ISSN 2413-0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№2(30)/2023
6+

Information and mathematical **ISSN 2413 – 0133**

technologies in science and management **Scientific journal**

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 2 (30)

© Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук

2023

ISSN 2413 – 0133 Индекс E79114*

EDITORIAL BOARD	РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
Ablameyko S.V.	Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
Arshinskiy L.V.	Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Berestneva O.G.	Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
Boukhanovsky A.V.	Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
Bychkov I.V.	Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Woern H.	Вѐрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Voevodin V.V.	Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Wolfengagen V.E.	Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Gornov A.Y.	Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Gribova V.V.	Грибова В.В., чл.-корр. РАН, д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Groumpos P.	Грумпос П., Греция, University of Patras
Zorina T.G.	Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
Kazakov A.L.	Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Kalimoldaev M.N.	Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
Karpenko A.P.	Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Komendantova N.P.	Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, IIASA
Kureichik V.V.	Курейчик В.В., д.т.н., профессор ЮФУ, Таганрог
Lis R.	Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
Massel L.V.	Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Moskvichev V.V.	Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, ФИЦ ИВТ
Ovtcharova J.	Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Popov G.T.	Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Sidorov D.N.	Сидоров Д.Н., д.ф-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Smirnov S.V.	Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Stennikov V.A.	Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Stylios C.	Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
Taratukhin V.V.	Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
Khamisov O.V.	Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Hodashinsky I.A.	Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
Chubarov L.B.	Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ФИЦ ИВТ

EXECUTIVE EDITORIAL	ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА		
Chief Editor Massel L.V.	Главный редактор	Массель Л.В.	д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Executive Editor Bakhvalova Z.A.	Выпускающий редактор	Бахвалова З.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Gaskova D.A.	Редактор	Гаськова Д.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Massel A.G.	Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Techn. Editor Popova M.D.	Техн. редактор	Попова М.Д.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Designer Pesterev D.V.	Дизайнер	Пестерев Д.В.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Адрес учредителя, издателя и редакции
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Сайт журнала - https://www.imt-journal.ru/

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (по состоянию на 29.03.2022) по научным специальностям 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.5; 2.4.5.
Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018.

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»
664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14
*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021 г.
Дата выхода 10.07.2023 г. Тираж 50 экз.

CC BY
© Издательство ИСЭМ СО РАН

Цена свободная. (6+)

Содержание

Методы и приложения искусственного интеллекта

Смирнов С.В., Семенова В.А. Эффективность редукции ограничений существования свойств в задаче идентификации признаков объекта **5**

Стрекалёв В.О., Грибова В.В. Разработка иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью на основе декларативной модели **14**

Виноградов Г.П., Шаронов Д.А. Моделирование алгоритмов позиционирования в сенсорной сети на основе DV-HOP **25**

Исаева О.С. Построение цифрового профиля устройств Интернета вещей **36**

Математическое моделирование

Чернавин П.Ф., Чернавин Н.П., Чернавин Ф.П. Оптимизационные модели подбора параметров технологических процессов на основе результатов машинного обучения **45**

Тукмаков А.Л., Щукин А.В., Харьков В.В., Тукмакова Н.А., Ахунов А.А., Тукмаков Д.А. Нестационарная двухмерная численная модель конвективно-пленочного охлаждения пластины на основе явной конечно-разностной схемы предиктор-корректор **57**

Боголюбов В.М., Бахтиева Л.У., Цыганов О.В. Имитационная модель параметрически возбуждаемого модуляционного микромеханического гироскопа **68**

Нгуен Т.Т., Бахтиева Л.У. О применимости математической модели Нобла к исследованию потенциала действия клеток миокарда **75**

Математические технологии

Баранов Н.А. Восстановление вектора скорости ветра по данным лидарного зондирования методом сплайн-аппроксимации **83**

Колосок И.Н., Коркина Е.С. Анализ рисков при функционировании агрегатора управления спросом на электроэнергию **98**

Аршинский Л.В., Гармышев В.В., Михеев М.С., Сафонов С.В. Расчёт комплексного показателя пожарной опасности в административных территориях Иркутской области **107**

Туктарова П.А., Давлетшина С.М., Хамидуллина Д.И. Применение регрессионных моделей для определения надежности контрагента **121**

Информационные технологии

Бычков И.В., Клименко О.А., Рычкова Е.В., Шабальников И.В. Вопросы ресурсов корпоративной информационной системы СО РАН: история и современное состояние **129**

Амирасланов И.В., Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Программное средство извлечения сущностей из семантически аннотированных табличных данных **138**

Исхаков А.Ю., Исхаков С.Ю. Повышение эффективности систем защиты информации с помощью категоризации событий безопасности **152**

Content

Methods and applications of artificial intelligence

Smirnov S.V., Semenova V.A. Efficiency of properties existence constraints reduction in the problem of object attributive identification **5**

Strekalev V.O., Gribova V.V. Development of an immersive virtual simulator with biofeedback based on a declarative model **14**

Vinogradov G.P., Sharonov D.A. Modeling of positioning algorithms in a sensor network based on DV-HOP **25**

Isaeva O.S. Building a digital profile of IoT devices **36**

Mathematical modeling

Chernavin P.F., Chernavin N.P., Chernavin F.P. Optimization models for selecting parameters of technological processes based on the machine learning results **45**

Tukmakov A.L., Schukin A.V., Kharkiv V**.V., Tukmakova N.A., Akhunov A.A., Tukmakov D.A.** Non-stationary two-dimensional numerical model of convective-film cooling of a plate based on explicit finite difference predictor-corrector scheme **57**

Bogolyubov V.M., Bakhtieva L.U., Tsyganov O.V. Simulation model of a parametrically excited modulation micromechanical gyroscope **68**

Nguen Thi Thu, Bakhtieva L.U. On the applicability of the Noble mathematical model to the study of the action potential of myocardial cells **75**

Mathematical technologies

Baranov N.A. Recovering of the wind speed vector from lidar sensing data using the spline approximation **83**

Kolosok I.N., Korkina E.S. Risk analysis of the Demand Response Aggregator **98**

Arshinskiy L.V., Garmyshev V.V., Mikheev M.S., Saphonov S.V. Calculation of a complex fire hazard indicator in the administrative territories of the Irkutsk region **107**

Tuktarova P.A., Davletshina S.M., Khamidullina D.I. Statement, formalization and implementation of the mathematical model of improvement of the system of work with contractors at the enterprise **121**

Information technology

Bychkov I.V, Klimenko O.A., Rychkova E.V., Shabalnikov I.V. Issues of resources of the corporate information system of the SB RAS: history and current state **129**

