264817186174
Асимметрия методом моментов (Cs)	-0,203928142766714
Первый коэффициент автокорреляции	0,349345974618772
Коэффициент вариации, с учетом автокорреляции	0,204116776713203
Погрешность коэффициента автокорреляции	0,212935944343201
Критерий Диксона	0,0350876870101021
Критерий Смирнова-Граббса по максимуму(табличный)	2,43500008583069
Критерий Смирнова-Граббса по минимуму(табличный)	2,43500008583069
Критерий Смирнова-Граббса по максимуму(расчетное)	1,54145630826042
Критерий Смирнова-Граббса по минимуму(расчетное)	1,88646404954341

Интервалы	Модульный коэф. К	Частота	m/n, %	Ряд 1
12,7799999237061	0,761907750702733	2	10,5263157894737	10,5263157894737
15,0599998474121	0,897834951316482	3	15,7894736842105	26,3157894736842
17,3399997711182	1,03376215193023	5	26,3157894736842	52,6315789473684
19,6199996948242	1,16968935254398	5	26,3157894736842	78,9473684210526
21,8999996185303	1,30561655315773	3	15,7894736842105	94,7368421052631
24,1799995422363	1,44154375377148	1	5,26315789473684	99,9999999999999

Рис. 3. Окно выбора данных и расчета статистических показателей для многолетних рядов разных показателей

Согласно пункту «Оптимизация» решаются задачи математического программирования для получения оптимальных планов производства продовольственной продукции с учетом негативного влияния на окружающую среду по оценкам показателей, полученных с помощью меню «Статистические показатели».

Пример применения программного комплекса. На рис. 4 приведен фрагмент реализованной эколого-математической модели для СХЗАО «Приморский» Нукутского района с усредненными показателями для сочетания богарного и орошаемого земледелия. В качестве неизвестных в задаче оптимизации производства аграрной продукции использованы площади десяти сельскохозяйственных культур. К ним относятся: зерновые (x_1), рапс (x_2), однолетние травы на сено (x_3) и зеленый корм (x_4), многолетние травы на сено (x_5), зеленый корм (x_6) и семена (x_7), силосные культуры (x_8), кормовая кукуруза (x_9) и кукуруза, подверженной орошению (x_{10}). Кроме того, в моделях использованы пять переменных

отрасли животноводства: поголовье коров основного стада (x_{11}), поголовье коров на откорме (x_{12}), количество лошадей основного стада (x_{13}), количество лошадей на откорме (x_{14}) и количество пчелосемей (x_{15}).

Моделирование производства аграрной продукции с усредненными показателями с помощью программного комплекса позволило получить следующий оптимальный план: $x_1 = 10781,4$ га, $x_2 = 500$ га, $x_3 = 2662,6$ га, $x_4 = 8924,4$ га, $x_5 = 50$ га, $x_6 = 100$ га, $x_7 = 500$ га, $x_8 = 1263,9$ га, $x_9 = 502,2$ га, $x_{10} = 320$ га, $x_{11} = 4898$ голов, $x_{12} = 1000$ голов, $x_{13} = 96$ голов, $x_{14} = 91$ голов, $x_{15} = 580$ семей.

Оптимизация

Файл Выход

Целевая функция Ограничения

Размерность задачи: 15 Количество решений: 1 Итераций для поиска вероятностного значения: 10 Район: Нукутский район

Поиск решения: ☒ Максимум ☐ Минимум Задача Детерминированная

Целевая функция

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
1049	912	587	140	41	238	232	183	1125

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зерновые	Ряпс	Однолетние...	Однолетние...	Многолетни...	Многолетни...	Многолетни...	Силосные к...	Кукуруза на
0,2093	0,1938	0,1938	0,1938	0,0248	0,0248	0,0248	0,1938	0,2015

Найти решение 1 Сжать результаты

Результат График

Решение

X14	X15	Ущерб	Значение целевой функции
91	580	3471265,671	22136686,94926

Рис. 4. Окно определения оптимального решения задачи эколого-математического моделирования продовольственной продукции с учетом ущерба от негативного влияния на окружающую среду

При этом получена максимальная прибыль от производства аграрной продукции, равная 22 136,7 тыс. руб., а ущербы окружающей среде составили 3 471,3 тыс. руб.

Для использования программного комплекса необходим компьютер, на котором установлено указанное программное обеспечение.

Заключение. В статье описана разработка программного комплекса эколого-математического моделирования производства продовольственной продукции, включая математическое и информационное обеспечение.

Программный комплекс эколого-математического моделирования аграрного производства позволяет оптимизировать структуру производства, учитывая при этом ущербы окружающей среде. Если в качестве целевой функции использовать минимум

ущербов, то можно получить оптимальный план производства, при этом сводя к минимуму ущербы от техногенного и природного воздействия. Программный комплекс предназначен для управленческого персонала разных категорий предприятий – сельскохозяйственные организации, крестьянские (фермерские) хозяйства.

Рассмотрены разработанные варианты моделей с учетом неопределенности параметра, техногенных и природных воздействий на окружающую среду, отрасли аграрного производства и содержания критерия оптимальности, а также алгоритмы их реализации.

Приведен пример реализации с помощью программного комплекса эколого-математической модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции для предприятия Нукутского района.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов : пер. с англ. М.: Мир, 1976. 356 с. [T. W. Anderson. Statistical analysis of time series]. Wiley, New York. 1971. 378 p.
2. Бендик Н.В., Иваньо Я.М., Ковалева Е.А. Эколого-математические модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. 2016. № 4. С. 66-74.
3. Волков С. Н. Землеустройство. Т. 2. Землеустроительное проектирование. Внутрихозяйственное землеустройство. М.: Колос. 2001. 648 с.
4. Гагарина Л. Г. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем. М.: ФОРУМ : ИНФРА-М. 2013. 384 с.
5. Гриневич Г. А., Петелина Н. А., Гриневич А. Г. Композитное моделирование гидрографов. М.: Наука. 1972. 182 с.
6. ГОСТ 17.4.4.03-86: Метод определения потенциальной опасности эрозии под воздействием дождей. Режим доступа: <http://tehnorma.ru/normativbase/21/21112/index.htm>. (дата обращения 05.03.2020).
7. Иваньо Я.М., Ковалева Е.А. Коэффициенты негативного влияния на окружающую среду в эколого-математическом моделировании аграрного производства // Научные достижения производству : материалы науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИрГАУ. 2020. С. 153-160.
8. Иваньо Я.М., Петрова С.А. Оптимизационные модели аграрного производства в решении задач оценки природных и техногенных рисков. Монография / Иркутск: Изд-во Иркутского ГАУ. 2015. 180 с.
9. Иваньо Я.М., Хогоева Е.А. Региональные экономико-математические модели аграрного производства с интервальными природными и производственно-экологическими параметрами // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2013. Выпуск № 6 (92). С. 138-143.
10. Иваньо Я.М., Хогоева Е.А. Региональные модели аграрного производства с учетом техногенных загрязнений // Труды XVIII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть II. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2013. С. 219-224.

11. Кириллук В.С. Меры риска в задачах стохастической оптимизации для получения робастных решений // Стохастическое программирование и его приложения. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. 2012. С. 104 – 124.
12. Кнопов П.С. Метод эмпирических средних в задачах стохастической оптимизации и оценивания // Стохастическое программирование и его приложения. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. 2012. С. 125 – 149.
13. Кузьменко В.Н. Решение двухэтапных задач стохастического программирования большой размерности РНК-методом // Стохастическое программирование и его приложения. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. 2012. С. 150 – 159.
14. Липаев В. В. Программная инженерия. Методологические основы : учеб. М.: ТЕИС. 2006. 608 с.
15. Смирнова Г. Н., Сорокин А. А., Тельнов Ю. Ф. Проектирование экономических информационных систем / под общ. ред. Ю. Ф. Тельнова. М.: Финансы и статистика. 2003. 512 с.
16. Статистическое моделирование и прогнозирование : под. ред. А. Г. Гранберга. М.: Финансы и статистика. 1990. 383 с.
17. Хастингс, Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям. М.: Статистика. 1980. 95 с.
18. Юзбасиев М. М, Манелл А. М. Статистический анализ тенденций и колеблемости. М.: Финансы и статистика. 1998. 207 с.

UDK 519.688

SOFTWARE COMPLEX FOR ECOLOGICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Eugenia A. Kovaleva

Post-graduate student of the Department of Informatics and Mathematical Modeling,

e-mail: zhenia-93com@ya.ru

Yaroslav M. Ivanyo

Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research

e-mail: pnr@igsha.ru

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,

664038, Irkutsk district, n Molodezhny, 1/1

Abstract. The software package “Ecological and mathematical modeling of food production” with special mathematical and algorithmic support is described. A particular ecological and mathematical model of optimizing agricultural production on rainfed and irrigated lands with averaged indicators is presented. Algorithmic support is briefly described. The software package contains a database of time series of industrial, economic, climatic and agricultural pollution and degradation indicators. Information support also includes the “Directory”, which contains regulatory data on soil and water pollution. The user interface is considered. The user interface is considered. Using a

software package, an ecological-mathematical model for optimizing agricultural production for one of the enterprises in the Irkutsk region was implemented.

Key words: software package, ecological and mathematical model, optimization, agricultural production.

References

1. Anderson T. Statisticheskij analiz vremennyh ryadov [Statistical analysis of time series]: translation from English. Moscow. Mir = World. 1976. 356 p. (in Russian).
2. Bendik N.V., Ivan'o Ya.M., Kovaleva E.A. Ekologo-matematicheskie modeli optimizacii proizvodstva sel'skohozyajstvennoj produkcii [Ecological and mathematical models of optimization of agricultural production] // Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin Of Irkutsk State Technical University. 2016. № 4. Pp. 66-74. (in Russian).
3. Volkov S. N. Zemleustrojstvo. T. 2. Zemleustroitel'noe proektirovanie. Vnutrihozyajstvennoe zemleustrojstvo [Land management. T. 2. Land management design. On-farm land management]. Moscow. Kolos = Spike. 2001. 648 p. (in Russian).
4. Gagarina L. G. Razrabotka i ekspluatatsiya avtomatizirovannyh informacionnyh system [Development and operation of automated information systems]. Moscow. Forum : Infra-M = Forum : Infra-M. 2013. 384 p. (in Russian).
5. Grinevich G. A., Petelina N. A., Grinevich A. G. Kompozitnoe modelirovanie gidrografov [Composite modeling of hydrographs]. Moscow. Nauka = Science. 1972. 182 p. (in Russian).
6. GOST 17.4.4.03-86: Metod opredeleniya potencial'noj opasnosti erozii pod vozdejstviem dozhdej [Method for determining the potential hazard of erosion from rainfall]. Available at: <http://tehnorma.ru/normativbase/21/21112/index.htm>. (accessed: 05.03.2020). (in Russian).
7. Ivanyo Ya., Kovaleva E. Koeffitsienty negativnogo vliyaniya na okruzhayushchuyu sredu v ekologo-matematicheskom modelirovanii agrarnogo proizvodstva [Coefficients of negative influence on the environment in ecological and mathematical modeling of agricultural production] // Nauchnye dostizheniya proizvodstvu : materialy nauch.-prakt. konf. molodyh uchenyh s mezhdunar. uchastiem = Scientific achievements of Russia: materials of scientific and practical Conf. of young scientists from international conferences. participation. Irkutsk. Izd-vo IrGAU = Publishing House Of IrGAU. 2020. Pp. 153-160. (in Russian).
8. Ivanyo Ya., Petrova S. Optimizacionnye modeli agrarnogo proizvodstva v reshenii zadach ochenki prirodnyh i tekhnogennyh riskov [Optimization models of agricultural production in solving problems of assessing natural and man-made risks]. Monograph / Izd-vo IrGAU = Publishing House Of IrGAU. 2015. 180 p. (in Russian).
9. Ivan'o Ya.M., Hogueva E.A. Regional'nye ekonomiko-matematicheskie modeli agrarnogo proizvodstva s interval'nymi prirodnymi i proizvodstvenno-ekologicheskimi parametrami [Regional economic and mathematical models of agricultural production with interval natural and production and environmental parameters] // Izvestiya Irkutskoj

- gosudarstvennoj ekonomicheskoy akademii = Proceedings of the Irkutsk state Academy of Economics. 2013. Vypusk № 6 (92). Pp. 138-143. (in Russian).
10. Ivan'o Ya.M., Hogueva E.A. Regional'nye modeli agrarnogo proizvodstva s uchetom tekhnogennyh zagryaznenij [Regional models of agricultural production taking into account technogenic pollution] // Trudy XVIII Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii «Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii». T. II = XVIII Baikal International Conference "Information and mathematical technologies in science and management: proceeding". T. 2. Irkutsk. MESI SO RAN. 2013. Pp. 219-224. (in Russian).
 11. Kirilyuk V.S. Mery riska v zadachah stohasticheskoy optimizacii dlya polucheniya robustnyh reshenij [Risk measures in stochastic optimization problems for obtaining robust solutions] // Stohasticheskoe programmirovaniye i ego prilozheniya = Stochastic programming and its applications Irkutsk. MESI SO RAN. 2012. Pp. 104 – 124. (in Russian).
 12. Knopov P.S. Metod empiricheskikh srednih v zadachah stohasticheskoy optimizacii i ocenivaniya [The method of empirical averages in stochastic optimization and estimation problems] // Stohasticheskoe programmirovaniye i ego prilozheniya = Stochastic programming and its applications Irkutsk. MESI SO RAN. 2012. Pp. 125 – 149. (in Russian).
 13. Kuz'menko V.N. Reshenie dvuhetapnyh zadach stohasticheskogo programmirovaniya bol'shoj razmernosti PNK-metodom [Solving two-stage large-dimensional stochastic programming problems using the PNK method] // Stohasticheskoe programmirovaniye i ego prilozheniya = Stochastic programming and its applications Irkutsk. MESI SO RAN. 2012. Pp. 150 – 159. (in Russian).
 14. Lipaev V. V. Programmnaya inzheneriya. Metodologicheskie osnovy [Software engineering. Methodological basis]. Moscow. Teis = Theis. 2006. 608 p. (in Russian).
 15. Smirnova G. N., Sorokin A. A., Tel'nov Yu. F. Proektirovaniye ekonomicheskikh informacionnyh system [Design of economic information systems] / pod. red. YU. F. Tel'nova. Moscow. Finansy i statistika = Finance and statistics. 2003. 512 p. (in Russian).
 16. Statisticheskoe modelirovaniye i prognozirovaniye [Statistical modeling and forecasting]: pod. red. A. G. Granberga. Moscow. Finansy i statistika = Finance and statistics. 1990. 383 p. (in Russian).
 17. Hastings, N.. Pikok Dzh. Spravochnik po statisticheskim raspredeleniyam [Handbook of statistical distributions]. Moscow. Statistika = Statistics. 1980. 95 p. (in Russian).
 18. Yuzbasiev M. M, Manell A. M. Statisticheskij analiz tendencij i koleblemosti [Statistical analysis of trends and fluctuations]. Moscow. Finansy i statistika = Finance and statistics. 1998. 207 p. (in Russian).

УДК 620.9

ИНДИКАТИВНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Зорина Татьяна Геннадьевна,

доктор экономических наук, доцент, зав. сектором «Экономика энергетики»,

email: tanyazorina@tut.by,

Попов Борис Игоревич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,

e-mail: biropovby@gmail.com,

Институт энергетики НАН Беларуси

г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются существующая методика оценки энергетической безопасности в Республике Беларусь, применение индикативного подхода для оценки энергобезопасности, производится расчет интегрального показателя энергетической безопасности Республики Беларусь с использованием индикативного подхода.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, оценка, методика, индикатор, интегральный показатель, индикативный подход.

Цитирование: Зорина Т. Г., Попов Б.И.. Индикативный подход к оценке энергетической безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 107 – 123. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.009.

Введение. До создания Концепции энергетической безопасности основным направлением формирования стратегии развития энергетики был метод приведенных затрат. Однако он позволял производить оценку только экономической эффективности решения, но не степень его комплексного влияния на уровень энергетической безопасности страны.

С 2005 года главным документом, определяющим стратегию развития энергетики Республики Беларусь на долгосрочную перспективу, стала Концепция энергетической безопасности, в которой основное внимание уделяется технологическим показателям функционирования энергосистемы. Первый (2005 г.) и второй (2007 г.) варианты Концепции были утверждены указами Президента Республики Беларусь и определяли основные прогнозные показатели развития энергосистемы страны до 2020 года. В декабре 2015 года на этот раз уже Правительством был утвержден третий вариант Концепции на период до 2035 года.

Под энергетической безопасностью согласно Концепции понимается состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии экономически доступными энергетическими ресурсами приемлемого качества, от угроз нарушения бесперебойности энергоснабжения [3, 6].

Существующий подход к оценке энергетической безопасности Республики Беларусь. В Концепции энергобезопасности Республики Беларусь, принятой в 2015 г., состояние энергетической безопасности оценивается системой из 11-ти индикаторов, сгруппированных в 4 блока. Методология оценки состояния энергобезопасности состоит в сравнении фактических значений индикаторов по годам с «пороговыми» значениями. В табл.1 можно

Таблица 1. Плановые и фактические значения индикаторов энергетической безопасности Республики Беларусь

Индикатор	Пороговые уровни		Значения индикаторов по годам											
			2010	2015	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2035	
	Н	К	факт	план	факт	факт	факт	факт	факт	план	план	план	план	
Энергетическая самостоятельность														
Отношение объема производства (добычи) первичной энергии к валовому потреблению ТЭР, %	30	16	14	14	14	15	15	15	16	16	17	18	20	
			К	К	К	К	К	К	К	К	ПК	ПК	ПК	
Отношение объема производства (добычи) первичной энергии из возобновляемых источников к валовому потреблению ТЭР, %	14	5	5	5	5	5,7	6,2	6	6,7	6	7	8	9	
			К	К	К	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК
Диверсификация поставщиков и видов энергоресурсов														
Доля доминирующего поставщика энергоресурсов в общем импорте ТЭР, %	65	85	96	90	90	99	99	99,6	99,3	85	80	75	70	
			К	К	К	К	К	К	К	К	К	ПК	ПК	ПК
Доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР, %	50	70	64	60	60	61,4	61	61	61,8	57	55	52	50	
			ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	Н
Надежность поставок, резервирование, переработка и распределение ТЭР														
Отношение суммарной установленной мощности электростанций к максимальной фактической нагрузке в энергосистеме (резервирование), %	140	95	127	160	160	175	176	176	169	160	155	150	145	
			ПК	ПК	ПК	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
Удельный вес накопленной амортизации в первоначальной стоимости основных средств организаций ТЭК, %	45	75	48	46	46	44	46	46	45	43	<45	<45	<45	
			ПК	ПК	ПК	Н	ПК	ПК	ПК	ПК	Н	Н	Н	Н
Отношение объема инвестиций в основной капитал, вложенных в развитие ТЭК, к первоначальной стоимости основных средств организаций ТЭК, %	6	4	7,3	7	7	3,7	7	7	7	7	6,5	6,5	6,5	
			Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
Доля доминирующего энергоресурса (газа) в производстве тепловой и электрической энергии, %	50	80	91,4	90	90	97	90	90	98	70	60	50	<50	
			К	К	К	К	К	К	К	К	ПК	ПК	Н	Н
Отношение среднесуточного количества нарушений электроснабжения населенных пунктов за год к общему количеству населенных пунктов, %	0,5	2	0,3	<0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	
			Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
Энергетическая эффективность конечного потребления ТЭР и экономическая устойчивость ТЭК Беларуси														
Энергоемкость ВВП (в ценах 2005 г.), млрд /млн. руб.	160	485	426	378	378	375	376	309	346	370	353	317	268	
			ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК
Отношение стоимости импорта энергетических товаров к ВВП, %	15	30	21,7	20	20	15	15	14	15,4	19	18	17	15	
			ПК	ПК	ПК	Н	Н	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК

увидеть плановые (согласно Концепции энергобезопасности Республики Беларусь) и фактические значения индикаторов энергетической безопасности [3, 4, 7].