Amiraslanov I.V., Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. A tool for extraction of entities from semantically annotated tabular data **138**

Iskhakov A.Y., Iskhakov S.Y. Improving the efficiency of information protection systems by categorizing security events **152**

Методы и приложения искусственного интеллекта

УДК 519.677
DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.001

Эффективность редукции ограничений существования свойств в задаче идентификации признаков объекта

Смирнов Сергей Викторович, Семенова Валентина Андреевна

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН,
Россия, Самара, *smirnov@iccs.ru*

Аннотация. В статье рассматривается проблема учета знания об ограничениях существования в часто встречающейся на практике задаче выявления присущих объекту свойств (признаков, или атрибутов) из априори определяемого набора измеряемых у объекта свойств в случае неполноты и противоречивости результатов измерений. Ставится вопрос о возможности повысить производительность разработанного для решения этой задачи авторского методического обеспечения за счет сокращения размерности описания ограничений существования свойств, измеряемых у объекта. Естественной моделью ограничений существования является множество сущностей (например, признаков объекта) с двумя заданными на нём бинарными отношениями сосуществования – несовместимостью и обусловленностью; размерность такой модели определяется количеством сущностей и мощностью отмеченных экзистенциональных отношений. Показано, что желаемая редукция модели ограничений существования измеряемых у объекта свойств осуществима на основе выделения во множестве измеряемых свойств классов эквивалентности и определения расширенных бинарных отношений несовместимости и обусловленности на множестве выделенных классов. Количественная оценка эффективности редукции ограничений существования выполнена путём машинных имитационных статистических экспериментов. Самостоятельный интерес представляет примененная тактика имитационного моделирования, обусловленная многосвязной структурой ограничений существования, а также многоплановое использование для оценки надлежащего количества статистических испытаний неравенства Хёфдинга, устанавливающего экспоненциально убывающие оценки вероятности отклонений сумм независимых случайных величин от среднего этих сумм. Результаты проведенного исследования подтвердили значимость сокращения размерности модели ограничений существования и выявили характер зависимости получаемого выигрыша от параметров, определяющих конфигурацию указанных ограничений.

Ключевые слова: атрибутивная идентификация объекта, ограничения существования, классы эквивалентности, имитационное статистическое моделирование

Цитирование: Смирнов С.В. Эффективность редукции ограничений существования свойств в задаче идентификации признаков объекта / С.В. Смирнов, В.А. Семенова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2 (30). – С. 05-13. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.001.

Введение. Построение семантической модели объекта, определяющей его признаки, или, иначе говоря, состав присущих объекту свойств, актуальна в онтологическом анализе эмпирических данных [1], распознавании образов [2], структурном синтезе проектно-конструкторских решений (см., например, [3, 4]) и др. В подобных задачах идентифицируемый состав свойств объекта является подмножеством всех измерявшихся (в широком смысле, включая, в частности, использование экспертиз) у объекта свойств. При этом такая атрибутивная идентификация объекта существенно усложняется, если необходим учет априори заданных ограничений существования свойств (ОСС) [5-7] – бинарных отношений несовместимости и обусловленности на множестве измеряемых свойств.

Предложенная в [8, 9] методика выявления всех допустимых наборов признаков объекта включает логико-комбинаторный метод выбора «лучшего» из них на основе анализа достоверности эмпирических свидетельств о присущих объекту свойствах. В основе метода лежит ограниченный перебор всех пар свойств с обусловленностью и несовместимостью (О- и Н-

пар). Указанный там же способ увеличения производительности метода связан с редукцией описания ОСС [10]. Данная статья посвящена исследованию эффективности этой редукции методом имитационного статистического моделирования [11, 12].

1. Ограничения существования. Пусть g - идентифицируемый объект, M – множество измеряемых свойств, $P_g(x)$ – одноместный предикат «объекту g присуще свойство x», $x \in M$. Тогда можно дать следующие формальные определения экзистенциональных отношений, образующих ОСС:

– несовместимость E: $M \times M \to \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$, $E(x, y) \leftrightarrow P_g(x) \to \neg P_g(y)$, $x, y \in M$;
– обусловленность C: $M \times M \to \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$, $C(x, y) \leftrightarrow P_g(x) \to P_g(y)$, $x, y \in M$.

Наглядно ОСС представляет граф, в котором вершины представляют измеряемые у объекта свойства, ребра – несовместимость пары связываемых свойств, дуги – обусловленность свойства, находящегося в стоке дуги, свойством, представленным её вершиной-истоком (рис. 1).

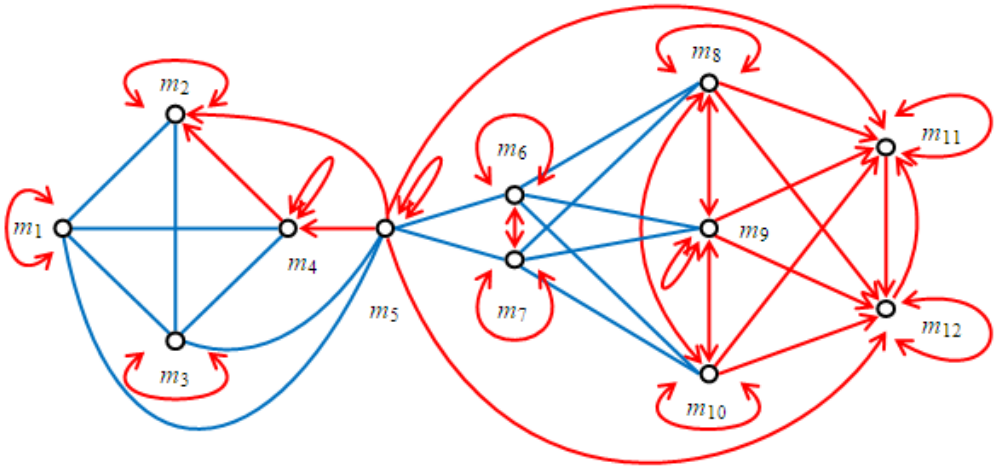


Рис. 1. Пример описания ограничений существования:вершина графа – свойство; ребро – несовместимость, дуга – обусловленность пары свойств; двунаправленная дуга – обозначение 2-х встречных дуг и естественной самообусловленности свойства

Обусловленность рефлексивна, несимметрична и транзитивна, а несовместимость антирефлексивна, симметрична и нетранзитивна, но характеризуется так называемой «транзитивностью относительно обусловленности» (далее — E-транзитивность), что означает $\forall\, x, y, z \in M$: $C(x, y) \wedge E(y, z) \to E(x, z)$.