Так можно видеть из данных, представленных в таблице 1, отдельные индикаторы уже в 2018-2019 гг. достигли планового значения 2020 г. Это показатели блоков «Энергетическая самостоятельность», «Надежность поставок, резервирование, переработка и распределение ТЭР» и «Энергетическая эффективность конечного потребления ТЭР и экономическая устойчивость ТЭК Беларуси».

Методология расчета интегрального показателя энергетической безопасности.

Одной из последних тенденций в области оценки сложных систем является использование интегральных индексов, позволяющих охарактеризовать состояние и/или устойчивость развития системы [1, 2, 12, 18]. Неудовлетворительное значение какого-либо индикатора или области оценки системы может быть скомпенсировано приемлемым значением других областей или индикаторов, что отразится в значении интегрального индекса. Аналогичный подход может быть использован для оценки энергобезопасности системы одним комплексным показателем. На основе существующих показателей можно разработать интегральный показатель, значение которого опишет энергосистему комплексно, с разных сторон.

Было проведено исследование методологии многокритериального анализа и сделаны следующие выводы:

- Многие научно-практические задачи управленческо-экономического характера решаются современными методами, основанными на многокритериальном анализе решений (МКАР; Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) [8-11, 13-17, 19].
- Методы МКАР можно применить к временному ряду состояний развивающейся системы.
- Оценка энергетической безопасности страны может рассматриваться как решение задачи анализа системы, характеризуемой многими критериями или, иначе, факторами или индикаторами. Изменение этих индикаторов будет приводить к развитию состояния системы – энергетической безопасности – во времени.

Реализация методов МКАР, включающих использование многофакторной теории ценности, в применении к задаче оценки энергетической безопасности будет представлять собой определенную процедуру, основу которой составляет построенное по иерархическому принципу дерево целей или, в терминах задачи оценки энергобезопасности, дерево индикаторов, изображенное на рисунке 1. Дерево целей/индикаторов позволяет структурировать поставленную многокритериальную задачу по иерархическому принципу. На рисунке 1 наивысшим уровнем иерархии является общая оценка энергобезопасности. Следующим уровнем иерархии является количество специфических областей, равное 3, по которым производится общая оценка. Низшим уровнем иерархии является набор выраженных в натуральных единицах индикаторов, количество которых в первой области равно 2, во второй области – 4 и в третьей – 3.

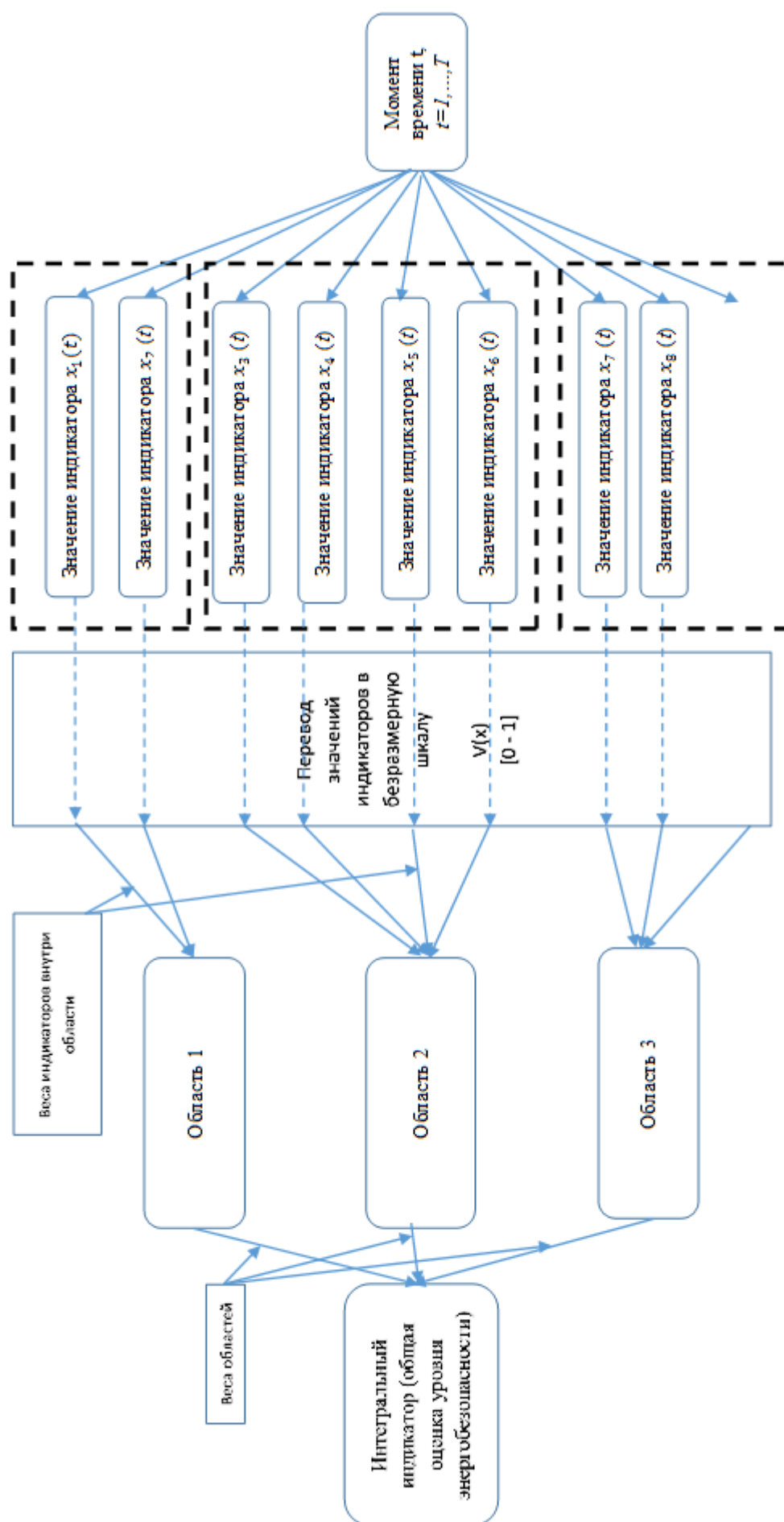


Рис. 1. Дерево целей/индикаторов

Индикаторы системы представляют собой показатели системы, выраженные в различных натуральных единицах для рассматриваемых моментов времени. Поэтому следующим шагом процедуры в соответствии с многофакторной теорией ценности является перевод этих единиц в безразмерную шкалу в едином интервале, например, $[0 - 1]$, с помощью так называемых однофакторных функций ценности для каждого индикатора $V_j(x_j)$. Далее именно эти функции используются для представления того или иного индикатора. Помимо преобразования индикаторов в безразмерную шкалу, однофакторные функции ценности должны иметь вид, позволяющий ответить на вопрос: «Что «хорошо» и что «плохо» для исследуемой системы при изменении данного индикатора?». Другими словами, что благоприятно сказывается на исследуемой системе: увеличение или уменьшение величины индикатора? В зависимости от этого используются возрастающие в первом случае (увеличение индикатора благоприятно для системы) или убывающие во втором случае однофакторные функции ценности.

В таблице 2 представлены примеры однофакторных функций ценности.

Таблица 2. Примеры однофакторной функции ценности

Тип	Возрастающая функции ценности	Убывающая функции ценности
Линейная	$V(x) = \frac{x - x^{\min}}{x^{\max} - x^{\min}}$	$V(x) = \frac{x^{\max} - x}{x^{\max} - x^{\min}}$
Полиномиальная	$V(x) = \left(\frac{x - x^{\min}}{x^{\max} - x^{\min}} \right)^a$	$V(x) = \left(\frac{x^{\max} - x}{x^{\max} - x^{\min}} \right)^a$
Экспоненциальная	$V(x) = \frac{1 - \exp\left(a \cdot \frac{x - x^{\min}}{x^{\max} - x^{\min}}\right)}{1 - \exp(a)}$	$V(x) = \frac{1 - \exp\left(a \cdot \frac{x^{\max} - x}{x^{\max} - x^{\min}}\right)}{1 - \exp(a)}$
Логарифмическая	$V(x) = \frac{\ln\left(a \cdot \frac{x - x^{\min}}{x^{\max} - x^{\min}} + 1\right)}{\ln(a + 1)}$	$V(x) = \frac{\ln\left(a \cdot \frac{x^{\max} - x}{x^{\max} - x^{\min}} + 1\right)}{\ln(a + 1)}$

В таблице 2 $x^{\min}$ и $x^{\max}$ – минимальное и максимальное значения индикатора. На рисунках 2 и 3 примеры однофакторных функций ценности представлены в графическом виде при $x^{\min} = 1$, $x^{\max} = 5$ и параметра $a = 3$. Наиболее часто используются линейные однофакторные функции. Использование параметра a в однофакторных функциях более сложного вида позволяет учесть различную чувствительность системы к изменению исследуемого индикатора в разных областях его значений.

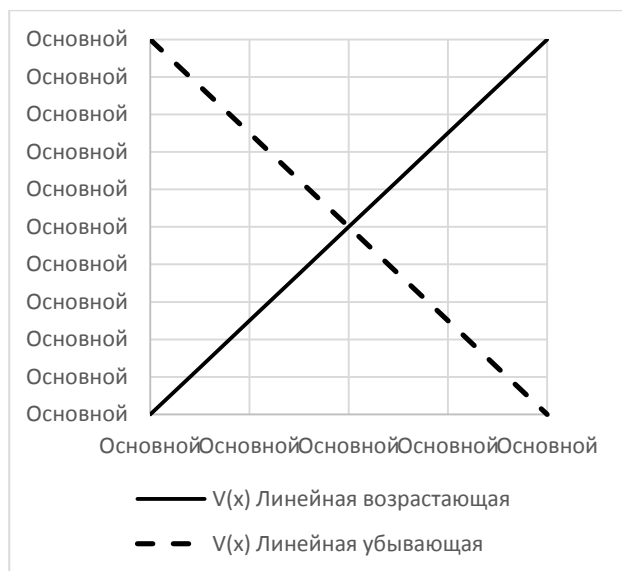


Рис. 2. Линейная однофакторная функция

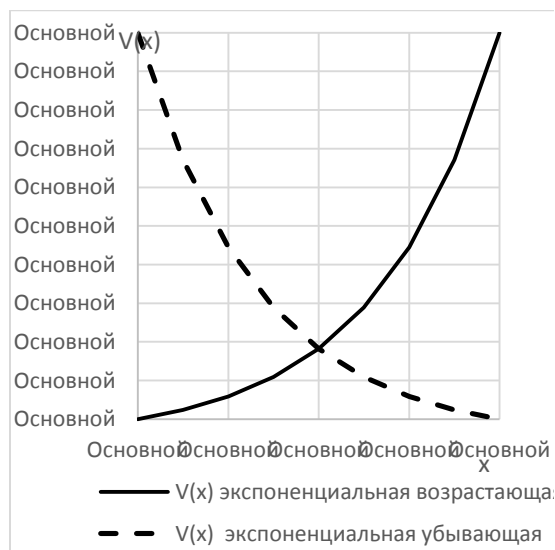


Рис. 3 Экспоненциальная однофакторная функция

Выбор однофакторных функций является не формализуемым этапом процедуры и нуждается в проведении анализа чувствительности результатов оценки к виду этих функций.

Однофакторные функции свертываются далее в многофакторную функцию ценности, как это показано на рисунке 4. На рисунке 4 k_j – весовые коэффициенты, с которыми взвешиваются однофакторные функции, чтобы получить многофакторную функцию. Многофакторная функция и будет тем интегральным индексом, который представляет состояние системы.

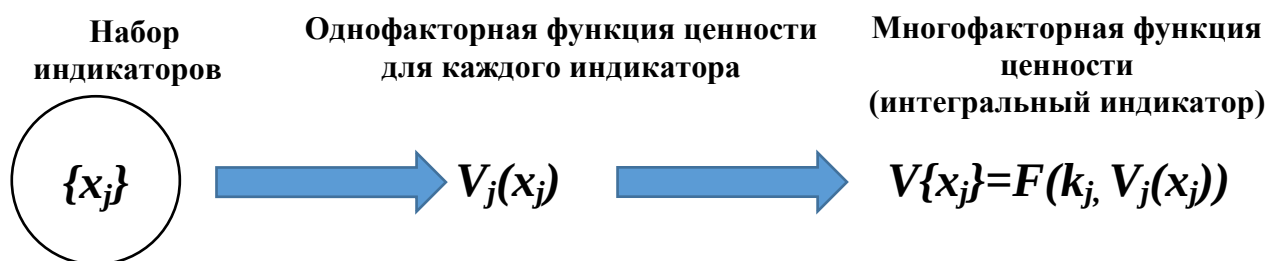


Рис. 4. Многофакторная функция ценности

Хотя общий вид многофакторной функции ценности более сложен, на практике чаще всего используют простую аддитивную форму функции:

$$V\{x_j\} = \sum_{j=1}^n k_j V_j(x_j); \quad \sum_{j=1}^n k_j = 1. \quad (1)$$

В выражении (1) k_j – веса индикаторов, нормированные на 1 (хотя возможна и другая нормировка, например, 100), k_j в соответствии со схемой процедуры:

$$k_j = k_j^i k^i \quad (2)$$

где k_j^i – вес индикатора j в области i , нормированный на 1 по соответствующим j , а k^i – вес области i в интегральном индикаторе, также нормированный на 1.

Аддитивность интегрального индекса позволяет представить его как сумму индексов по отдельным областям оценки. Далее для простоты будем обозначать как $V(x)$. Для рассмотренного выше примера с тремя областями:

$$V(x) = V_1(x) + V_2(x) + V_3(x) \\ V_1(x) = \sum_{j=1}^2 k_j V_j(x_j); \quad V_2(x) = \sum_{j=3}^6 k_j V_j(x_j); \quad V_3(x) = \sum_{j=7}^9 k_j V_j(x_j), \quad (3)$$

где $V_1(x)$, $V_2(x)$, $V_3(x)$ – вклады индексов соответствующих областей в интегральный индекс.

Определение весовых коэффициентов для свертки однофакторных функций ценности является наиболее ответственным этапом расчета интегрального индикатора. В настоящее время существуют различные алгоритмы определения весов индикаторов:

- прямой метод: веса для всех индикаторов указываются напрямую;
- метод ранжирования: при ранжированном взвешивании указываются ранги для индикаторов; самый важный индикатор имеет ранг 1;
- метод рейтинга: для каждого индикатора определяются рейтинговые баллы; самому важному показателю присваивается рейтинг в 100 баллов, а затем все остальные индикаторы соотносятся с наиболее важным;
- метод парных сравнений: в качестве метода взвешивания используется парное сравнение индикаторов по важности (этот метод применяется, например, при расчете интегрального индикатора устойчивого развития);
- метод свинга: метод позволяет учитывать колебания шкал индикаторов и соответствующей относительной важности.

Расчет интегрального показателя энергетической безопасности Республики Беларусь. Для демонстрации предлагаемого подхода к оценке энергетической безопасности в данном разделе приведены результаты расчета интегрального индикатора и индикаторов по областям оценки для системы детальных индикаторов из Концепции энергобезопасности 2015. Также проведена оценка чувствительности результатов к изменению весов областей и индикаторов внутри областей.

В таблице 3 приведены характеристики, необходимые для расчета. Минимальные и максимальные значения индикаторов приняты на основе эмпирических данных, используя статистическую информацию по Республике Беларусь в период 1995-2019 гг.

Для базового расчета приняты одинаковые веса для областей оценки и индикаторов внутри каждой области, хотя как результат определения весов одним из вышеописанных методов или предпочтений лица, принимающего решения, эти веса могут различаться. Диапазон изменения значений индикаторов принят на основе фактических данных 2010 – 2018 гг. В качестве однофакторных функций ценности приняты линейные функции восходящего или нисходящего характера в зависимости от смысла соответствующего индикатора. Следует, однако, отметить, что для индикатора «И5: Отношение суммарной установленной мощности электростанций к максимальной фактической нагрузке в энергосистеме (резервирование)» определение области для восходящей функции нуждается в уточнении, поскольку повышение величины резерва после определенного значения будет отрицательно сказываться на экономичности системы как одной из аспектов энергетической безопасности.