Наличие ОСС ограничивает поиск признакового описания объекта лишь среди подмножеств $X \subseteq M$, которые замкнуты и совместимы [5-7], т.е. $\forall x \in X$: $(\exists y \in M,\ x \neq y$: $C(x, y)) \to y \in X$ и $\forall x \in X$: $(\exists y \in M, x \neq y$: $E(x, y)) \to y \notin X$.

2. Редукция описания ограничений существования. Легко видеть, что отношение обусловленности $C\,(x, y)$ индуцирует на множестве измеряемых свойств M бинарное отношение взаимообусловленности MC: $M \times M \to \{\mathbf{True}, \mathbf{False}\}$, $MC(x, y) \leftrightarrow C(x, y) \wedge C(y, x)$, которое включает пары взаимообусловленных свойств (ВЗО-пары).

Поскольку MC рефлексивно, симметрично и транзитивно, то оно разбивает множество M на классы эквивалентности [13, 14], которыми являются группы взаимообусловленных свойств (ВЗО-групп).

Опираясь на транзитивность отношения C и E-транзитивность отношения E, нетрудно определить и доказать существование расширенных отношений обусловленности C^* и несовместимости E^* на множестве классов эквивалентности M^*, т.е. на множестве ВЗО-групп измеряемых свойств [6, 10].

Предложенный в [8] метод атрибутивной идентификации объекта по неполным и противоречивым эмпирическим данным реализуется практически одинаково для описания ОСС в формах (M, E, C) и (M^*, E^*, C^*). Полезный эффект перехода к (M^*, E^*, C^*) выражается в сокращении размерности задачи. Механизм такой редукции иллюстрирует рис. 2:

– уменьшается количество сущностей, состоящих в расширенных отношениях обусловленности и несовместимости, – вместо свойств рассматриваются их ВЗО-группы: $|M^*| \le |M|$ (см рис. 2а);
– уменьшается количество пар, состоящих в экзистенциональных отношениях – вместо О- и Н-пар свойств анализируются возникающие О- и Н-пары ВЗО-групп $|E^*| \le |E|$, $|C^*| \le |C|$ (см. рис. 2б и 2в).

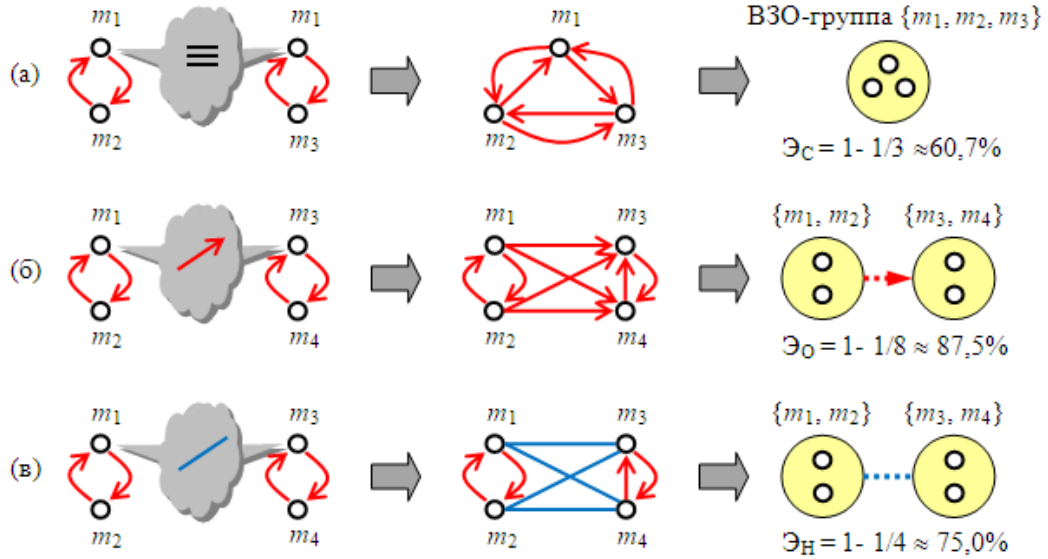


Рис. 2. Примеры редукции ограничений существования свойств идостигаемый при этом выигрыш (самообусловленность свойств опущена,расширенные экзистенциональные связи показаны пунктирной линией)

На рис. 3 приведено редуцированное описание ОСС, исходный вид которого представлен на рис. 2. Очевидно, что масштабы редукции определяются характеристиками исходной модели ОСС и, прежде всего, мощностью множества ВЗО-пар в СИС.

3. Организация вычислительных экспериментов. Количественно эффект редукции ОСС оценивался в имитационных статистических экспериментах, когда при заданной величине $|M|$ структура ОСС рандомизировалась при варьировании долями ВЗО-, О-, Н-пар, и исследовался выигрыш от редукции ОСС – среднее относительное уменьшение количества сущностей $Э_C = 1 - |M^*|/|M|$ (см. рис. 2а) и их экзистенциональных связей – обусловленностей $Э_o = 1 - |C^*|/|C|$ (см. рис. 2б) и несовместимостей $Э_H = 1 - |E^*|/|E|$ (см. рис. 2в).

Важный в подобных исследованиях вопрос о надлежащем количестве статистических испытаний предпочтительно решать на основе неравенства Хёфдинга [15, 16]:

$$Pr\{|S_N - E(S_N)| \ge N\varepsilon\} \le 2\mathbf{exp}\left(-\frac{2N^2\varepsilon^2}{\sum_{i=1}^{N}(b_i - a_i)^2}\right), \qquad (1)$$

где S_N – сумма независимых случайных величин $X_1, X_2, \ldots, X_N$, таких, что $a_i \le X_i \le b_i$ почти наверняка, $E(S_N)$ – математическое ожидание величины S_N, $\varepsilon > 0$. Неравенство Хёфдинга даёт

экспоненциально убывающие оценки вероятности отклонений сумм независимых случайных величин от среднего этих сумм. Эти оценки точнее, чем аналогичные, полученные с использованием первых или вторых моментов (например, неравенства Маркова, Чебышёва), обеспечивающие лишь степенной закон убывания указанных отклонений.

Учитывая, что оцениваемые показатели $Э_С$, $Э_О$, $Э_Н$ лежат в диапазоне [0, 1] и рассчитываются, как средние значения наблюдавшихся в испытаниях относительных сокращений соответствующих характеристик, редуцированных ОСС, на основании неравенства (1) нетрудно получить

$$N \geq \frac{1}{2\varepsilon^2}\ln\frac{2}{\delta},\ \forall\ \delta, \varepsilon \in (0, 1),$$

т.е. утверждать, что при количестве статистических испытаний N получаемые оценки показателей $Э_С$, $Э_О$, $Э_Н$ с вероятностью не меньше $1 - \delta$ будут аппроксимировать их действительные значения с абсолютной погрешностью ε.