Таблица 3. Характеристики расчета интегрального индекса

Блок	Вес блока	Индикатор	Вес индикатора в блоке	Вес индикатора	Минимум индикатора	Максимум индикатора	Функция ценности
Б1. Энергетическая самостоятельность	0,25	И1: Отношение объема производства (добычи) первичной энергии к валовому потреблению ТЭР	0,5	0,125	13	17	Линейная восходящая
		И2: Отношение объема производства (добычи) первичной энергии из возобновляемых источников энергии к валовому потреблению ТЭР	0,5	0,125	4	7	Линейная восходящая
		И3: Доля доминирующего поставщика энергоресурсов в общем импорте ТЭР	0,5	0,125	80	100	Линейная нисходящая
Б2. Диверсификация поставщиков и видов энергоресурсов	0,25	И4: Доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР	0,5	0,125	50	70	Линейная нисходящая
		И5: Отношение суммарной установленной мощности электростанций к максимальной фактической нагрузке в энергосистеме (резервирование)	0,2	0,05	120	180	Линейная восходящая
Б3. Надежность поставок, резервирование, переработка и распределение ТЭР	0,25	И6: Удельный вес накопленной амортизации в первоначальной стоимости основных средств организаций ТЭК	0,2	0,05	40	50	Линейная восходящая
		И7: Отношение объема инвестиций в основной капитал, вложенных в развитие ТЭК, к первоначальной стоимости основных средств организаций ТЭК	0,2	0,05	3	8	Линейная восходящая
		И8: Доля доминирующего энергоресурса (газа) в производстве тепловой и электрической энергии	0,2	0,05	85	100	Линейная нисходящая
Б4. Энергетическая эффективность конечного потребления ТЭР и экономическая устойчивость ТЭК	0,25	И9: Отношение среднесуточного количества нарушений электроснабжения населенных пунктов за год к общему количеству населенных пунктов	0,2	0,05	0,3	1,0	Линейная нисходящая
		И10: Энергоемкость ВВП (в ценах 2005 года)	0,5	0,125	300	485	Линейная нисходящая
		И11: Отношение стоимости импорта энергетических товаров к ВВП, %	0,5	0,125	13	22	Линейная нисходящая
Σ			Σ	1,000			

Результаты расчета интегрального индикатора и его составляющих по областям оценки показаны на диаграмме рисунка 5. Из него видно, что в целом энергобезопасность республики за рассмотренный период времени возрастает.

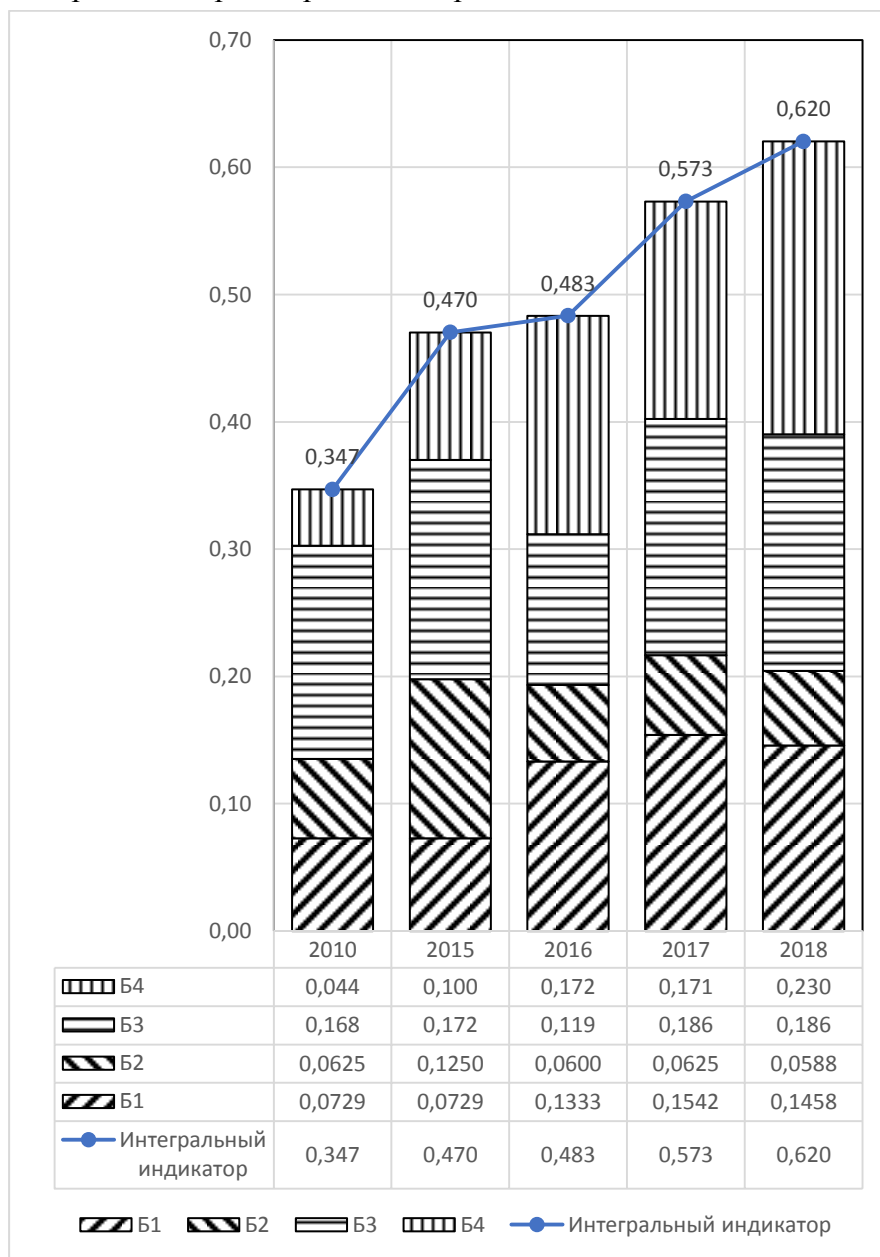


Рис. 5. Интегральный индикатор энергобезопасности и его составляющие

Результаты подтверждают то, что было сказано выше: отдельные области оценки могут приводить к снижению энергобезопасности, но могут быть скомпенсированы более значительным улучшением индикаторов других областей (рисунки 6, 7). Так, в 2016 г. по сравнению с 2015 г. ухудшились показатели энергобезопасности во 2-й и 3-й областях оценки, но это отрицательное влияние было скомпенсировано, хотя и с небольшим избытком, повышением энергобезопасности в 1-й и 4-й областях оценки. Причины ухудшения показателей в некоторых аспектах энергобезопасности в 2016 г.: резко ухудшился индикатор Блока 2 «ИЗ: Доля доминирующего поставщика энергоресурсов в общем импорте ТЭР», достигнув в 2018 г. без малого 100 %.

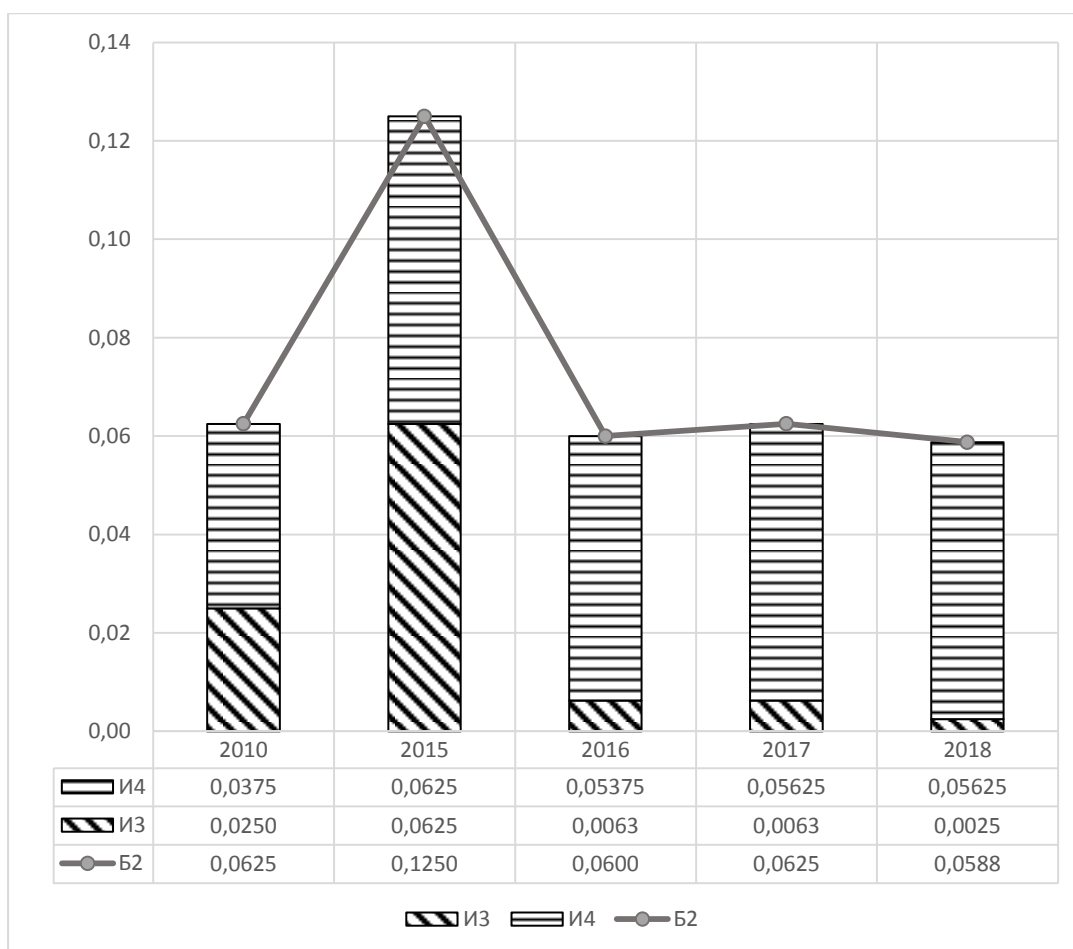


Рис. 6. Индикаторы энергобезопасности Блока 2

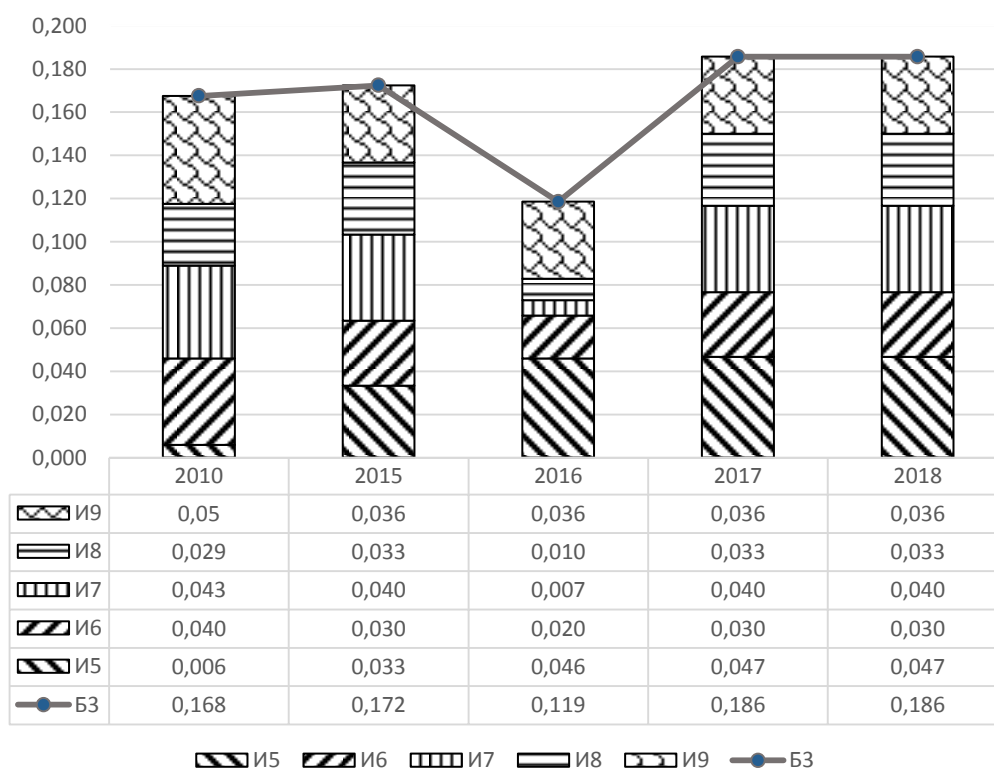


Рис. 7. Индикаторы энергобезопасности Блока 3

Анализ чувствительности результатов к изменению весов индикаторов внутри блоков. Как указывалось ранее, анализ чувствительности является необходимым элементом оценки состояния системы по изложенной выше методологии.

Исследование показало, что чувствительность величин, как индикаторов отдельных блоков, так и интегрального индикатора, к довольно существенным вариациям индикаторов внутри блоков ($\pm 20\%$) относительно невысока, за исключением индикатора Блока 4, который изменяется в 2010 – 2015 гг. в пределах 9 – 16 %. Однако вклад данного блока в интегральный индикатор невелик, поэтому интегральный индикатор изменяется незначительно. Практически не изменяется, как видно из рисунка 8, и качественный характер оценки общего уровня энергобезопасности.

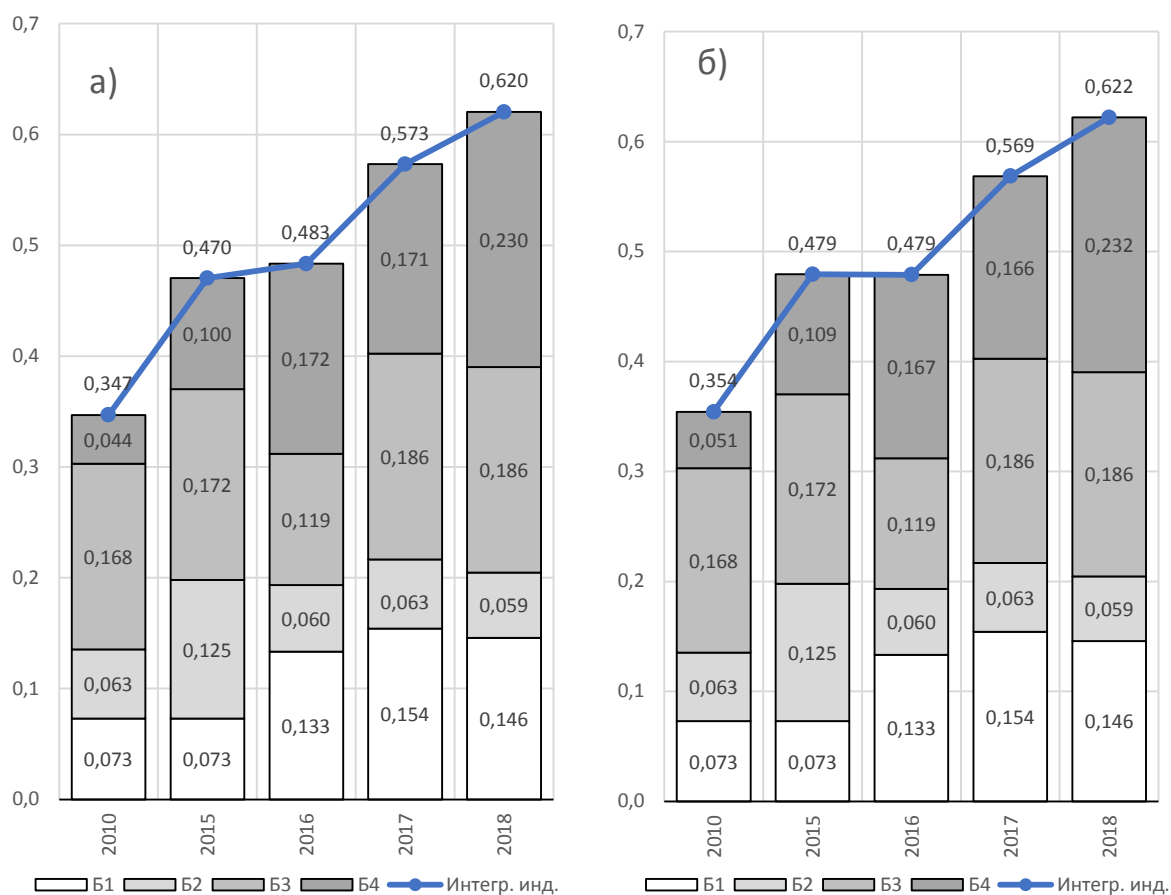


Рис. 8. Сравнение базового расчета интегрального индикатора (а) и расчета при вариации индикаторов И10 и И11 Блока 4 в размере $\pm 20\%$ соответственно (б).

Таким образом, есть веские основания для утверждения об устойчивости интегральной оценки рассмотренной системы индикаторов энергетической безопасности Республики Беларусь по отношению к вариациям весов индикаторов внутри отдельных блоков оценки.

Анализ чувствительности индикаторов к изменению весов блоков. Как и при анализе чувствительности от вариаций индикаторов внутри блоков, знаки изменений интегрального индикатора меняются на противоположные при замене на противоположный знак вариации. Как индикаторы отдельных блоков, так и интегральный индикатор мало

чувствительны к вариациям индикаторов блоков в пределах $\pm 20\%$. Лишь при значительном увеличении веса индикатора Блока 3 наблюдается изменение качественного характера поведения интегрального индикатора: он «проседает» в 2016 г. из-за уменьшения в этом году индикатора «И6: Удельный вес накопленной амортизации в первоначальной стоимости основных средств организаций ТЭК» в Блоке 3. Визуально этот эффект виден на рисунке 9.

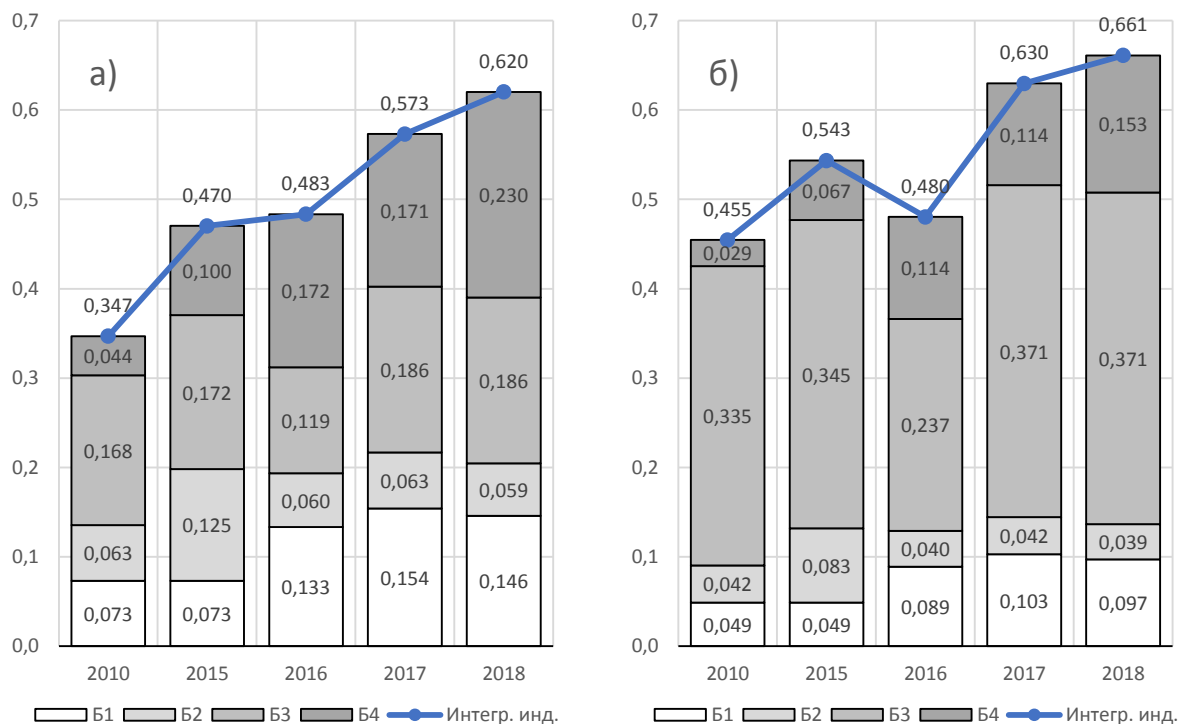


Рис. 9. Сравнение базового расчета интегрального индикатора (а) и расчета при вариации индикатора Блока 3 в размере +100 % (б).