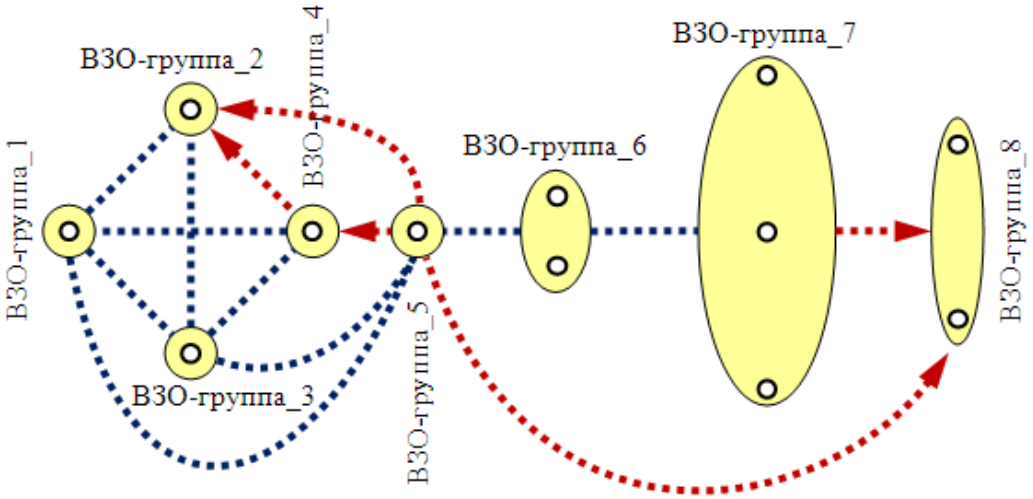


Рис. 3. Пример [8] описания ограничений существования свойств в форме расширенных отношений обусловленности и несовместимости на множестве групп взаимообусловленных измеряемых свойств (описание обозначений см. на рис. 2)

В табл. 1 приведены варианты соответствующего расчета, демонстрирующие чувствительность минимально необходимого количества испытаний к изменению параметров достоверности и погрешности оценок.

Таблица 1. Количество статистических испытаний для оценки исследуемых показателей

Достоверность оценок $1 - \delta$	Абсолютная погрешность оценок ε	Нижняя граница минимально необходимого количества испытаний	Использовавшееся в экспериментах количество испытаний
0,90	0,05	$200 \cdot \ln 20 \approx 599{,}1$	600
0,90	0,01	$5000 \cdot \ln 20 \approx 14978{,}7$	15000
0,95	0,01	$5000 \cdot \ln 40 \approx 18444{,}4$	18450

Особенность имитации ОСС в исходной форме (M, E, C) заключается в естественных ограничениях на количество одновременно присутствующих ВЗО-, О- и Н-пар - $N_{ВЗО\text{-}п}$, $N_{О\text{-}п} = |C|$, $N_{Н\text{-}п} = |E|$ соответственно:

$$2N_{ВЗО\text{-}п} + N_{О\text{-}п} + 2N_{Н\text{-}п} \leq |M|\cdot(|M| - 1),$$

где $N_{ВЗО\text{-}п}, N_{Н\text{-}п} \in \{0, 1, 2, \ldots, |M|\cdot(|M| - 1)/2\}$, $N_{О\text{-}п} \in \{0, 1, 2, \ldots, |M|\cdot(|M| - 1)\}$.

Кроме того, некоторые конфигурации ОСС (здесь и далее «конфигурация» – это сочетание параметров $|M|$, $N_{ВЗО\text{-}п}$, $N_{О\text{-}п}$, $N_{Н\text{-}п}$) в указанном смысле могут не существовать. Например,

легко проверить, что при $|M| = 3$ имеем $N_{\text{ВЗО-п}} \in \{0, 1, 3\}$, т.к. при попытке построить ОСС с $N_{\text{ВЗО-п}} = 2$ вследствие транзитивности обусловленности количество ВЗО-пар закономерно становится равным 3. Аналогично при $|M| = 3$ добавление 5-й обусловленности в ОСС, где существование свойств определяется 4-мя О-парами, приводит к образованию ОСС с 6-ю О-парами, т.е. при указанном количестве измеряемых свойств имеем $N_{\text{О-п}} \in \{0, 1, 2, 3, 4, 6\}$. В присутствии обусловленностей подобные ограничения возникают и для Н-пар.

Отмеченная феноменология формирования ОСС потребовала выработки следующей, представляющей самостоятельный интерес, тактики имитационного статистического моделирования:

– имитация ОСС с заданными количествами ВЗО-, О- и Н-пар одновременно рассматривается как испытание Бернулли, успех которого констатирует существование требуемой конфигурации ОСС. Если N таких испытаний неудачны (здесь можно воспользоваться тем же значением необходимого числа испытаний, которое определено для «целевого» эксперимента с задачей наблюдения эффекта редукции ОСС, ибо результат испытания Бернулли можно интерпретировать как реализацию дискретной случайной величины с двумя возможными значениями – «0» и «1», которые, равно как и оцениваемые показатели эффективности редукции, принадлежат ограниченному диапазону [0, 1]), то эксперимент с ОСС, определяемой данными параметрами прекращается;
– при возникновении в результате имитации ОСС с заданным количеством ВЗО-, О- и Н-пар закономерного перехода ОСС в «состояние», характеризуемые иными значениями $N_{\text{ВЗО-п}}$, $N_{\text{О-п}}$, $N_{\text{Н-п}}$, разумно не считать эту фазу вычислительного эксперимента неудачей, которая заставляет повторить попытку имитации ОСС с заданными параметрами, а продолжить имитационный эксперимент (т.е. редуцировать «возникшую» ОСС с регистрацией соответствующих эффектов), накапливая статистику для ставшей актуальной конфигурации ОСС, и лишь затем обратиться к новой попытке имитации ОСС с целевыми параметрами. Фактически это означает «параллельное» выполнение экспериментов для всех актуальных конфигураций ОСС, требуя подготовки и использования в общем случае $N_{\text{ВЗО-п}} \times N_{\text{О-п}} \times N_{\text{Н-п}}$ организующих и регистрирующих структур, что, тем не менее, компенсируется сокращением вычислительных затрат на имитационное моделирование.

4. Результаты вычислительных экспериментов. Эффект уменьшения количества сущностей в редуцированных ОСС возникает целиком благодаря наличию в исходном описании ОСС ВЗО-пар и усиливается вследствие их пересечений (см. рис. 2). Поэтому эксперименты для количественной оценки этого эффекта, т.е. определения показателя $Э_С$, выполнялись для ОСС, характеризуемых параметрами $N_{\text{ВЗО-п}} \in \{0, 1, 2,\ldots, |M|\cdot(|M| - 1)/2\}$, $N_{\text{О-п}} = 2N_{\text{ВЗО-п}}$ и $N_{\text{Н-п}} = 0$. При этом априори очевидно, что при $N_{\text{ВЗО-п}} = 0$ эффект отсутствует ($Э_С = 0$), а при $N_{\text{ВЗО-п}} = |M|\cdot(|M| - 1)/2$ максимален: $Э_С^{\max} = 1 - 1/|M|$. Таким образом, область существования значений $Э_С$ на графике зависимости этого показателя от доли $q_{\text{ВЗО-п}} = N_{\text{ВЗО-п}} / (|M|\cdot(|M| - 1)/2)$ в значительной степени определена, что иллюстрирует рис. 4а. Результат конкретного исследования для $|M| = 20$ представлен на рисунке 4б.

Исследования показали, что с увеличением в ОСС доли ВЗО-пар наблюдается почти экспоненциальный с насыщением рост выигрыша, оцениваемого показателем $Э_С$. Подобная затухающая экспонента характерна для отклика систем с отрицательной обратной связью, хотя в области насыщения наблюдается множество «разрывов» – отсутствие конфигураций ОСС с определенным количеством ВЗО-пар – и существенный разброс величины выигрыша. Такая картина выигрыша $Э_С$ принципиально не меняется при варьировании количеством измеряемых свойств M.

На рисунке 5а приведен пример экспериментально установленного среднего относительного уменьшения количества обусловленностей $Э_О$ в редуцированных ОСС для $|M| = 20$ измеряемых свойств в зависимости от количества ВЗО-пар $N_{ВЗО\text{-}п}$ и доли О-пар $q_{О\text{-}п} = N_{О\text{-}п} / (|M|\cdot(|M| - 1))$ при $N_{Н\text{-}п} = 0$ в исходном представлении ОСС.

Выигрыш $Э_О$ сначала значительный (и тем выше, чем больше ВЗО-пар в исходном представлении ОСС), но довольно быстро снижается. Это можно объяснить тем, что при фиксированном $N_{ВЗО\text{-}п}$ рост $q_{О\text{-}п}$ происходит за счет О-пар, не пересекающихся с существующими ВЗО-парами (пересечение вызвало бы образование дополнительных ВЗО-пар, а их количество фиксировано) и не образующих новых ВЗО-пар, а обусловленности, определяемые такими «чистыми» О-парами, сохраняются в редуцированных ОСС в неизменном виде, сокращая выигрыш.

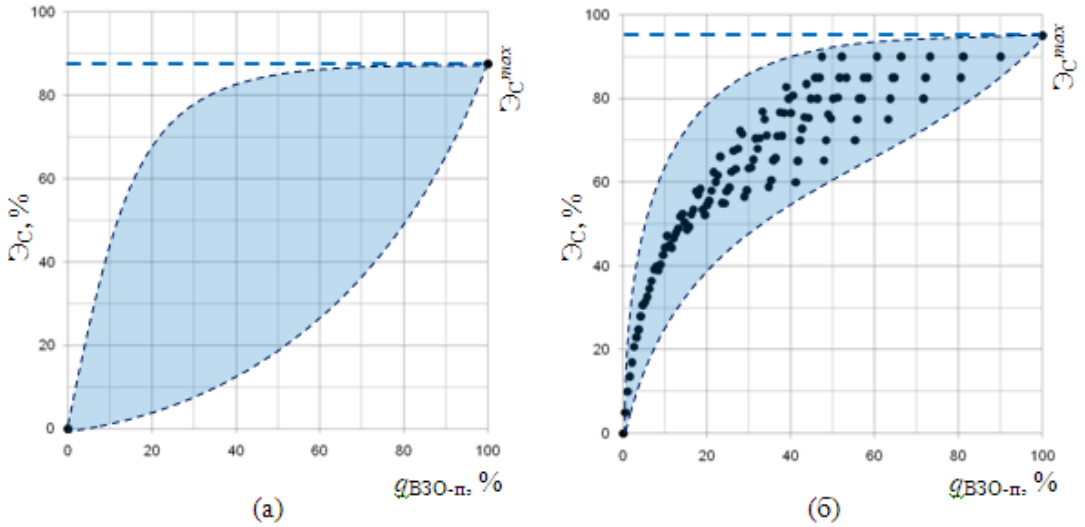


Рис. 4. Зависимость показателя $Э_С$ – среднего относительного уменьшения количества сущностей в редуцированном представлении ограничений существования свойств – в зависимости от доли ВЗО-пар $q_{ВЗО\text{-}п}$ в исходном представлении этих ограничений: (а) – область существования значений $Э_С$; (б) – пример для $|M| = 20$ измеряемых свойств