Анализ чувствительности к изменению однофакторных функций ценности. На рисунке 10 показано поведение интегрального индикатора и его составляющих для различных однофакторных функций ценности. Для более наглядного сравнения при данном анализе чувствительности интегральный индикатор вместе с его составляющими нормирован на 1 по отношению к 2010 г.

Как видно из рисунка 10, несмотря на различия в величине интегрального индикатора для разных функций ценности, остается неизменной основная особенность его поведения – возрастание от начала к концу временного периода. Это дает основание для заключения об устойчивости поведения интегрального индикатора по отношению к выбору однофакторных функций ценности.

Поскольку линейные функции ценности наиболее просты в применении и дают более контрастную картину поведения индикаторов блоков при сохранении основной тенденции поведения, именно эти функции можно рекомендовать для оценок уровня энергетической безопасности Республики Беларусь.

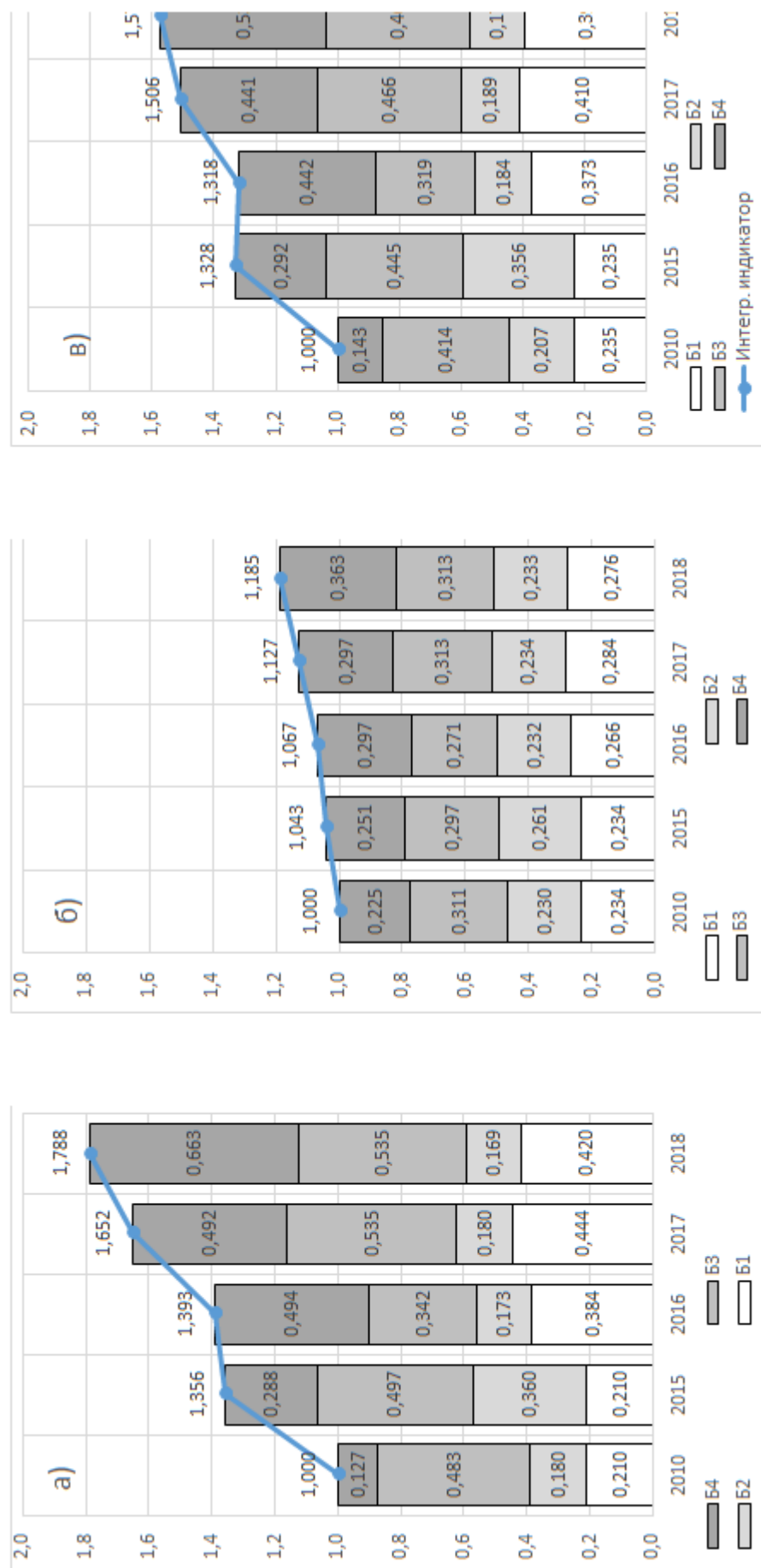


Рис. 10. Интегральный индикатор и его составляющих для однофакторных функций ценности:

а) — линейных; б) — экспоненциальных; в) — логарифмических

Заключение. Основные направления совершенствования Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь:

- плановые показатели по существующим индикаторам энергетической безопасности должны быть пересмотрены, поскольку по отдельным индикаторам по результатам 2019 г. фактически наблюдается перевыполнение плановых показателей 2020 г.;
- при разработке новой редакции Концепции энергетической безопасности целесообразно использовать применение индикативного подхода путем оценки энергетической безопасности единым интегральным индикатором и его составляющими – групповыми индикаторами, представляющими отдельные блоки системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорина Т.Г. Устойчивое энергетическое развитие Республики Беларусь: теория, методология, экономический механизм /Диссертация на соискание степени доктора экономических наук. Минск. 2016. 476 с.
2. Иоселиани А.Н., Михалевич А.А., Нестеренко В.Б., Салуквадзе М.Е. Методы оптимизации параметров теплообменных аппаратов АЭС. Минск.: Наука и техника. 1981. 144 с.
3. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 декабря 2015 г. № 1084.
4. Моделирование рынка электрической энергии Беларуси в рамках Единого экономического пространства с целью определения изменения уровня энергетической безопасности / Отчет о НИР по заданию Энергетические системы, процессы и технологии 1.1.03 (заключительный). РНПУП «Институт энергетики НАН Беларуси». Минск. 2018. 179 стр.
5. Развитие методологии определения уровня и обеспечения энергетической безопасности с использованием детерминистских методов / Отчет о НИР по заданию Энергетические системы, процессы и технологии 1.1.01 (заключительный). РНПУП «Институт энергетики НАН Беларуси». Минск. 2018. 305 стр.
6. Энергетическая безопасность России / В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, А.М. Мастепанов и др. Новосибирск: Наука, Сиб. изд. фирма РАН. 1998. 306 с.
7. Энергетический баланс Республики Беларусь. // Статистический сборник Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Минск. 2019. 154 с.
8. Яцало Б.И., Грицюк С.В., Диденко В.И., Мирзеабасов О.А. Система многокритериального анализа DecernsMCDA и ее практическое применение. // Программные продукты и системы. Международный научно-практический журнал. № (106). 2014. С. 73 – 84.
9. Carver S.J. Integrating multicriteria evaluation with geographical information systems. Intern. Journ. of Geographical Information Systems. 1991. vol. 5 (3). Pp. 321–339.
10. Chakhar S., Martel J.-M. Enhancing Geographical Information Systems Capabilities with Multi-Criteria Evaluation Functions. Journ. of Geographic Information and Decision Analysis. 2003. vol. 7 (2). Pp. 47–71.
11. Densham P.J., & Goodchild M.F. Spatial Decision Support Systems: a research agenda. Proc. of GIS/LIS'89/ Orlando, FL. 1989. Pp. 706–716.

12. International Energy Security Risk Index [Electronic resource] // Institute for 21st Century Energy, U.S. Chamber of Commerce. Available at: <https://www.globalenergyinstitute.org/energy-security-risk-index>. (accessed: 28.02.2020) in Russian.
13. Jankowski P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods. Intern. Journ. of Geographical Information Systems. 1995. № 9. Pp. 251–273.
14. Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. Progress in Planning. 2004. № 62. Pp. 3–65.
15. Malczewski J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. Intern. Journ. of Geographical Information Science. 2006. vol. 20 (7). Pp. 703–726.
16. Malczewski J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. NY: Wiley & Sons Publ. 1999. 392 p.
17. Rinner C. Web-based Spatial Decision Support: Status and Research Directions. Journ. of Geographic Information and Decision Analysis. 2003. vol. 7 (1). Pp. 14–31.
18. World Energy Trilemma Index / 2019. World Energy Council in partnership with Oliver Wyman.
19. Yatsalo B., Kiker G., Kim J., Bridges T., Seager T., Gardner K., Satterstrom K., Linkov I. Application of Multi-Criteria Decision Analysis Tools for Management of Contaminated Sediments. Integrated Environmental Assessment and Management. 2007. Vol. 3 (2). Pp. 223–233.

UDK 620.9

**INDICATIVE APPROACH TO ASSESSMENT OF ENERGY SECURITY
OF THE BELARUS REPUBLIC**

Zorina Tatyana Genadievna,

Doctor of Economics, Associate Professor, Head of Energy Economics

email: tanyazorina@tut.by,

Popov Boris Igorevich

Ph.D. of Engineering Sciences, leading researcher

email: bipopovby@gmail.com,

Institute of Power Engineering of NAS of Belarus

Minsk, Republic of Belarus.

Annotation. This article discusses the existing methodology to energy security assessment in the Republic of Belarus, the indicative approach to energy security assessment, calculation of energy security integrated indicator of the Republic of Belarus using indicative approach.

Key words: energy security, assessment, methodology, indicator, integrated indicator, indicative approach.

References

1. Zorina T.G. Ustoychivoye energeticheskoye razvitiye Respubliki Belarus': teoriya, metodologiya, ekonomicheskij mekhanizm [Sustainable energy development of the Belarus Republic : theory, methodology, economic mechanism] / Dissertatsiya na soiskaniye stepeni doktora ekonomicheskikh nauk [Dissertation for the degree of Doctor of Economics]. Minsk. 2016 (in Russian).

2. Ioseliani A.N., Mikhalevich A.A., Nesterenko V.B., Salukvadze M.E. Metody optimizatsii parametrov teploobmennyykh apparatov [Methods for optimizing the parameters of heat exchangers at NPP]. Minsk.: Nauka i tekhnika= Minsk: Science and technology. 1981. 144p. (in Russian).
3. Konceptiya energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus'. Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 23 dekabrya 2015 [The concept of energy security of the Belarus Republic . Resolution of the Council of Ministers of the Belarus Republic dated December 23, 2015]. № 1084 (in Russian).
4. Modelirovaniye rynka elektricheskoy energii Belarusi v ramkakh Yedinogo ekonomicheskogo prostranstva s tsel'yu opredeleniya izmeneniya urovnya energeticheskoy bezopasnosti / Otchet o NIR po zadaniyu Energeticheskkiye sistemy, protsessy i tekhnologii 1.1.03 (zaklyuchitel'nyy) [Modeling the electricity market in Belarus within the framework of the Common Economic Space in order to determine the change in the level of energy security / Research report on the assignment Energy systems, processes and technologies 1.1.03 (final)]. RNPUP «Institut energetiki NAN Belarusi». Minsk = RNPUE "Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus" Minsk. 2018. 179 p. (in Russian).
5. Razvitiye metodologii opredeleniya urovnya i obespecheniya energeticheskoy bezopasnosti s ispol'zovaniyem deterministskikh metodov / Otchet o NIR po zadaniyu Energeticheskkiye sistemy, protsessy i tekhnologii 1.1.01 (zaklyuchitel'nyy) [Development of a methodology for determining the level and ensuring energy security using deterministic methods / Research report on the assignment Energy systems, processes and technologies 1.1.01 (final)]. RNPUP «Institut energetiki NAN Belarusi». Minsk = RNPUE "Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus" Minsk. 2018. 305 p. (in Russian).
6. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii [Energy Security of Russia] / V.V. Bushuev, N.I. Voropaj, A.M. Mastepanov i dr. Novosibirsk: Nauka, Sib. izd. firma RAN = Novosibirsk: Science, Siberian publisher firm of RAS. 1998. 306 p. (in Russian).
7. Energeticheskyy balans Respubliki Belarus' [Energy balance of the Republic of Belarus]. // Statisticheskyy sbornik Natsional'nyy statisticheskyy komitet Respubliki Belarus' = Statistical collection of the National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Minsk. 2019.154p. (in Russian).
8. Yatsalo B.I., Gritsyuk S.V., Didenko V.I., Mirzeabasov O.A. Sistema mnogokriterial'nogo analiza DecernsMCDA i yeye prakticheskoye primeneniye [DecernsMCDA multicriteria analysis system and its practical application] // Programmnyye produkty i sistemy. Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskyy zhurnal= Software products and systems. International scientific and practical journal. № 2 (106). 2014. P. 73 - 84. (in Russian).
9. Carver S.J. Integrating multicriteria evaluation with geographical information systems. Intern. Journ. of Geographical Information Systems. 1991. Vol. 5 (3). Pp. 321–339.
10. Chakhar S., Martel J.-M. Enhancing Geographical Information Systems Capabilities with Multi-Criteria Evaluation Functions. Journ. of Geographic Information and Decision Analysis, 2003. Vol. 7 (2). Pp. 47–71.
11. Densham P.J., & Goodchild M.F. Spatial Decision Support Systems: a research agenda. Proc. of GIS/LIS'89. Orlando, FL. 1989. Pp. 706–716.

12. International Energy Security Risk Index [Electronic resource] // Institute for 21st Century Energy, U.S. Chamber of Commerce. Available at: <https://www.globalenergyinstitute.org/energy-security-risk-index>. (accessed: 28.02.2020).
13. Jankowski P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods. Intern. Journ. of Geographical Information Systems. 1995. № 9. Pp. 251–273.
14. Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. Progress in Planning. 2004. № 62. Pp. 3–65.
15. Malczewski J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. Intern. Journ. of Geographical Information Science. 2006. Vol. 20 (7). Pp. 703–726.
16. Malczewski J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. NY: Wiley & Sons Publ. 1999/ 392 p.
17. Rinner C. Web-based Spatial Decision Support: Status and Research Directions. Journ. of Geographic Information and Decision Analysis. 2003. Vol. 7 (1). Pp. 14–31.
18. World Energy Trilemma Index / 2019. World Energy Council in partnership with Oliver Wyman.
19. Yatsalo B., Kiker G., Kim J., Bridges T., Seager T., Gardner K., Satterstrom K., Linkov I. Application of Multi-Criteria Decision Analysis Tools for Management of Contaminated Sediments. Integrated Environmental Assessment and Management. 2007. Vol. 3 (2). Pp. 223–233.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ СЕГМЕНТА ЗЕРКАЛА ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК К КОНСТРУКТИВНЫМ ФАКТОРАМ

Рейзмунт Елена Михайловна

К.т.н., н.с. лаборатории вычислительной механики и риск-анализа,
Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий»,
e-mail: e.sigova@gmail.com,
660049 г. Красноярск, пр. Мира 53.

Аннотация. Предложена и апробирована технология изучения влияния конструктивных решений на результирующие характеристики изделия на примере сегмента зеркала крупногабаритной параболической антенны. Выбраны силовые характеристики конструкции для статического и динамического анализа. Определен перечень конструктивных решений, влияние которых на результирующие характеристики представляет интерес, и разработана соответствующая система численных моделей. Новизна подхода заключается в построении многомерного и многоуровневого графа-модели, отражающего логику взаимосвязей конструктивных решений при разработке рассматриваемого объекта.

Ключевые слова: многоуровневое моделирование, декомпозиция, анализ чувствительности, трехслойные композиционные многоопорные оболочки

Цитирование: Рейзмунт Е. М. Многоуровневая модель сегмента зеркала параболической антенны для анализа чувствительности силовых характеристик к конструктивным факторам // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 124 - 133 DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.010

Введение. Анализ чувствительности представляет собой оценку влияния изменения входных параметров объекта (модели) на его свойства и поведение. Основные идеи анализа чувствительности в технике первоначально сформировались в предметной области кибернетики и теории автоматического управления [14, 8]. В силу своей универсальности подходы, связанные с анализом чувствительности, превратились в универсальный инструмент исследований и широко применяются в различных областях науки и техники.

Поиск оптимальных конструктивных вариантов на основе анализа чувствительности искомых характеристик к изменению переменных проектирования является предметом классической теории оптимизации. Теоретические основы подхода применительно к статическим и динамическим задачам оптимизации разработаны и описаны в ряде фундаментальных монографий [17, 18, 1], систематически апробируются в диссертационных исследованиях [4, 7, 9, 13, 15]. Подход к оптимизации на основе анализа чувствительности достаточно хорошо формализован [3, 6], в результате чего в течение последнего десятилетия такой анализ включен в качестве штатного инструмента в большинство тяжелых коммерческих САЕ-систем [2, 10]. Гибкость и универсальность подхода позволяют

применять его к прикладным задачам конструктивной оптимизации, характеризующимся различными инженерными и техническими смыслами [5, 11, 12, 16, 19].

В настоящей работе рассматриваются принципиальные возможности анализа чувствительности характеристик инновационных технических объектов к конструктивным факторам на основе результатов, накапливаемых при выполнении большого количества вычислительных экспериментов в ходе поисковых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), а также возможные перспективы применения этой информации при разработке информационных и математических моделей для прогнозирования тенденций построения и развития объектов-аналогов. Отличительными особенностями такого анализа чувствительности являются его апостериорный и дискретный характер.