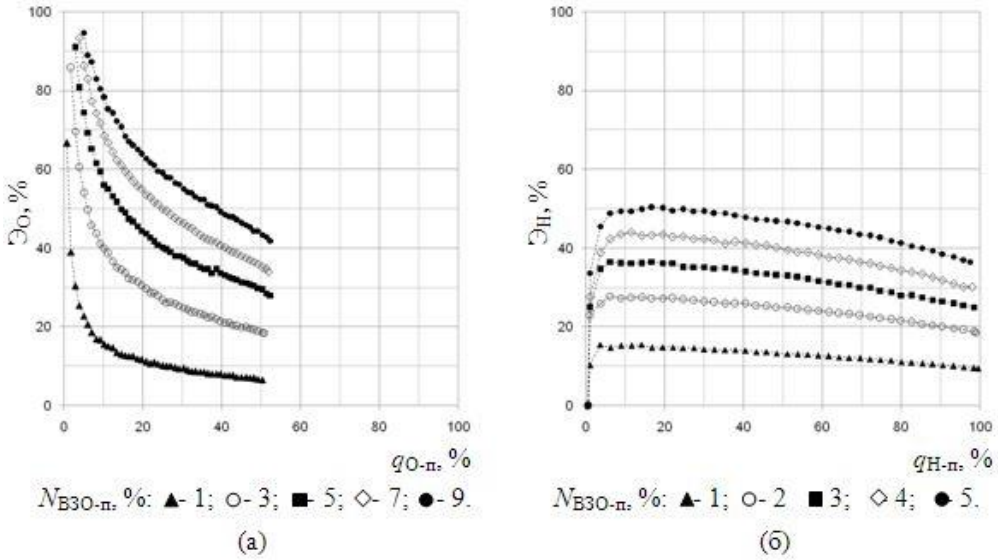


Рис. 5. Пример зависимости показателей $Э_О$ (а) и $Э_Н$ (б) – соответственно среднего относительного уменьшения количества обусловленностей и несовместимостей в редуцированном представлении ограничений существования свойств – в зависимости от количества ВЗО-пар $N_{ВЗО\text{-}п}$ и долей $q_{О\text{-}п}$ (для $Э_О$), $q_{Н\text{-}п}$ (для $Э_Н$) в исходном представлении этих ограничений для $|M| = 20$ измеряемых свойств

Правую границу области существования графиков $Э_О$ определяет максимум количества «чистых» О-пар – $|M|\cdot(|M| - 1)/2 - N_{ВЗО\text{-}п}$; левую – количество О-пар, образующих исходное количество ВЗО-пар в ОСС при отсутствии «чистых» О-пар; доля таких О-пар составляет $2N_{ВЗО\text{-}п} / (|M|\cdot(|M| - 1))$.

Рисунок 5б демонстрирует пример среднего относительного уменьшения количества несовместимостей $Э_Н$ в редуцированных ОСС для $|M| = 20$ в зависимости от количества ВЗО-пар $N_{ВЗО\text{-}п}$ и доли Н-пар $q_{Н\text{-}п} = N_{Н\text{-}п} / (|M|\cdot(|M| - 1)/2)$ при $N_{О\text{-}п} = 0$ в исходном представлении ОСС. Наблюдаются следующие характерные черты зависимостей такого вида:

- рост выигрыша $Э_Н$ при увеличении $N_{ВЗО\text{-}п}$;
- нулевой выигрыш в начале всех графиков $Э_Н$ – при $N_{Н\text{-}п} = 1$, – поскольку существование единственной Н-пары в ОСС возможно лишь при отсутствии её пересечения с существующими в ОСС ВЗО-парами. Несовместимость, определяемая такими Н-парами, сохраняется в редуцированных ОСС в неизменном виде;
- быстрое достижение с ростом $q_{Н\text{-}п}$ максимальной величины выигрыша, который медленно и почти линейно уменьшается до достижения величиной $N_{Н\text{-}п}$ своего максимума $|M|\cdot(|M| - 1)/2 - N_{ВЗО\text{-}п}$, определяющего правую границу области существования графиков $Э_Н$.

Заключение. В статье применительно к задаче атрибутивной идентификации объекта на основе данных многомерных наблюдений и измерений теоретически и экспериментально подтверждена целесообразность редуцирования описания ограничений существования свойств путём выделения во множестве измеряемых у объекта свойств классов эквивалентности и определения расширенных экзистенциальных отношений на множестве выделенных классов.

Представленное исследование позволило количественно оценить потенциал снижения размерности у описания ограничений существования свойств и выявить характер зависимости получаемого выигрыша от параметров, определяющих конфигурацию указанных ограничений.

Полученные знания являются вкладом в методологию семантического моделирования объектов и предметных областей, имеющую широкое приложение в системных исследованиях, проектировании и интеллектуальном анализе данных.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, код научной темы FMRW-2022-0030.

Список источников

1. Смирнов С.В. Онтологический анализ предметных областей моделирования / С.В. Смирнов // Известия Самарского научного центра РАН, 2001. – Т. 3. – № 1. – С. 62-70.
2. Закревский А.Д. Логика распознавания / А.Д. Закревский. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 118 с.
3. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 386 с.
4. Егер С.М. Основы автоматизированного проектирования самолетов / С.М. Егер, Н.К. Лисейцев, О.С. Самойлович. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
5. Lammari N. Building and maintaining ontologies: a set of algorithms. Data & Knowledge Engineering, 2004, vol. 48 (2), pp. 155-176.
6. Пронина В.А. Использование отношений между атрибутами для построения онтологии предметной области / В.А. Пронина, Л.Б. Шипилина // Проблемы управления, 2009. – № 1. – С. 27-32.
7. Пронина В.А. Построение онтологии предметной области с нормализацией контекста в методе формальных параметров / В.А. Пронина, Л.Б. Шипилина // 11-я нац. конф. по искусственному интеллекту с международным участием (28 сентября – 3 октября 2008 г., Дубна, Россия): труды. – М: URSS, 2008. – Т. 1. – С. 197-206.
8. Semenova V., Smirnov S. Revealing attributes of an object based on incomplete and inconsistent empirical data. VIII Int. Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). IEEE Xplore, 2022, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848601.

9. Семенова В.А. Эвристика и численный метод нормализации эмпирического V^{TF}-контекста в онтологическом анализе данных / В.А. Семенова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 2 (22). – С. 61-69. – DOI:10.38028/ESI.2021.22.2.006.
10. Семенова В.А. Алгоритмизация формирования и прагматической трансформации ограничений существования свойств предметной области / В.А. Семенова, С.В. Смирнов // Онтология проектирования, 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 361-379. – DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-361-379.
11. Кобелев Н.Б. Имитационное моделирование / Н.Б. Кобелев, В.В. Девятков, В.А. Половников – 2-е изд. - М: КУРС, 2021. – 352 с.
12. Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. Методы Монте-Карло / Г.А. Михайлов, А.В. Войтишек – М.: Изд-во Юрайт, 2022. – 324 с.
13. Каазик Ю.Я. Математический словарь / Ю.Я. Каазик. – М.: Физматлит, 2007. – 334 с.
14. Лелонд О.В. Дискретная математика / О.В. Лелонд, М.А. Тренина. – Тольятти: Изд-во Тольяттинского гос. ун-та, 2018. – 93 с.
15. Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables. J. of the American Statistical Association, 1963, v. 58, pp. 13-30 (In: The Collected Works of Wassily Hoeffding. N.I. Fisher et al. (eds.) - Springer, New York, 1994, ch. 26, p. 409-426, DOI: 10.1007/978-1-4612-0865-5_26).
16. Петров В.В. Предельные теоремы для сумм независимых случайных величин / В.В. Петров. - Изд. 2. – М.: URSS, 2022. – 320 с.

Смирнов Сергей Викторович. *Д.т.н., доцент, главный научный сотрудник Института проблем управления сложными системами Самарского федерального исследовательского центра РАН, профессор Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Область научных интересов – анализ и моделирование сложных систем. AuthorID: 17628, SPIN: 8039-1421, ORCID: 0000-0002-3332-5261. smirnov@iccs.ru. Россия, Самара, ул. Садовая, 61.*

Семенова Валентина Андреевна. *Младший научный сотрудник Института проблем управления сложными системами Самарского федерального исследовательского центра РАН. Область научных интересов – анализ и моделирование сложных систем. AuthorID: 1063366, ORCID: 0000-0002-0557-3890. queenbfjr@gmail.com. Россия, Самара, ул. Садовая, 61.*

UDC 519.677
DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.001

Efficiency of properties existence constraints reduction in the problem of object attributive identification

Sergey V. Smirnov, Valentina A. Semenova

Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute for the Control of Complex Systems RAS, Russia, Samara, *smirnov@iccs.ru*

Abstract. The article deals with the problem of taking into account the existence constraints in the widespread task of identifying the properties inherent in an object (or features, or attributes) from an a priori determined set of properties measured in an object in the case of incompleteness and inconsistency of measurement results. The question is raised about the possibility of increasing the productivity of the author's methodological support developed for solving this problem by reducing the description dimension of the existence constraints of properties measured in an object. A natural model of existence constraints is a set of entities (for example, attributes of an object) with two binary coexistence relations defined on it - incompatibility and conditionality; the dimension of such a model is determined by the number of entities and the quantity of the noted existential relations. It is shown that the desired reduction of the existence constraints model of properties measured in an object is feasible based on the identification of equivalence classes in the set of measured properties and the definition of extended binary incompatibility and conditionality relations on the set of discovered classes. Quantitative assessment of the existence constraints reduction effectiveness was made by computer simulation statistical experiments. Of independent interest is the simulation tactics used, due to the multiply connected structure of existence constraints, as well as the multifaceted use of Höfding's inequality to estimate the appropriate number of statistical tests, which establishes exponentially decreasing estimates of the deviations probability of sums of independent random variables from the average of these sums. The results of the study confirmed the significance of dimension reducing of the existence constraints model and revealed the dependence nature of the gain obtained on the parameters that determine the configuration of these constraints.

Keywords: attributive object identification, existence constraints, equivalence classes, statistical simulation
Acknowledgements: This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic code FMRW-2022-0030.

References

1. Smirnov S.V. Ontologicheskiy analiz predmetnyh oblastey modelirovaniya [Ontological analysis of knowledge domains of modeling]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Bulletin of the Samara Scientific Center of RAS], 2001, vol. 3, no. 1, pp. 62-70.
2. Zakrevskiy A.D. Logika raspoznavaniya [Recognition logic]. Mn., Nauka i tekhnika [Minsk. Science and technology], 1988. 118 p.
3. Polovinkin A.I. Osnovy inzhenernogo tvorchestva [Fundamentals of engineering creativity]. M.: Mashinostroyeniye [Moscow. Mechanical engineering], 1988, 386 p.
4. Yeger S.M., Lisejcev N.K., Samojlovich O.S. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovanija samolyotov [Fundamentals of Computer-Aided Aircraft Design]. M., Mashinostroyeniye [Moscow. Mechanical engineering], 1986, 232 p.
5. Lammari N., Metais E. Building and maintaining ontologies: a set of algorithms. Data & Knowledge Engineering, 2004, vol. 48 (2), pp. 155-176.
6. Pronina V.A., Shipilina L.B. Ispol'zovanie otnosheniy mezhdu atributami dlya postroeniya ontologii predmetnoy oblasti [Using the relationships between attributes to build domain ontology]. Problemy upravlenija [Control problems], 2009, no. 1, pp. 27-32.
7. Pronina V.A., Shipilina L.B. Postroenie ontologii predmetnoj oblasti s normalizaciej konteksta v metode formal'nyh parametrov [Building an ontology of a knowledge domain with context normalization in the method of formal parameters]. 11-ya nacional'naya konferencija po iskustvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem (28 sentyabrya – 3 oktyabrya, 2008, Dubna, Rossiya). Trudy [Proc. of 11th National conf. on artificial intelligence with international participation (28 September – 3 October, 2008, Dubna, Russia)], Moscow. URSS, 2008, vol. 1, pp. 197-206.
8. Semenova V., Smirnov S. Revealing attributes of an object based on incomplete and inconsistent empirical data. VIII Int. Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). IEEE Xplore, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848601.
9. Semenova V.A. Evristika i chislennyy metod normalizatsii empiricheskogo V^{TF}-konteksta v ontologicheskom analize dannykh [Heuristics and numerical method for normalizing the empirical V^{TF}-context in ontological data analysis]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 2 (22), pp. 61-69. DOI:10.38028/ESI.2021.22.2.006.
10. Semenova V.A., Smirnov S.V. Algoritmizatsija formirovanija i pragmaticheskoj transformatsii ogranichenij suschestvovaniya svoystv predmetnoj oblasti [Algorithms for the formation and pragmatic transformation of existence constraints]. Ontologija proektirovanija [Ontology of Designing], 2020, vol. 10, no 3 (37), pp. 361-379. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-361-379.
11. Kobelev N.B., Devyatkov V.V., Polovnikov V.A. Imitacionnoje modelirovanije [Simulation], 2d ed. Moscow. KURS, 2021. 352 p.
12. Mihajlov G.A., Vojtishek A.V. Statisticheskoje modelirovanije. Metody Monte-Karlo [Statistical modeling. Monte Carlo Methods]. M. Izd-vo Yurayt [Moscow. Jurajt Publ.], 2022. 324 p.
13. Kaazik Ju.Ja. Matematicheskij slovar' [Math dictionary]. M. Fizmatlit [Moscow. Phizmatlit], 2007. 334 p.
14. Lelond O.V., Trenina M.A. Diskretnaya matematika [Discrete Math]. Tol'yatti: Izd-vo Tol'yattinskogo gos. un-ta [Togliatti. Togliatti State University Publ.], 2018. 93 p.
15. Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables. J. of the American Statistical Association, 1963, vol. 58, pp. 13–30 (In The Collected Works of Wassily Hoeffding. N.I. Fisher et al. (eds.). Springer, New York, 1994, ch. 26, pp. 409-426. DOI: 10.1007/978-1-4612-0865-5_26).
16. Petrov V.V. Predel'nyje teoremy dlya sum nezavisimyh sluchajnyh velichin [Limit theorems for sums of independent random variables]. 2d ed. Moscow. URSS, 2022. 320 p.