Апостериорность обусловлена следующими факторами: поисковые НИОКР выполняются, как правило, в течение нескольких последовательных этапов, на каждом из которых получается промежуточный (улучшаемый) конструктивный вариант и уточняется концепция структуры и обеспечения свойств технического объекта. При этом генерируется и накапливается большое количество результатов расчетных (аналитических и численных) анализов, максимальный объем которых оказывается доступным фактически уже после окончания проекта. Последнее не способствует возникновению мотивации анализа и обобщения всех накопленных в ходе выполнения проекта результатов и выявлению тенденций и закономерностей, которые могут быть получены только при изучении всего объема накопленных данных. Таким образом, эти данные, как правило, не анализируются, и потенциально содержащиеся в них знания не извлекаются.

Дискретный характер анализа связан с тем, что в ходе НИОКР инновационных объектов, как правило, речь идет не о поиске оптимального варианта объекта неизменной структуры при непрерывном изменении переменных проектирования в некотором диапазоне, а о поиске именно оптимальной структуры – множества конструктивных элементов и организации связей между ними. Очевидно, внесение (исключение) конструктивных элементов и связей является дискретным процессом.

Таким образом, речь идет о дополнительном интеллектуальном анализе массива результатов, полученного на базе развернутых во времени многоэтапных исследований. Такой анализ фактически может быть отнесен к категории метаанализа, в перспективе направленного на построение суррогатных моделей, необходимых для установления неочевидных закономерностей. Эти закономерности могут быть использованы при постановке и решении задач структурной оптимизации конструкций инновационных технических объектов.

1. Характеристика технического объекта и постановка задачи. Предпосылками данного исследования явились НИОКР крупногабаритной прецизионной зеркальной параболической антенны наземных систем спутниковой связи, в ходе которых выполнялись уточняющие расчеты постепенно усложняющихся сегментов зеркала. Это позволило установить набор типовых конструктивных решений, последовательное применение которых сформировало окончательный облик сегмента.

Отражающие сегменты зеркала диаметром 12 м изготавливаются с использованием полимерных композиционных материалов (ПКМ). Рассматриваемый далее в качестве объекта отражающий сегмент (рис. 1) представляет собой оребренную трехслойную

оболочку с двумя внешними слоями тканого ПКМ и одним внутренним слоем пенопласта, закрепленную в 6 точках монтажа на силовом каркасе антенны и находящуюся в условиях радиационно-конвективного теплообмена. Два внешних слоя тканого ПКМ представляют собой сегменты параболической оболочки с перпендикулярно загнутыми торцами, которые при производстве сегмента зеркала стыкуются между собой наложением торцов. Таким образом, слой пенопласта закрывается со всех сторон, в том числе и с торцов, углепластиком, образуется оконтуривающее сегмент ребро жесткости (рис. 1).

Иерархическая система моделей со сравнительным анализом результатов, получаемых на постепенно усложняемых моделях, открывает возможность анализа чувствительности и позволяет учесть вклад конкретных конструктивных факторов и их взаимодействий.

Постановка задачи исследования основывается на следующей идее: введение в рассмотрение (учет в модели) каждого конструктивного решения сопровождается откликом результирующих параметров. Величина отклика на введение того или иного конструктивного решения различна. Эти величины предположительно отражают закономерности поведения не только данного конкретного типоразмера сегмента, но и остаются как минимум качественно справедливыми для некоторого класса концептуально близких сегментов-аналогов, пока можно предполагать подобными характер поведения изделия. Изучение этих величин отклика и анализ чувствительности результата позволяет определить:

- изменение параметров каких конструктивных факторов наиболее эффективно влияет на результат (случай доработки данного конкретного сегмента, если меняются технические требования к изделию);
- введение в рассмотрение каких конструктивных факторов на ранних стадиях НИОКР позволяет оценить «жизнеспособность» и перспективы дальнейшего развития изделия (для конструкций-аналогов).

Цель заключается в том, чтобы предложить и апробировать технологию изучения влияния конструктивных решений на результирующие характеристики изделия (на примере сегмента зеркала крупногабаритной параболической антенны).

Задача исследования заключается в выборе силовых характеристик конструкции, разработке и структурной организации расчетных моделей, обеспечивающих возможность анализа чувствительности силовых характеристик к изменению конструктивных факторов многослойных ребренных многоопорных композитных оболочек на примере сегментов зеркала крупногабаритной параболической антенны. При решении этой задачи необходимо:

- обосновать (определить) перечень конструктивных решений, влияние которых на результирующие характеристики представляет интерес;
- разработать систему численных моделей, отражающих рассматриваемые конструктивные решения;
- предложить технологию анализа, позволяющую определять влияние каждого конструктивного фактора на результат независимо от других;
- апробировать подход на примере одного из сегментов зеркала.

Для решения поставленной задачи использовались численные и экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела, метод декомпозиции, системный подход.

2. Выбор силовых характеристик конструкции для статического и

динамического анализа. В качестве силовых характеристик будем рассматривать ряд величин, характеризующих поведение конструкции с позиций статической и динамической прочности и жесткости при расчетных случаях нагружения. Естественно измерять и анализировать эти величины в терминах напряжений (статическая прочность), перемещений (статическая жесткость), собственных частот свободных колебаний (динамическая жесткость). Анализ теплового деформирования выполняется по результатам численного решения сопряженной задачи стационарной теплопроводности в условиях радиационно-конвективного теплообмена и термоупругости. Интегральная плотность потока солнечное излучение 112 Вт/м^2 ; коэффициент конвективного теплообмена $1,5e^{-5} \text{ Вт/мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Также численно выполняется модальный анализ низших собственных частот свободных колебаний без учета и с учетом предварительного напряжения конструкции от температурного воздействия.

Исходя из условий нагружения и конструктивных особенностей объекта, рассматривается следующий набор расчетных характеристик: u – максимальные поступательные перемещения отражающей поверхности зеркала рефлектора, мм; σ – максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу во всей конструкции, МПа; σ_r – максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в слое углепластика отражающей поверхности, МПа; σ_s – максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в слое пенопласта, МПа; σ_m – максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в слое углепластика со стороны крепления (монтажная поверхность), МПа; σ_r^* – максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу на отражающей поверхности, МПа; R_1-R_6 – реакции в соответствующих опорах от температурного преднапряжения, Н; f_1 – собственная частота свободных колебаний по первой форме, Гц; $f_1(T)$ – собственная частота свободных колебаний по первой форме в случае температурного преднапряжения, Гц. Причем с точки зрения физико-технического смысла предпочтительно, чтобы низшие собственные частоты свободных колебаний стремились к максимуму, а остальные характеристики – к минимуму.

3. Структурная организация иерархии моделей. Структурная организация иерархии моделей представлена на рис. 2. Рассматриваются четыре уровня детализации структурной сложности конструкции с точки зрения геометрии. При этом на каждом уровне по возможности рассматриваются модели с изотропным (усредненным для тканого ПКМ) и ортотропным описанием свойств материала. Во всех случаях кинематические граничные условия описывают жесткое опирание сегмента на силовой каркас рефлектора.

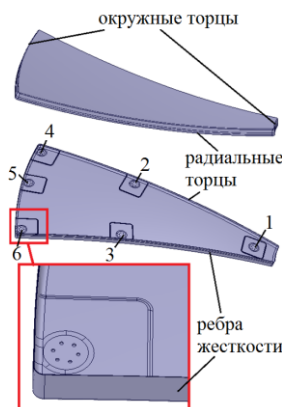


Рис. 1. Геометрия сегмента: 1-6 – опоры

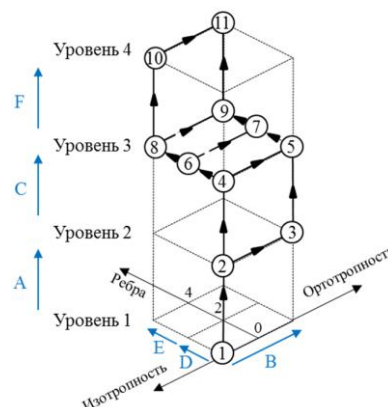


Рис. 2. Структурная организация иерархии моделей

Комментарии к рис. 2: уровень 1 – модель 1 – двумерная модель оболочки сегмента с использованием функции многослойного сечения с указанием трех слоев соответствующей толщины, материал изотропный; уровень 2 – модели 2 и 3 – трехмерные модели трехслойной оболочки сегмента (без закрытия торцов и без ребер жесткости), материал изотропный (модель 2) и ортотропный (модель 3); уровень 3 – модели 4-9 – трехмерные модели трехслойной оболочки сегмента с торцами, закрытыми слоем ПКМ без ребер жесткости (модели 4 и 5), с двумя радиальными (модели 6 и 7), с двумя радиальными и двумя окружными (модели 8 и 9) ребрами жесткости. Материал изотропный (модели 4, 6, 8) и ортотропный (модели 5, 7, 9); уровень 4 – модели 10 и 11 – трехмерные модели трехслойной оболочки сегмента с ребрами жесткости, сделанными заедино с отражающей и закрепляемой поверхностями (сложная конфигурация с особенностями геометрии), материал изотропный (модель 10) и ортотропный (модель 11).

Модели уровней 2-4 позволяют анализировать распределение температур по толщине сечения оболочки (решение сопряженной задачи радиационно-конвективного теплообмена, стационарной теплопроводности и термоупругости) и его влияние на силовые характеристики.

Вводимые в рассмотрение факторы отражают следующие конструктивные изменения: А – переход от двумерной модели к трехмерной; В – введение ортотропности; С – закрытие торцов; D – введение радиальных ребер; Е – введение окружных ребер; F – учет всех геометрических и конструктивных особенностей технического объекта.

Таким образом, рассматривается следующая многоуровневая система моделей, отражающая эволюцию ментальной модели конструкции на протяжении всех этапов поисковой НИОКР: 1 – изотропная трехслойная оболочка; 2 – изотропное трехслойное 3D тело; 3 – ортотропное трехслойное 3D-тело; 4 – изотропное трехслойное 3D-тело с закрытыми торцами; 5 – ортотропное трехслойное 3D-тело с закрытыми торцами; 6 – изотропное трехслойное 3D-тело с закрытыми торцами и радиальными ребрами; 7 – ортотропное трехслойное 3D-тело с закрытыми торцами и радиальными ребрами; 8 – изотропное трехслойное 3D-тело с закрытыми торцами, радиальными и окружными ребрами; 9 – ортотропное трехслойное 3D-тело с закрытыми торцами, радиальными и окружными ребрами; 10 – изотропная полная геометрия; 11 – ортотропная полная геометрия.

Линии со стрелками отображают связь – переход от более простой модели к более сложной, иллюстрируют влияние вводимого в рассмотрение фактора. Таким образом, организованная структура системы моделей отражает их развитие от общего предка (модели 1) и обеспечивает наследование с позиций увеличения числа все более детализированных признаков. Полученную систему иерархически организованных и взаимосвязанных моделей можно рассматривать как единую многоуровневую модель конструкции.

4. Основные результаты. Получение полного массива данных для анализа чувствительности. Рассмотрим расчетные значения предложенного набора характеристик деформирования для рассматриваемых моделей 1-11, представленные в табличной форме (таблица ю1). Для десяти моделей 2-11 получены результаты по 13 характеристикам и для первой модели – по одной характеристике. По результатам численного расчета максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу во всей конструкции σ оказались в слое углепластика со стороны крепления (монтажная поверхность), т.е. совпали с σ_m . Минимальные значения реакции R_1 возникли в моделях 7 и 9, для остальных реакций – в

модели 3. Максимальные значения реакции возникли в модели 10. Низшая собственная частота свободных колебаний в случае температурного преднапряжения $f_1(T)$ для моделей 2-11 практически не отличается от f_1 без учета температурного преднапряжения.

Таблица 1. Расчетные значения силовых характеристик

Характеристики	Модель										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
u , мм		0,0814	0,0782	0,074	0,0699	0,0592	0,0569	0,0592	0,0569	0,055	0,0523
$\sigma = \sigma_m$, МПа		15,6	13,6	15,1	14	14,5	12,8	14,4	12,9	10,9	8,9
σ_r , МПа		2,6	2,4	11,6	10,6	8,6	7,9	7,9	7,4	8,6	5
σ_s , МПа		0,056	0,054	0,061	0,06	0,06	0,058	0,057	0,056	0,063	0,071
σ_r^* , МПа		1,8	1,8	9,8	9,2	8,6	7,9	7	6,9	3,7	2,9
R_1 , Н		601	558	634	579	594	541	595	541	769	720
R_2 , Н		228	200	248	212	260	220	266	224	410	358
R_3 , Н		240	208	260	221	272	229	275	231	418	362
R_4 , Н		400	353	422	364	420	360	426	361	632	552
R_5 , Н		300	272	326	293	327	294	311	282	381	361
R_6 , Н		430	378	456	391	455	388	458	386	692	605
$f_1(T)$, Гц		107,47	104,97	111,01	107,42	121,12	117,69	121,08	117,66	124,74	121,79
f_1 , Гц	151,45	107,66	105,15	111,19	107,59	121,28	117,84	121,24	117,81	124,94	121,98

Очевидно, что уже при такой размерности таблицы затруднительны экспертный анализ и интерпретация результатов без дополнительной их обработки. Представленные в таблице числовые данные характеризуют количественный отклик каждой силовой характеристики к каждому конструктивному фактору и являются основой для анализа. Однако, отметим, анализ чувствительности следует рассматривать как первый из серии возможных приемов интеллектуального анализа полученного массива данных.

Заключение. В статье рассмотрен подход к формированию массива числовых данных для дальнейшего анализа чувствительности целевых характеристик исследуемого объекта к изменению переменных проектирования. Подход апробирован на примере сегмента зеркала параболической антенны, для которого целевыми характеристиками являются наборы величин, характеризующих поведение сегмента при тепловом нагружении, а в качестве переменных проектирования выступают вносимые при разработке объекта конструктивные изменения.

Новизна подхода заключается в построении многомерного и многоуровневого графа-модели, отражающего логику взаимосвязей конструктивных решений при разработке рассматриваемого объекта.

Применение полученного массива данных для анализа чувствительности целесообразно в использовании интеллектуальных информационных систем поддержки разработки инновационных конструкций параболических зеркальных антенн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баничук Н.В., Иванова С.Ю., Шаранюк А.В. Динамика конструкций. Анализ и оптимизация. М.: Наука. 1989. 262 с.
2. Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. М.: ДМК Пресс. 2012. 504 с.

3. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. М.: Издательство АСВ. 2009. 360 с.
4. Дмитриева Т.Л. Адаптивные многоуровневые математические модели в численной оптимизации пластинчато-стержневых конструкций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГСУ. 2011. 38 с.
5. Дмитриева Т.Л., Ле Чан Минь Дат. Алгоритм оптимизации на основе аппроксимаций // Вестник ИрГТУ. 2012. № 12. С. 134-140.
6. Зарубин В.А. Анализ чувствительности, оптимизация и их информационное обеспечение в МКЭ-системах // Расчеты на прочность. Сборник научных статей. Вып. 32. М.: Машиностроение. 1990. С. 151-168.
7. Нгуен Д.Д. Математическое и программное обеспечение для анализа чувствительности параметров колебаний пластинчато-оболочечных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск: БГУЭП. 2012. 16 с.
8. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем. М.: Мир. 1979. 454 с.
9. Распопина В.Б. Разработка методов анализа чувствительности геометрически нелинейных упругих механических систем при статических нагрузках: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск: ИрИИТ. 2000. 23 с.
10. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс. 2013. 784 с.
11. Сергеев О.А., Киселев В.Г., Сергеева С.А. Анализ чувствительности в некротических критических точках и оптимальное проектирование геометрически нелинейных конструкций // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2014. Т. 26. С. 236-240. Режим доступа: <http://e-koncept.ru/2014/64348.htm> (дата обращения 03.05.2020).
12. Сергеев О.А., Киселев В.Г., Сергеева С.А., Новиков В.В. Анализ чувствительности и оптимизация пологих стержневых конструкций с учетом геометрической нелинейности и ограничений на устойчивость // Проблемы прочности и пластичности. 2018. Т. 80. № 3. С. 380-391.
13. Сергеева С.А. Анализ чувствительности и оптимизация пространственных рамных конструкций с учетом ограничений по усталостной долговечности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород: НГУ. 1997. 20 с.
14. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности. М.: Советское радио. 1972. 240 с.
15. Троицкий А.В. Математические модели и методы анализа чувствительности в задачах оптимизации конструкций роторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 16 с.
16. Тушев О.Н., Донских О.Н. Определение вероятностных моментов фазовых координат нелинейной модели конструкции // Известия вузов. Машиностроение. 2016. № 2. С. 3-10.
17. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование: механические системы и конструкции. М.: Мир. 1983. 480 с.
18. Хог Э., Чой К., Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций. М.: Мир. 1988. 428 с.
19. Хуан Ш., Костин В.А., Лаптева Е.Ю. Применение метода анализа чувствительности для решения обратной задачи ползучести кессона конструкции на основе модели суперэлементов // Вестник МАИ. 2018. Т. 25, № 3. С. 64-72.

A MULTILEVEL MODEL OF A PARABOLIC ANTENNA MIRROR SEGMENT FOR ANALYZING THE SENSITIVITY OF POWER CHARACTERISTICS TO A DESIGN FACTOR

Elena M. Rejzmun

PhD, Researcher, Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis,
Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational,
e-mail: e.sigova@gmail.com,
Technologies, 53, Mira avenue, 660049, Krasnoyarsk, Russia,

Annotation. A technology for studying the possibilities of constructive solutions on the resulting characteristics of products using the example of mirror segments of a large parabolic antenna is proposed and tested. Power structures for static and dynamic analysis are selected. A list of constructive solutions is determined, the influence of which on the resulting characteristics is of interest, and an appropriate system of numerical models is developed. The novelty of the approach lies in the construction of a multidimensional and multi-level graph-model, which reflects the logic of the relationship of constructive solutions in the development of the object under consideration.

Keywords: multilevel modeling, decomposition, sensitivity analysis, three-layer compositions multi-support shells

References

1. Banichuk N.V., Ivanova S.Ju., Sharanjuk A.V. Dinamika konstrukcij. Analiz i optimizacija [Dynamics of constructions. Analysis and optimization]. Moskva: Nauka = Moscow: Science. 1989. 262 p. (in Russian).
2. Goncharov P.S., Artamonov I.A., Halitov T.F., Denisihin S.V., Sotnik D.E. NX Advanced Simulation. Inzhenernyj analiz [NX Advanced Simulation. Engineering analysis]. Moskva: DMK Press = Moscow: DMK Press. 2012. 504 p. (in Russian).
3. Gorodeckij A.S., Evzerov I.D. Komp'yuternye modeli konstrukcij [Computer models of structures]. Moskva: Izd-vo ASV = Moscow : ACU Publ. 2009. 360 p. (in Russian).
4. Dmitrieva T.L. Adaptivnye mnogourovnevnye matematicheskie modeli v chislennoj optimizacii plastinchato-sterzhnevnyh konstrukcij. Dis. dokt. tech. nauk [Adaptive multi-level mathematical models in the numerical optimization of plate-rod structures. Extended Abstract of D.Sc. Thesis]. Moskva : Izd-vo MGSU = Moscow State Construction University Publ. 2011. 38 p. (in Russian).
5. Dmitrieva T.L., Le Chan Min' Dat. Algoritm optimizacii na osnove approksimacij [Approximation-Based Optimization Algorithm] // Vestnik IrGTU = ISTU Bulletin. 2012. № 12. Pp. 134-140. (in Russian).
6. Zarubin V.A. Analiz chuvstvitel'nosti, optimizacija i ih informacionnoe obespechenie v MKJe-sistemah [Sensitivity analysis, optimization and their information support in FEM systems] // Raschety na prochnost'. Sbornik nauchnyh statej. Vyp. 32 = Strength

- calculations. Collection of scientific articles. Iss. 32. Moskva: Mashinostroenie = Moscow: Mechanical Engineering. 1990. Pp. 151-168 (in Russian).
7. Nguen D.D. Matematicheskoe i programmnoe obespechenie dlja analiza chuvstvitel'nosti parametrov kolebanij plastinchato-obolocheknykh konstrukcij. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. [Mathematical and software for analyzing the sensitivity of vibration parameters of plate-shell structures. Ph.D. Tesis]. Irkutsk: Izd-vo BGUJeP = Baikal State University of Economics and Law Publ. 2012. 16 p. (in Russian).
8. Rajnshke K. Modeli nadezhnosti i chuvstvitel'nosti system. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk [System reliability and sensitivity models]. Moskva: Mir = Moscow: World. 1979. 454 p. (in Russian).
9. Raspopina V.B. Razrabotka metodov analiza chuvstvitel'nosti geometricheski nelinejnykh uprugih mehanicheskikh sistem pri staticheskikh nagruzkah [Development of methods for analyzing the sensitivity of geometrically nonlinear elastic mechanical systems under static loads. Ph.D. Tesis]. Irkutsk: Izd-vo IrIIT = Irkutsk Institute of Railway Engineers Publ. 2000. 23 p. (in Russian).
10. Rychkov S.P. Modelirovanie konstrukcij v srede Femap with NX Nastran [Structural modeling in Femap with NX Nastran]. Mosckva: DMK Press = Moscow: DMK Press. 2013. 784 p. (in Russian).
11. Sergeev O.A., Kiselev V.G., Sergeeva S.A. Analiz chuvstvitel'nosti v nekratnykh kriticheskikh tochkah i optimal'noe proektirovanie geometricheski nelinejnykh konstrukcij [Sensitivity analysis at multiple critical points and optimal design of geometrically nonlinear structures] // Nauchno-metodicheskij jelektronnyj zhurnal «Koncept» = Scientific and methodological electronic journal "Concept". 2014. T. 26. Pp. 236-240. Available at: <http://e-koncept.ru/2014/64348.htm>, accessed 03.05.2020. (in Russian).
12. Sergeev O.A., Kiselev V.G., Sergeeva S.A., Novikov V.V. Analiz chuvstvitel'nosti i optimizacija pologih sterzhnevnykh konstrukcij s uchetom geometricheskoj nelinejnosti i ogranichenij na ustojchivost' [Sensitivity analysis and optimization of flat bar structures taking into account geometric non-linearity and stability restrictions] // Problemy prochnosti i plastichnosti = Problems of strength and plasticity. 2018. T. 80, № 3. Pp. 380-391 (in Russian).
13. Sergeeva S.A. Analiz chuvstvitel'nosti i optimizacija prostranstvennykh ramnykh konstrukcij s uchetom ogranichenij po ustalostnoj dolgovechnosti. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. [Sensitivity analysis and optimization of spatial frame structures taking into account fatigue life limitations. Ph.D. Tesis]. Nizhny Novgorod: Izd-vo NGU = Nizhny Novgorod State University Publ. 1997. 20 p. (in Russian).
14. Tomovich R., Vukobratovich M. Obshhaja teorija chuvstvitel'nosti [General theory of sensitivity]. Moskva: Sovetskoe radio = Moscow: Soviet radio. 1972. 240 p. (in Russian).
15. Troickij A.V. Matematicheskie modeli i metody analiza chuvstvitel'nosti v zadachah optimizacii konstrukcij rotorov. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. [Mathematical models and methods for sensitivity analysis in problems of optimizing rotor designs. Ph.D. Tesis]. Moscow. MGTU im. N.Je. Bauman = Moscow State Technical University named after N.E. Bauman Publ. 2006. 16 p. (in Russian).
16. Tushev O.N., Donskih O.N. Opređenje veroyatnostnykh momentov fazovykh koordinat nelinejnoj modeli konstrukcii [Determination of the probabilistic moments of the phase

- coordinates of a nonlinear design model] // Izvestija vuzov. Mashinostroenie = University News. Mechanical Engineering. 2016. № 2. Pp. 3-10. (in Russian).
17. Hog Je., Arora Ja. Prikladnoe optimal'noe proektirovanie: mehanicheskie sistemy i konstrukcii [Applied optimal design: mechanical systems and structures]. Moskva: Mir = Moscow: World. 1983. 480 p. (in Russian).
18. Hog Je., Choj K., Komkov V. Analiz chuvstvitel'nosti pri proektirovanii konstrukcij [Sensitivity analysis in structural design]. Moskva: Mir = Moscow: World. 1988. 428 p. (in Russian).
19. Huan Sh., Kostin V.A., Lapteva E.Ju. Primenenie metoda analiza chuvstvitel'nosti dlja reshenija obratnoj zadachi polzuchesti kessona konstrukcii na osnove modeli superjelementov [Application of a sensitivity analysis method to solve the inverse creep problem of a caisson of a structure based on a model of superelements]. // Vestnik MAI = Moscow Aviation Institute Bulletin. 2018. T. 25. № 3. Pp. 64-72 (in Russian).

УДК 621.314

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ДВУХУРОВНЕВОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Дунаев Михаил Павлович

Д.т.н., профессор, e-mail: mdunaev10@mail.ru,

Довудов Сарфароз Умедович

Аспирант, e-mail: dsu_1991@mail.ru,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83.

Аннотация. Научная статья посвящается моделированию однофазного двухуровневого инвертора напряжения (АИН) с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ). Модель реализована в среде MATLAB R2019a с использованием блоков из библиотеки Simulink/Simscape. Описаны основные элементы библиотеки Simscape. Разработана и смоделирована схема АИН с ЧИМ с использованием блоков из библиотеки Simscape. Полученные диаграммы АИН с ЧИМ показали, что частота в середине периода ЧИМ в 3 раза больше относительно краев. Также получены диаграммы тока и напряжения на активной и активно-индуктивной нагрузке АИН.

Ключевые слова: частотно-импульсная модуляция; широтно-импульсная модуляция; частота; моделирование.

Цитирование: Дунаев М. П., Довудов С. У. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 134 – 143. DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.011

Введение. Преобразование постоянного напряжения в переменное может осуществляться с помощью инвертора, выполненного на транзисторных модулях IGBT [7]. Одним из наиболее простых преобразователей этого типа является однофазный двухуровневый автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [9, 10], схема которого представлена на рисунке 1.

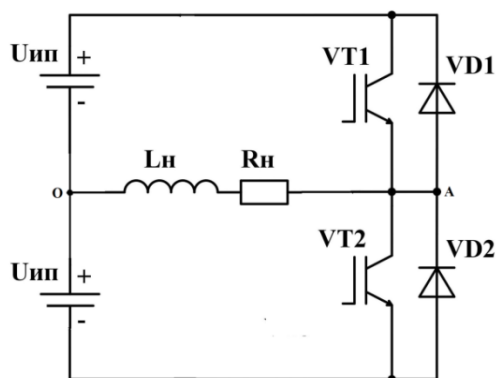


Рис. 1. Схема однофазного АИН

Инвертор (рисунок 1) питается от двух источников напряжения постоянного тока ($U_{ип}$). АИН содержит два полупроводниковых ключа из IGBT-транзисторов ($VT1$ и $VT2$), к которым встречно подключены диоды обратного тока ($VD1$ и $VD2$). Нагрузка инвертора (R_n , L_n) включена между средней точкой источника питания и общей точкой включения транзисторов $VT1$, $VT2$.

У АИН с ШИМ имеется ряд недостатков [3], основным из которых является снижение к.п.д. преобразователя. Можно повысить к.п.д. преобразователя, если использовать в инверторах для управления полупроводниковые ключи с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ) [2, 4, 5, 14].

Частотно-импульсная модуляция - это тип модуляции, где время (ширина) импульса $t_{и}$ остается постоянной и меняется только время паузы $t_{п}$ [2, 3]. Фактически меняется период выходного напряжения, соответственно меняется и частота выходного напряжения. На рис. 2 показаны диаграммы формирования напряжения для управления полупроводниковых ключей инверторов методом частотно-импульсной модуляции (ЧИМ). В ЧИМ модулируемый сигнал $U(t)$ является синусоидальным и при фиксированной ширине импульса с увеличением амплитуды $U(t)$, ширина паузы между импульсами уменьшается, то есть ширина паузы обратно пропорциональна амплитуде модулируемого сигнала $U(t)$. С увеличением амплитуды $U(t)$ период ЧИМ уменьшается, соответственно увеличивается частота.

Максимальная частота в ЧИМ получается при максимальной амплитуде модулируемого сигнала $U(t)$.

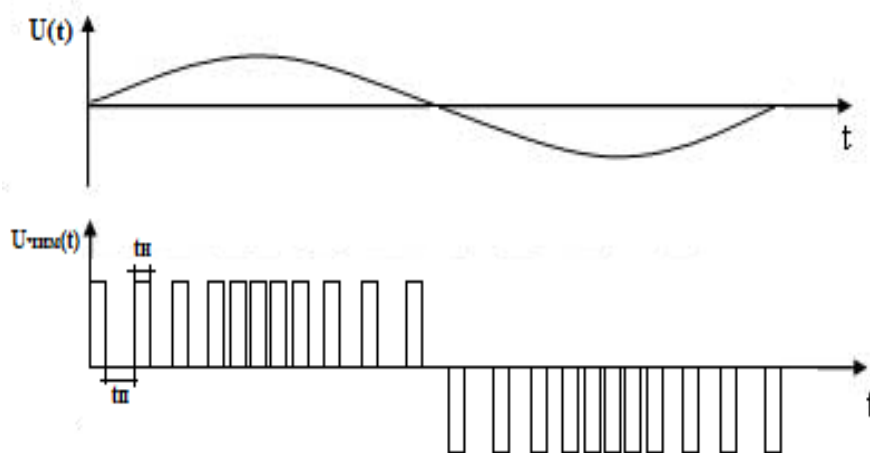


Рис. 2. Диаграммы формирования частотно-импульсной модуляции

Для генератора прямоугольных импульсов, показанного на рис. 3, частота колебаний обратно пропорциональна емкости:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Таким образом, увеличение управляющего напряжения увеличивает частоту колебаний и наоборот. Постоянные резисторы R_1 , R_2 выведены на внешнюю линию управления $V_{control}$. Напряжение, при котором C_1 и C_2 разрядятся через R_1 и R_2 , изменяется с изменением напряжения $V_{control}$. Следовательно, скорость разряда увеличивается с увеличением $V_{control}$.

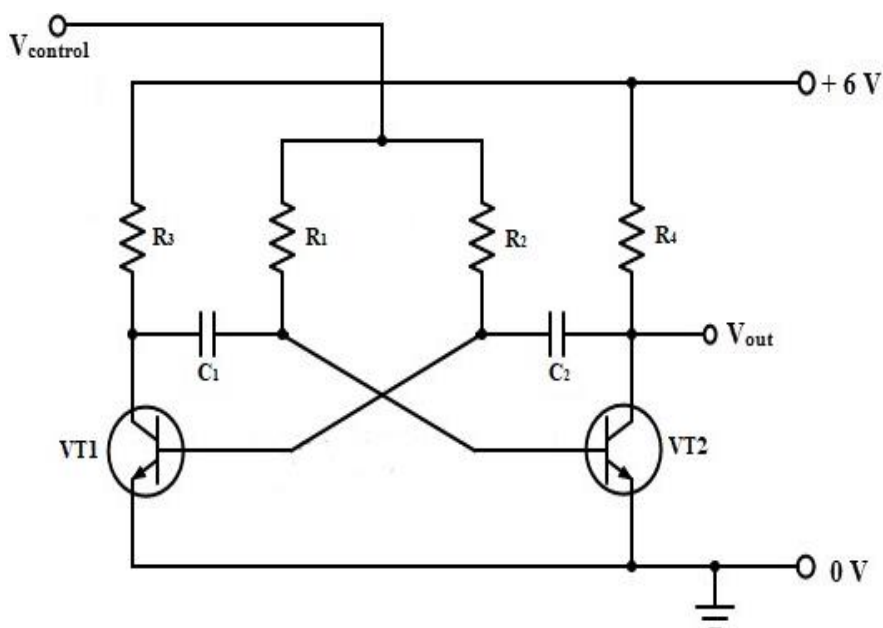


Рис. 3. Генератор прямоугольных импульсов с регулированием частоты

Моделирование АИН с ЧИМ. В среде MATLAB R2019a с использованием блоков из библиотеки Simulink/Simscape [6] смоделирована схема однофазного двухуровневого АИН с ЧИМ, которая приведена на рисунке 4.

Модель содержит следующие блоки:

- Блок регулирования U_y - напряжение управления, которое является синусоидальным и изменяется в функции

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где U_m – амплитудное значение, ω - угловая частота, φ_0 - начальная фаза.

Модель блока напряжения управления показана на рис. 5.

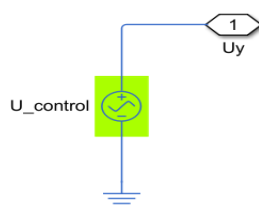


Рис. 5. Блок напряжения управления

- Блок формирования ЧИМ (PFM) смоделирован согласно схеме рис. 3 с использованием блоков из библиотеки Simscape и показан на рис. 7.

Simscape – это среда для построения и моделирования физических систем. Базовая библиотека блоков Simscape расширяется на несколько специализированных библиотек, таких как: Foundation Library, Driveline, Electrical, Fluids, Multibody и др. В данной среде можно разрабатывать электронные, электромеханические, электрические, механические, гидравлические, термальные и другие виды систем.

При моделировании в Simscape используется блок, который соответствует физическим элементам, таким как: двигатели, резисторы, транзисторы, тиристоры, конденсаторы. При соединении их линиями, получается модель физического соединения, по которой передается сигнал. В модели Simulink-e, при соединении блоков у линий имеются стрелки [1, 8, 12]. Это означает, что сигналы передаются только в одном направлении, т.е.

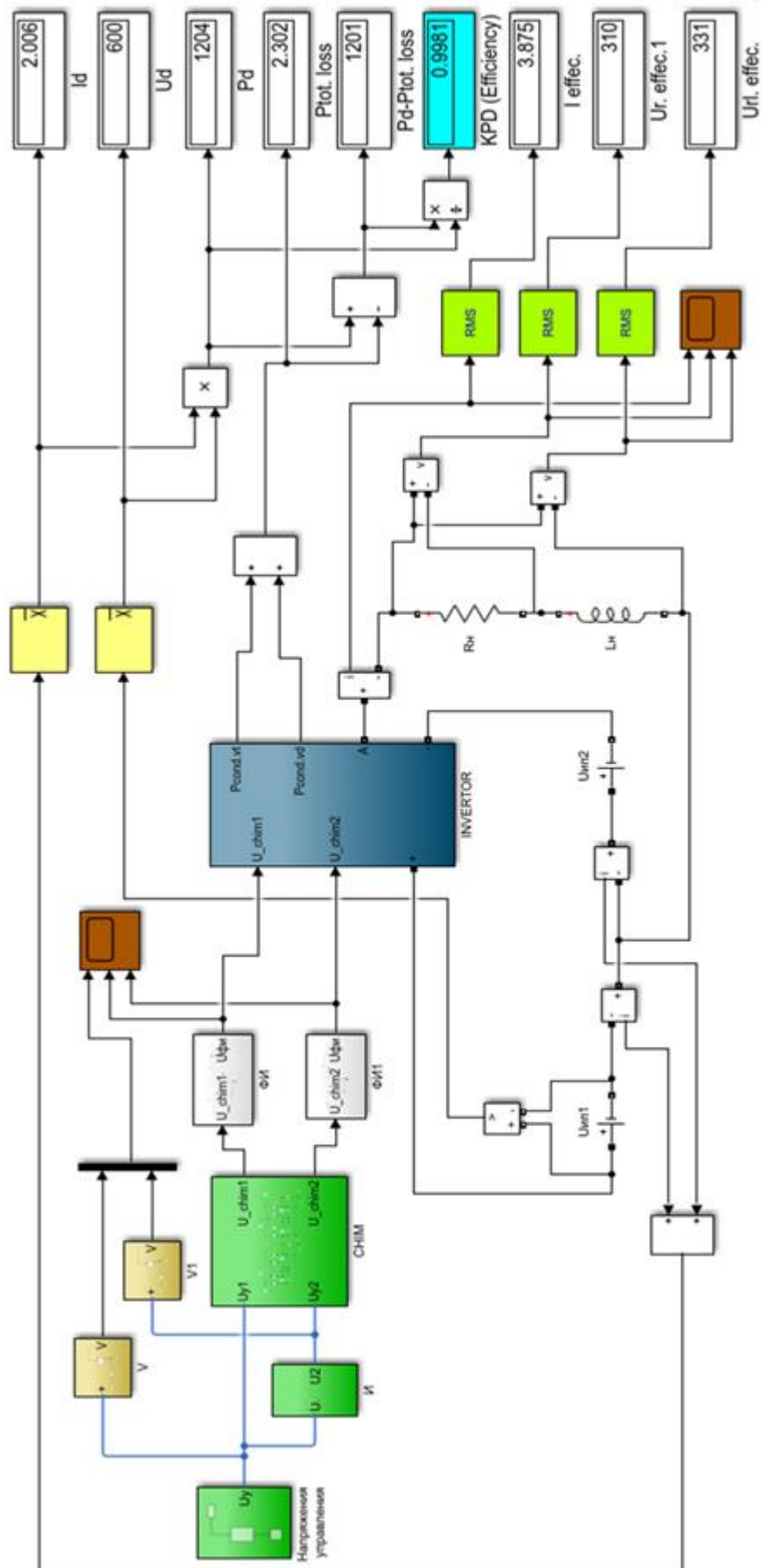


Рис. 4. Модель однофазного двухуровневого АИН с ЧИМ

поток энергии является однонаправленным. В отличие от Simulink-a, в модели Simscape линии, которые соединяют физические элементы, не имеют стрелок и поток энергии является двунаправленным.

Основные элементы, которые используются в Simscape модели для измерения, показаны на рис. 6. Это блоки Current Sensor (датчик тока) и Voltage Sensor (датчик напряжения), которые являются идеальными датчиками. Датчик тока и напряжения преобразуют ток и напряжение, измеренные в любой электрической ветви, в сигнал, пропорциональный току и напряжению.

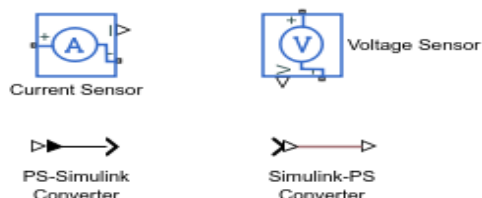


Рис. 6. Основные элементы Simscape

Для того чтобы конвертировать физический сигнал в выходной сигнал Simulink или входной сигнал Simulink в физический сигнал, используется PS-Simulink Converter и Simulink-PS Converter. Эти блоки преобразуют физический сигнал в Simulink выходного сигнала и наоборот - входной Simulink сигнал в физический сигнал.

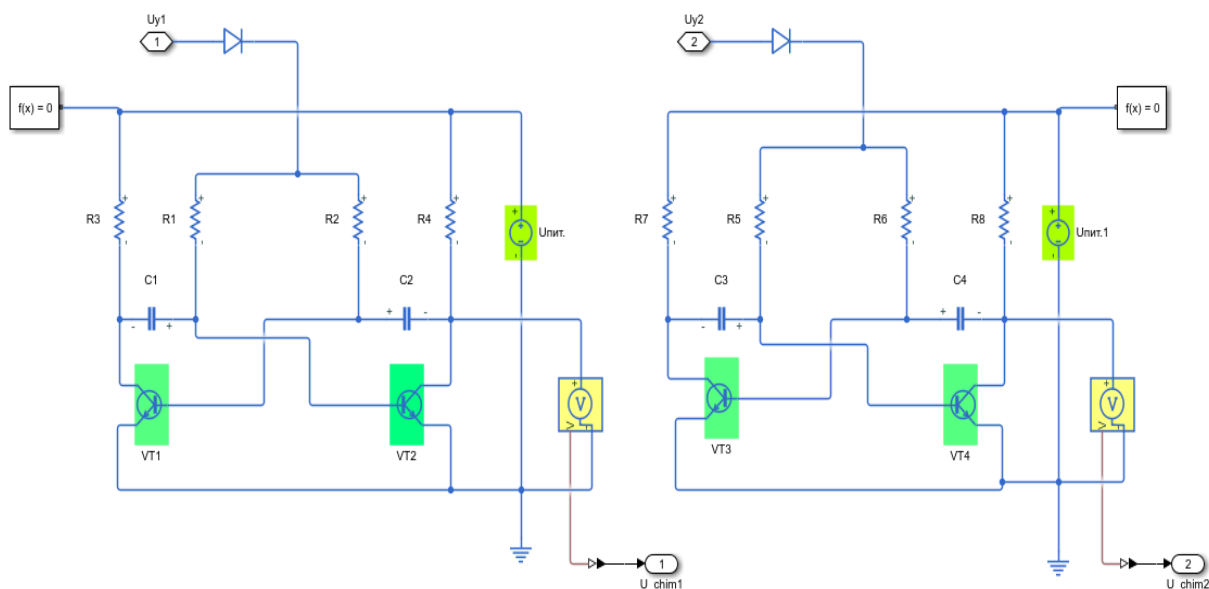


Рис. 7. Частотно-импульсная модуляция

Параметры элементов, которые использовались в модели ЧИМ (рис.7) показаны в таблице 1. Транзисторы V1- V4- это биполярные транзисторы n-p-n типа. Полученные диаграммы ЧИМ показаны на рис. 9. Как видно из диаграммы, моделирующая напряжения является одновременно и напряжением управления, которое является синусоидальной и изменяется по закону:

$$U = 41,5 \sin(2\pi f),$$

где $f = 50$ Гц, $U_m = 41,5$ В.

Таблица 1. Параметры элементов модели ЧИМ

Упит., В	R1, R5	R2, R6	R3, R7	R4, R8	C1, C3	C2, C4
	кОм				нФ	
6	23	130	2	1	75	15

С увеличением амплитуды напряжения управления выходная частота ЧИМ также увеличивается. В нашем случае частота на краях периода ЧИМ равна 0,7 кГц, а в середине 2,2 кГц. Таким образом, частота в середине периода получается в 3 раза больше, чем на краях.

• Блок силовой схемы (INVERTOR), который показан на рис. 8, состоит из IGBT-транзисторов и обратных диодов; активно-индуктивной нагрузки R_n , L_n ; двух источников постоянного тока; комплекса измерительных приборов.

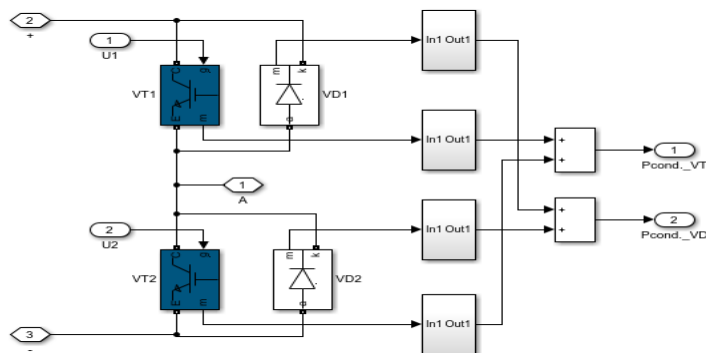


Рис. 8. Модель однофазного двухуровневого АИН

Модель на рис. 8 позволяет вычислять статические потери [11, 13, 15] IGBT-транзисторов и диодов.

Результаты моделирования. Модель АИН с ЧИМ позволяет определить среднее и действующее значение напряжения и тока в нагрузке, мощность источника, мощность нагрузки и к.п.д. преобразователя. Результаты моделирования показаны на рис. 9 и 10.

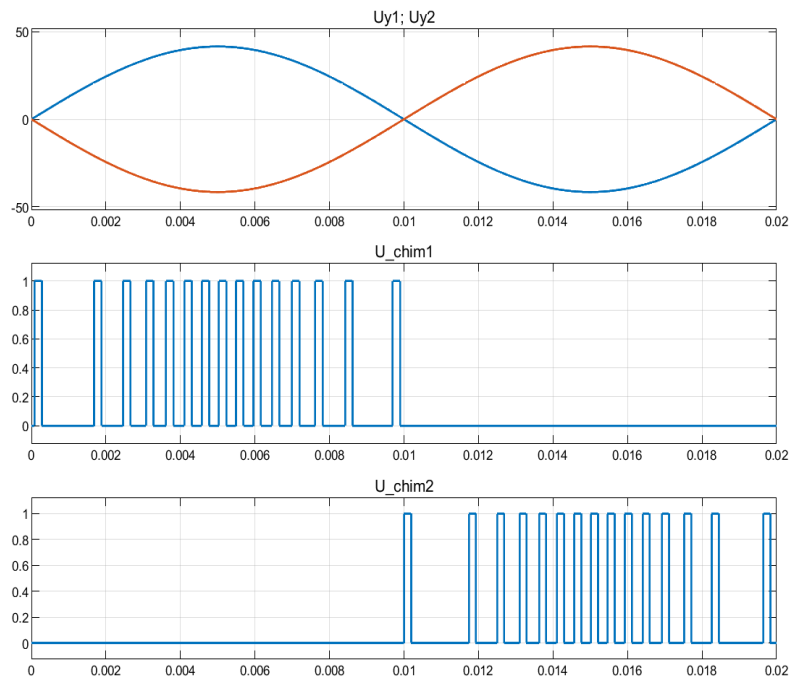


Рис. 9. Результаты моделирования. Первая диаграмма - напряжения управления U_{y1} , U_{y2} , вторая и третья диаграммы - функции состояния транзисторов АИН в режиме ЧИМ

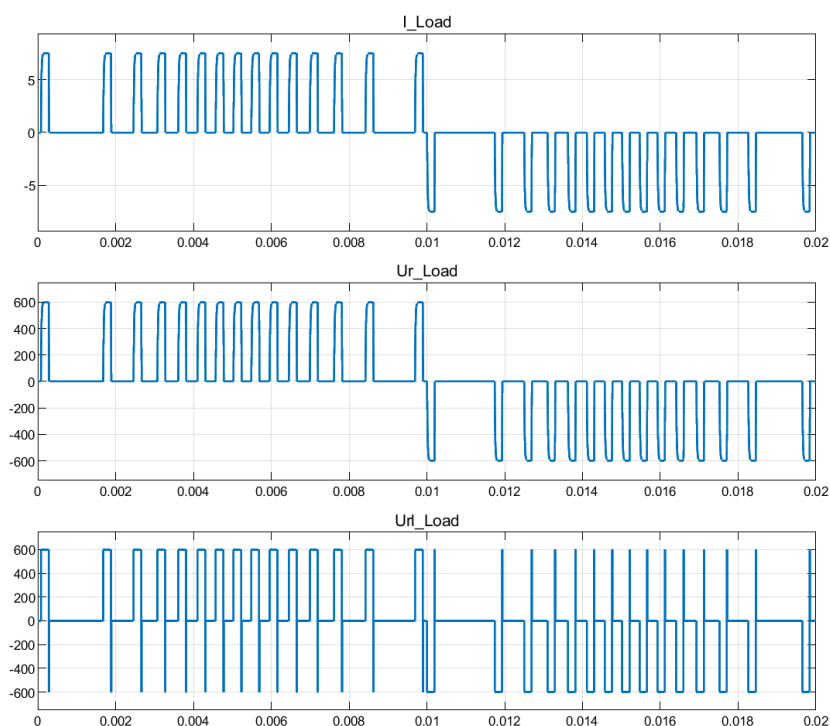


Рис. 10. Результаты моделирования: первая диаграмма - ток нагрузки; вторая диаграмма - напряжения на активной нагрузке; третья диаграмма – напряжения на активно-индуктивной нагрузке

Полученные диаграммы выходного импульсного напряжения АИН с ЧИМ (рис. 9 и 10) показали, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения в 3 раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения. Это приводит к значительному снижению динамических потерь в транзисторах АИН по сравнению с АИН с ШИМ, т.к. мощность динамических потерь прямо пропорциональна частоте модуляции [15].

Заключение. Модель однофазного двухуровневого АИН с ЧИМ реализована в среде MATLAB R2019a с использованием блоков из библиотеки Simulink/Simscape. Полученные диаграммы выходного импульсного напряжения АИН с ЧИМ показали, что частота модуляции по краям полупериодов выходного импульсного напряжения в 3 раза меньше, чем в середине полупериодов выходного импульсного напряжения, что приводит к значительному снижению динамических потерь в транзисторах АИН по сравнению с АИН с ШИМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев А. Визуальное моделирование в среде MatLab. Учебный курс. С.-Петербург-Москва-Харьков-Минск: Питер. 2000. 432 с.
2. Довудов С.У., Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 345–355.
3. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №3. С. 144-152.

4. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя //Всерос. научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири» (Иркутск, 22-26 апреля 2019 г.): труды. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. 2019. Т.1. С. 3-6.
5. Дунаев М.П. Силовые электронные преобразователи электростанций: учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. 2016. 116 с.
6. Дьяконов В.П. MATLAB и Simulink для радиоинженера. М.:ДМК Пресс. 2011. 976 с.
7. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи. СПб: Питер. 2003. С. 12-13.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс. 2008. 288 с.
9. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes // Energy Conversion and Management. 2011. vol. 52. Pp. 1114-1128.
10. Faiz J., Shahgholian G. Modeling and simulation of a three-phase inverter with rectifier-type nonlinear loads // Armenian Journal of Physics. 2009. vol. 2. issue 4. Pp. 307-316.
11. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem // Electrical, Control and Communication Engineering. 2013. vol. 2. issue 1. Pp. 20–26. doi.org/10.2478/ecce-2013-0003
12. Perutka K. MATLAB for Engineers - Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics, Edited. 2011. 512 p.
13. Villanueva E., Correa P., Rodríguez J., Pacas M. Control of a singlephase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems // Industrial Electronics, IEEE Transactions. 2009. vol. 56. Pp. 4399-4406.
14. Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter // Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2003. APEC'03. Eighteenth Annual IEEE. 2003. Pp. 51-57.
15. Xiao B., Hang L., Mei J., Riley C., Tolbert L. M., Ozpineci B. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid-Connected Applications // Industry Applications, IEEE Transactions. 2015. vol. 51. Pp. 1722-1731.

UDK 621.314

**SIMULATION OF THE SINGLE-PHASE TWO-LEVEL
AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER
WITH FREQUENCY-PULSE MODULATION**

Mikhail P. Dunaev

Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: mdunaev10@mail.ru

Sarfaroz U. Dovudov

Graduate student, e-mail: dsu_1991@mail.ru

Irkutsk National Research Technical University (ISTU)

83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia

Abstract. The scientific article is devoted to modeling a single-phase two-level voltage inverter (AIV) with pulse-frequency modulation (PFM). The model is implemented in MATLAB R2019a using blocks from the Simulink/Simscape library. The basic elements of the Simscape library are described. A pulse-frequency modulation (PFM) scheme was developed and modeled using blocks from the Simscape library. The obtained PFM diagrams showed that the frequency in the middle of the PFM period is 3 times higher relative to the edges. The current and voltage diagrams of the active and active-inductive load in the AIV are also obtained.

Keywords: pulse-frequency modulation; pulse-width modulation; frequency; simulation.

References

1. Gul'tyayev A. Vizual'noye modelirovaniye v srede MatLab [Visual modeling in MatLab]. St. Petersburg-Moscow-Kharkov-Minsk. Piter = Petersburg. 2000. 432 p. (in Russian).
2. Dovudov S.U., Dunaev M.P. Analiz energeticheskikh pokazateley impul'snykh preobrazovateley [Analysis of energy indicators of pulse converters] // Vestnik IrGTU = ISTU Bulletin. 2020. Vol. 24. № 2. Pp. 345–355. (in Russian).
3. Dunaev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye skhemy chastotno-impul'snogo preobrazovatelya [Simulation of the frequency-pulse converter circuit] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. T. 3. Irkutsk. MESI SO RAN. 2019. Pp. 144-152. (in Russian).
4. Dunaev MP, Dovudov SU. Modelirovaniye skhemy shirotno-impul'snogo preobrazovatelya [Modeling a Pulse-Width Converter Circuit] // Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyax Sibiri: Trudy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 22-26 April 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University. 2019. vol. 1. Pp. 3–6. (in Russian).
5. Dunaev M.P. Silovye elektronnyye preobrazovateli elektrostantsiy [Power electronic converters in power plants]. Irkutsk. Izd-vo IRNITU = IRNITU Publish. 2016. 116 p. (in Russian).

6. D'yakonov V. P. MATLAB i Simulink dlya radioinzhenera [MATLAB and Simulink for a radio engineer]. Moscow. DMK Press = DMK Press. 2011. 976 p. (in Russian).
7. Pronin M.V., Vorontsov A.G. Silovye polnost'yu upravlyayemye poluprovodnikovye preobrazovateli [Power fully controlled semiconductor converters]. St. Petersburg. Piter = Petersburg. 2003. Pp. 12-13. (in Russian).
8. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow. DMK Press = DMK Press. 2008. 288 p. (in Russian)
9. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes // Energy Conversion and Management. 2011. vol. 52. Pp. 1114-1128.
10. Faiz J., Shahgholian G. Modeling and simulation of a three-phase inverter with rectifier-type nonlinear loads // Armenian Journal of Physics. 2009. vol. 2. issue 4. Pp. 307-316.
11. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem // Electrical, Control and Communication Engineering. 2013. vol. 2. issue 1. Pp. 20–26. doi.org/10.2478/ecce-2013-0003
12. Perutka K. MATLAB for Engineers - Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics, Edited. 2011. 512 p.
13. Villanueva E., Correa P., Rodríguez J., Pacas M. Control of a singlephase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems // Industrial Electronics, IEEE Transactions. 2009. vol. 56. Pp. 4399-4406.
14. Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter // Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2003. APEC'03. Eighteenth Annual IEEE. 2003. Pp. 51-57.
15. Xiao B., Hang L., Mei J., Riley C., Tolbert L. M., Ozpineci B. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid-Connected Applications // Industry Applications, IEEE Transactions. 2015. vol. 51. Pp. 1722-1731.

УДК 519.711.2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ БОКСА И ДЖЕНКИНСА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАБОТЫ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Подкорытов Алексей Александрович

Аспирант, e-mail:podkorytovleha@mail.ru

Куцый Николай Николаевич

Д.т.н., профессор, e-mail:v20@istu.edu

Институт информационных технологий и анализа данных,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83

Аннотация. В статье рассматривается разработка модели, учитывающей динамику работы топочного устройства котельного агрегата. Применена методика Д.Ж. Бокса и Г. Дженкинса для идентификации процесса производства пара. В качестве объекта исследования выбран котельный агрегат, который является достаточно сложным, так как представляет из себя динамический стохастический объект с неконтролируемыми возмущающими воздействиями. Статистическими методами разработана модель, которая может быть использована для прогнозирования разрежения в топке котла.

Ключевые слова: топочное устройство, расход вторичного воздуха, разрежение в топке, стохастическая модель, идентификация, оценивание, диагностическая проверка.

Цитирование: Подкорытов А.А., Куцый Н.Н. Применение методики Бокса и Дженкинса для идентификации работы газовоздушного тракта котельного агрегата // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 2 (18). С. 144 -150 DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.012

Введение. В данной статье рассмотрена методика Бокса и Дженкинса или так называемая интегрированная модель авторегрессии и скользящего среднего - ARIMA. Это стандартизированная статистическая модель для прогнозирования и анализа временных рядов. Методика Бокса и Дженкинса активно используется для анализа и прогнозирования временных рядов в области экономики, финансов, медицине. Однако использование данной методики для построения динамических стохастических моделей применительно к процессам теплоэнергетики применяется впервые.

В качестве примера применения методики Бокса и Дженкинса в области теплоэнергетики авторами статьи разработана модель влияния расхода вторичного воздуха на разрежение [1]. Данные для исследования собраны в течение длительного времени наблюдений за нормальным ходом процесса выработки пара, подвергнуты статистическому анализу.

Косвенным параметром, определяющим расход вторичного воздуха, принят ток, потребляемый дутьевыми вентиляторами ДВ-А и ДВ-Б. В качестве исследуемых данных выбраны временные ряды, собранные в течение длительного времени наблюдений за

нормальным ходом процесса выработки пара на паровом котле марки БКЗ-420-140[2]. Данные получены на Ново-Иркутской ТЭЦ. Исследуемые данные содержат 1800 значений параметров с частотой дискретизации 10 секунд (около 5 часов). Всего в период пассивного эксперимента контролировались следующие технологические параметры:

- суммы рабочих токов дутьевых вентиляторов ДВ-А, ДВ-Б(А);
- разрежение в топке с левой стороны (мм в.д. ст.);

Данные параметры выбраны для исследования, поскольку работа дутьевого вентилятора непосредственно оказывает влияние на работу топочного устройства.

Поскольку измеряемые значения данных параметров находятся в разных диапазонах. Для дальнейшего анализа необходимо провести масштабирование временных рядов. Для этого производим процедуру стандартизации для каждого временного ряда [3].

В качестве примера (рис. 1) приведены временные ряды: сумма рабочих токов дутьевых вентиляторов ДВ-А, ДВ-Б и разрежение в топке слева в стандартизированном виде.

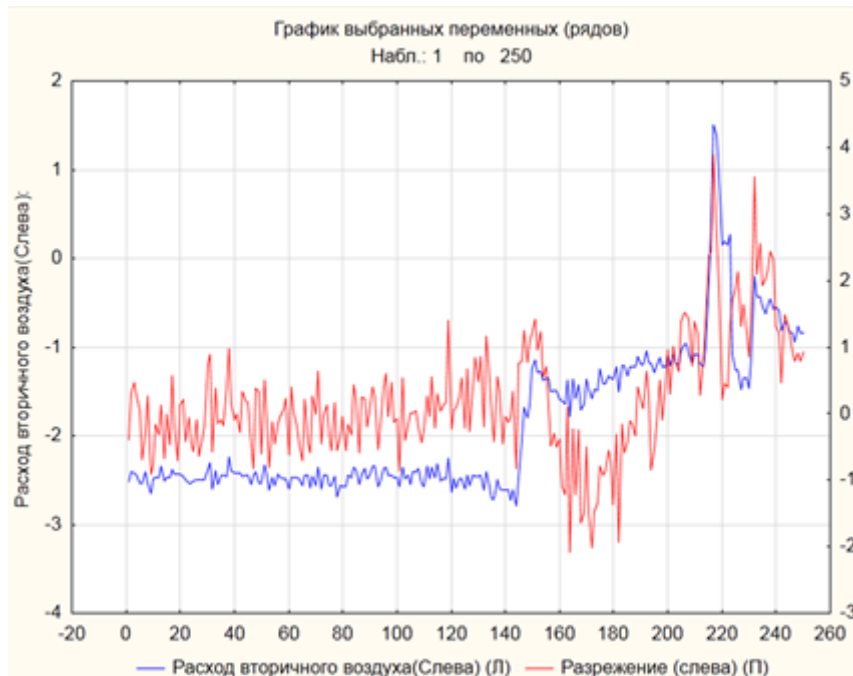


Рис. 1. График временных рядов разрежения в топке – расход вторичного воздуха

С целью приведения указанных выше временных рядов к стационарному виду, согласно методике [4], для каждого ряда получены разностные временные ряды с помощью оператора взятия разностей:

$$x_t = \nabla^d X_t; \quad y_t = \nabla^d Y_t \quad \text{при} \quad d > 0, \quad (1)$$

где d – порядок разности; x_t, y_t – нормированные значения временных рядов:

$$x_t = (X_t - \bar{X}_t) / \sigma_x, \quad y_t = (Y_t - \bar{Y}_t) / \sigma_y, \quad (2)$$

в которых $\bar{X}_t, \bar{Y}_t$ – средние значения ряда, σ_x, σ_y – среднеквадратичное отклонение.

Приведение рядов к стационарному виду позволяет использовать метод взаимных корреляционных функций для определения в структуре модели таких времен запаздываний, для которых коэффициенты связи между расходом вторичного воздуха и разрежением в топочной камере значимы.

В качестве примера на рис. 2 приведен график взаимно-корреляционной функции $R_{xy}(k)$ между наблюдаемыми рядами (суммы рабочих токов дутьевых вентиляторов ДВ-А, ДВ-Б) и рядом разрежением в топке с левой стороны), полученными в результате обработки статистического материала.

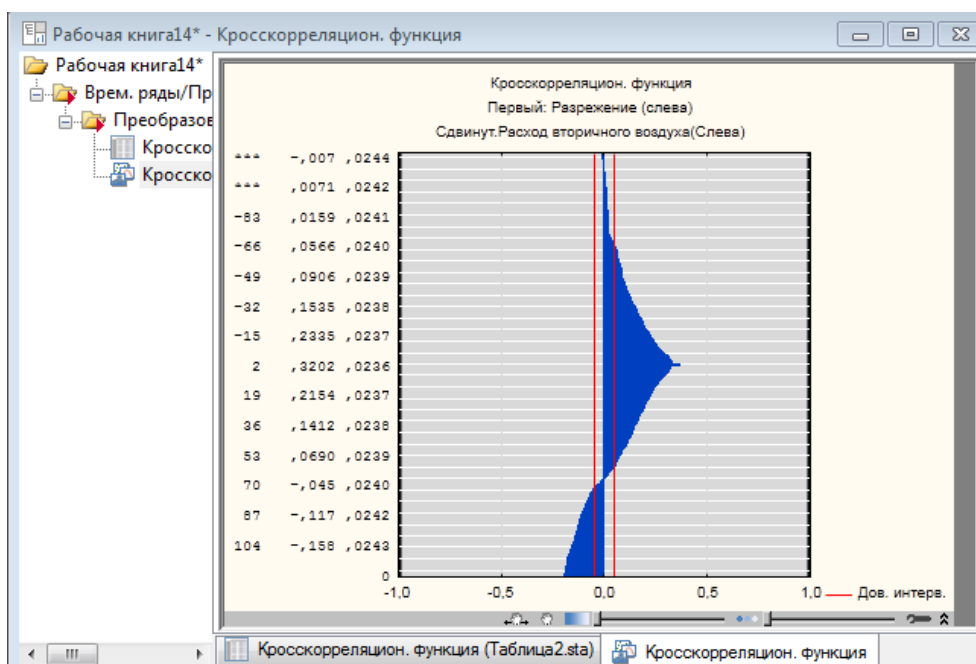


Рис. 2. Взаимно корреляционная функция разрежения в топке

Визуальный анализ этого графика не позволяет сделать однозначного вывода о тех временных интервалах, при которых расход вторичного воздуха с левой стороны существенно влияет на разрежение в топке слева, т.к. механизм взаимодействия завуалирован коррелированностью значений входного ряда, но помогает определить значимость коэффициентов взаимной корреляции [5].

Для устранения эффекта коррелированности произведем предварительную идентификацию исследуемых временных рядов для установления соответствия выбранного класса модели с имеющимися экспериментальными данными. Основным критерием идентификации является поведение автокорреляционной и частной автокорреляционной функций. Построим для исследуемых временных рядов модели авторегрессии и скользящего среднего (АРСС):

$$\alpha_t = x_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i x_{t-i} + \sum_{j=1}^q \Theta_{t-j} \alpha_{t-j}; \quad (3)$$

$$\beta_t = y_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \Theta_{t-j} \beta_{t-j}. \quad (4)$$

где α_t , β_t – выровненные ряды, соответственно, для входных и выходных разностных рядов;

Φ_i – значение параметров для авторегрессионной модели;

Θ_{t-j} – значения параметров для модели скользящего среднего;

p – порядок модели авторегрессии;

q – порядок модели скользящего среднего [6].

Предварительная идентификация показала, что разрежение в топке слева хорошо описывается моделью авторегрессии третьего порядка АРСС (3 0 0) $p=3$; $q=0$. Временной ряд вторичного расхода воздуха слева описывается моделью авторегрессии первого порядка и скользящего среднего первого порядка АРСС (1 1 0) $p=1$; $q=1$.

Далее для новых временных рядов построим взаимно корреляционную функцию (рис. 3)

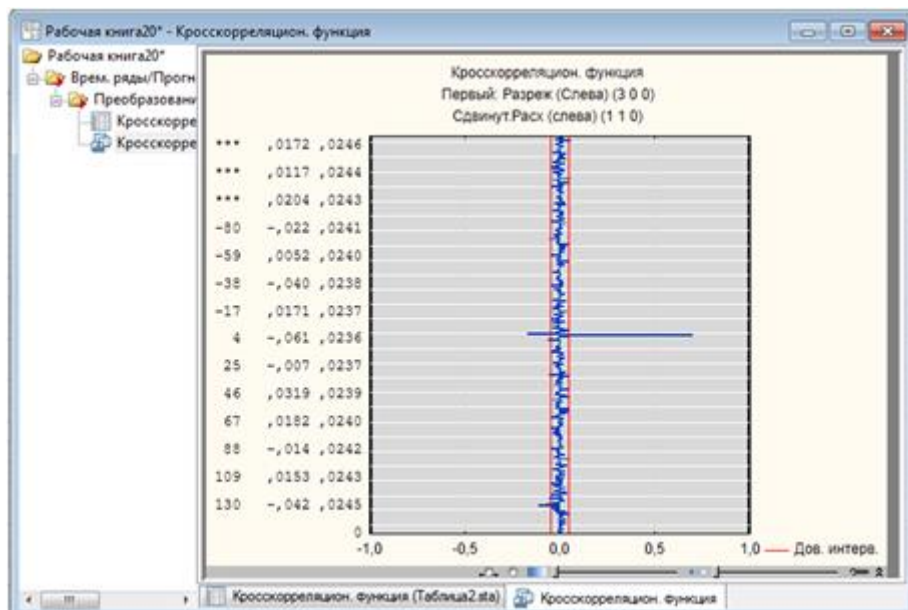


Рис. 3. Взаимно корреляционная функция рядов после предварительной идентификации

Для получения оценок p , q , Φ_i был применен нелинейный алгоритм наименьших квадратов.

Привязка модели к наблюдаемым значениям временных рядов осуществляется в несколько этапов: сначала делается пробная идентификация на основе анализа приближенной функции отклика на единичный импульс, затем применяется процедура нелинейного оценивания пробной модели и диагностическая проверка с использованием критерия согласия χ^2 [7].

Динамические стохастические модели влияния вторичного воздуха с левой стороны на разрежение в топке слева получены с использованием методики Бокса-Дженкинса в классе моделей $y_t = \delta^{-1}(B)\omega(B) \cdot x_{t-b} + n_t$, где B – оператор сдвига назад на один шаг, b – параметр запаздывания,

$$\delta(B) = 1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r; \quad (5)$$

$$\omega(B) = \omega_0 - \omega_1 B - \omega_2 B^2 - \dots - \omega_s B^s. \quad (6)$$

Ниже представлена разработанная динамическая стохастическая модель:

Зависимость разрежения в топке с левой стороны от расхода вторичного воздуха:

$$\begin{aligned} & (1 - 0,366 B - 0,343 B^2 - 0,192 B^3) \nabla P_{\text{слева}}(t) = \\ & \quad \pm 0,023 \quad \pm 0,023 \quad \pm 0,023 \\ & = -2,29 \nabla f(t-0) - 0,131 \nabla f(t-30) - 0,166 \nabla f(t-128) - 0,298 B^2 \nabla f(t-129) - \\ & \quad \pm 0,065 \quad \pm 0,065 \quad \pm 0,065 \quad \pm 0,065 \\ & 0,358 \nabla f(t-223) + 0,151 \nabla f(t-299) + n_t \quad (7) \\ & \quad \pm 0,065 \quad \pm 0,065 \end{aligned}$$

Значение шума описывается моделью:

$$(1 - 0,077 B + 0,073 B^2) * n_t = a_t \quad (8)$$

$\pm 0,025 \quad \pm 0,025$

где ∇ – первые разности, а значения под коэффициентами – их стандартные ошибки.

Полученная модель анализируется на адекватность реального процесса влияния расхода вторичного воздуха на разрежение в топке с помощью диагностической проверки [8], осуществляемой в два этапа: сначала вычисляется χ^2 – статистика для значений автокорреляционной функции остаточных ошибок $r_{aa}(k)$ как $Q = (N-s-b-r); \sum_{k=1}^k r_{aa}^2(k)$,

где N – число наблюдений,

k – максимальная задержка автокорреляций и взаимных корреляций,

S – число «правосторонних» параметров динамической стохастической модели,

$г$ – число «левосторонних» параметров, далее вычисляется χ^2 статистика с использованием взаимных корреляционных функций $r_{aa}(k)$ между выровненным входным рядом α_t и рядом остаточных ошибок, а также как $H = (N-s-b-r) \sum_{k=1}^k r(k)$.

В первом случае Q сравнивается с χ^2 – распределением с $K-p-q$ степенями свободы, а во втором – H сравнивается с χ^2 – распределением с $K-r-S$ степенями свободы.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов χ^2 – статистики диагностической проверки по автокорреляционной и взаимной корреляционной функциям.

Таблица 1. Значения коэффициентов χ^2 статистики

Вход	Выход	Число степеней свободы	H	Число степеней свободы	Q
$(I_a + I_b)$	Разр _{лев}	30	25,15	30	43,8

Диагностическая проверка по автокорреляционным и взаимно-корреляционным функциям с использованием значений χ^2 статистики не дает оснований в сомнении адекватности модели [9].

Заключение. В результате проведенных исследований получена модель, которая может быть использована для прогноза разрежения в топке котельного агрегата в зависимости от расхода вторичного воздуха, подаваемого в топочное устройство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аракелян Э.К., Пикина Г.А. Оптимизация и оптимальное управление. М.: Изд-во МЭИ. 2007. 408 с.
2. Волошенко А.В. Принципиальные схемы паровых котлов и топливоподач. Томск: Изд-во ТПУ. 2011. 100 с.
3. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. 4-е изд. М.: Издательский Дом МЭИ. 2007. 352 с.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Изд. Дом МЭИ. 2005. 400 с.
5. Серов Е.П., Корольков Б.П. Динамика парогенераторов. М.: Изд-во Энергоиздат. 1981. 409 с.
6. Хапусов В.Г. Моделирование систем. Иркутск: Изд-во ИрННТУ. 2007. 212 с.
7. Хапусов В.Г., Баяв А.В. Смешанные авторегрессионные модели и прогнозирование процесса выработки пара // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 12. С. 29–34.

8. Шорохов В.А., Смольников А.П. Разработка динамической модели многосвязной АСР пылеугольного блока с прямым вдуванием пыли // Теплоэнергетика. 2009. № 10. С. 56–61.
 9. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time Series Analysis, Forecasting and Control, San Francisco: Holden-Day, 1976.
-

UDK 519.711.2

APPLICATION OF THE BOXING AND JENKINS TECHNIQUE FOR IDENTIFICATION OF THE OPERATION OF THE GAS-AIR TRACT OF THE BOILER UNIT

Alexey A. Podkorytov

Postgraduate student, e-mail: podkorytovleha@mail.ru

Nikolay N. Kutsy

Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: v20@istu.edu

Institute of Information Technology and Data Analysis,

Irkutsk National Research Technical University,

str. Lermontov, 83, 664074, Irkutsk

Abstract. The article discusses the development of a model that takes into account the dynamics of the operation of the combustion device of the boiler unit. The technique of D.Zh. Box and G. Jenkins to identify the steam production process. As the object of research, a boiler unit was chosen, which is quite complex, since it is a dynamic stochastic object with uncontrolled disturbing influences. A model has been developed by statistical methods that can be used to predict the vacuum in the boiler furnace.

Keywords: combustion device, secondary air flow rate, vacuum in the combustion chamber, stochastic model, identification, estimation, diagnostic check.

References

1. Arakelyan E.K., Pikina G.A. Optimizacija i optimal'noe upravlenie [Optimization and optimal control]. M.: Izd-vo Moskovskogo jenergeticheskogo instituta = Moscow: Moscow Energy Institute Publisher. 2007. 408 p. (in Russian).
2. Voloshenko A.V. Principial'nye shemy parovyh kotlov i toplivopodach [Schematic diagrams of steam boilers and fuel supplies]. Tomsk: Izd-vo TPU = Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2011. 100 p. (in Russian).
3. Pletnev G.P. Avtomatizacija tehnologicheskikh processov i proizvodstv v teplojenergetike. 4-e izd. [Automation of technological processes and production in heat power engineering. 4th ed.]. M.: Izd-vo Moskovskogo jenergeticheskogo instituta = Moscow: Moscow Energy Institute Publisher. 2007. 352 p. (in Russian).
4. Rotach V.Ya. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. [Automatic control theory]. M.: Izd-vo Moskovskogo jenergeticheskogo instituta = Moscow: Moscow Energy Institute Publisher. 2005. 400 p. (in Russian).

5. Serov E.P., Korolkov B.P. Dinamika parogeneratorov [Steam generator dynamics]. M.: Izd-vo Jenergoizdat = Moscow: Energoizdat Publishing House. 1981. 409 p. (in Russian).
6. Khapusov V.G. Modelirovanie system [System modeling]. Irkutsk: Izd-vo IrNITU = Irkutsk: Publishing House of Irkutsk National Research Technical University. 2007. 212 p. (in Russian).
7. Khapusov V.G., Baev A.V. Smeshannye avtoregressionnyye modeli i prognozirovanie processa vyrabotki para [Mixed autoregressive models and forecasting of the steam generation process] // // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2014. № 12. Pp. 29–34. (in Russian).
8. Shorokhov V.A., Smolnikov A.P. Razrabotka dinamicheskoy modeli mnogosvjaznoj ASR pileugol'nogo bloka s prjamym vduvaniem pyli [Development of a dynamic model of a multiply connected ACS of a pulverized coal block with direct injection of dust] // Teplojenergetika = Heat power engineering. 2009. № 10. Pp. 56–61 (in Russian).
9. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time Series Analysis, Forecasting and Control, San Francisco: Holden-Day. 1976.