Sergey V. Smirnov. *D. Sc. (Tech.), Assoc. Chief Researcher at Institute for the Control of Complex Systems (Samara Federal Research Scientific Center RAS), professor at Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics. Research interests – analysis and modeling of complex systems. Author ID: 17628, SPIN: 8039-1421, ORCID: 0000-0002-3332-5261. smirnov@iccs.ru. Russia, Samara, Sadovay st., 61.*

Valentina A. Semenova. *Junior Researcher at Institute for the Control of Complex Systems (Samara Federal Research Scientific Center RAS). Research interests – analysis and modeling of complex systems. Author ID: 1063366, ORCID: 0000-0002-0557-3890. queenbfjr@gmail.com. Russia, Samara, Sadovay st., 61.*

Статья поступила в редакцию 27.03.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 15.06.2023.
The article was submitted 03/27/2023; approved after reviewing 05/15/2023; accepted for publication 06/15/2023.

УДК 004.946:004.4’2
DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.002

Разработка иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью на основе декларативной модели

Стрекалёв Вячеслав Олегович, Грибова Валерия Викторовна

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
Россия, Владивосток, *strekalev@dvo.ru*

Аннотация. В работе предложена модель иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью, которая лежит в основе инструментального комплекса для создания, воспроизведения и сопровождения иммерсивных виртуальных тренажеров (ИВТ) с биологической обратной связью (БОС). Модель предназначена для формирования информационного представления виртуального тренажёра. Показаны состав и взаимодействие между компонентами модели, позволяющими осуществить проектирование, создание, сопровождение и воспроизведение ИВТ с БОС. Рассмотрены этапы создания ИВТ с БОС и используемые инструменты. Продемонстрировано применение инструментального комплекса на примере разработки виртуального тренажера. В настоящее время продолжаются работы по описанию сценариев для различных методов исследования на основе представленной модели и их реализации.

Ключевые слова: комплекс онтологий, виртуальная реальность, виртуальные тренажеры, биологическая обратная связь, инструментальный комплекс, виртуальная среда

Цитирование: Стрекалёв В.О. Разработка иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью на основе декларативной модели / В.О. Стрекалёв, В.В. Грибова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 14-24. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.002.

Введение. Современные информационные системы позволяют создавать виртуальные среды, в том числе иммерсивные виртуальные тренажеры, для решения широкого спектра задач и отработки различных навыков и ситуаций. Сегодня для разработки виртуальных тренажёров можно использовать различные инструменты, среди которых можно выделить CryEngine, Unity, Unreal Engine [1], на основе таких инструментов разрабатываются модули для взаимодействия с виртуальной средой [2]. В качестве примера можно рассмотреть реализацию подхода в среде межплатформенной разработки Unity, который основан на адаптации этих инструментов и дополнения их функционально-логическими моделями, выполняющими управляющие функции [3]. В работах [4, 5] рассмотрено объединение методов BIM (Building Information Model) и технологии визуализации VR (Virtual Reality) для создания интерактивной виртуальной среды на основе Unreal Engine 4. Вместе с тем процесс их разработки, настройки и адаптация к конкретному пользователю остается сложным и трудоемким [6, 7]. Наиболее эффективным методом адаптации тренажера к конкретному пользователю является использование биологической обратной связи (БОС), которое заключается в непрерывном мониторинге различных физиологических показателей пользователя и корректировке виртуального окружения в соответствии с полученными показателями [8]. Авторами предлагается подход к созданию иммерсивного виртуального тренажера с БОС по его декларативной модели, для формирования которой используются онтологический подход и семантическое представление информации. Предложенная модель иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью позволяет формировать информационное наполнение: описывать виртуальные среды, создавать на их основе исследования, использовать данные, получаемые с оборудования для определения состояний пользователя и определять сценарий с учетом индивидуальных характеристик пользователя. Модель включает описание виртуального окружения и параметры пользователя, получаемые с оборудования, размещенного на нем для получения обратной связи и контроля выполнения сценария. Такая модель может быть использована в различных областях, таких, как медицина (например,

тренажеры для профилактики и коррекции различных психических расстройств и фобий), профессиональная подготовка специалистов (например, подготовка для работы в особых условиях – на высоте, под водой или в условиях где требуется предварительная подготовка – управление самолетом, прыжки с парашютом), в спорте (например, скалолазание или дайвинг), сфере развлечений и других [9, 10, 11]. В целом, использование модели иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью может увеличить эффективность использования тренажеров, а также улучшить безопасность во время погружения в виртуальную среду [12].

Целью работы является описание основных принципов создания иммерсивного виртуального тренажера, его декларативной модели, а также приводится пример использования тренажера для тестирования человека на высоте.

Основные принципы иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью. Иммерсивный виртуальный тренажер с биологической обратной связью (ИВТ с БОС) – это программно-аппаратный комплекс с оборудованием виртуальной реальности и биологической обратной связи, позволяющий моделировать различные ситуации, воссоздавая реальную или вымышленную ситуации, и проводить визуализацию искусственного окружения с возможностью взаимодействия и управлением объектами виртуальной среды на основе состояний человека и объектов.

В основу программно-аппаратного комплекса положены следующие **ключевые принципы**:

1) модульная структура, состоящая из подсистем – программных модулей, обеспечивающих создание, воспроизведение и сопровождение ИВТ с БОС;
2) компоненты тренажера (за исключением виртуальных объектов) создаются на основе декларативной модели, которая описывает существенные для ИВТ с БОС свойства его функционирования и управления; декларативная модель – это совокупность связанных компонентов;
3) виртуальные объекты создаются с помощью имеющихся на рынке средств 3D-моделирования и разработки виртуальных сред (например, Blender, Unity 3D и др.);
4) компоненты декларативной модели формируются на основе онтологий с использованием специализированных редакторов, управляемых онтологиями; онтологии и компоненты модели имеют графовое (семантическое) представление, что обеспечивает понятность моделей для специалистов, которые их создают и сопровождают;
5) средство воспроизведения интерпретирует декларативную модель и обеспечивает воспроизведение и функционирование ИВТ с БОС, включающее контроль виртуальной сцены с входящими в нее объектами согласно заданному сценарию;
6) управление виртуальным тренажером (виртуальными объектами и событиями) обеспечивается как автоматически (на основе сценария), так и экспертом (внешнее управление).

Модель иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью. Модель ИВТ с БОС состоит из компонентов, каждый из которых формируется на основе онтологии с помощью соответствующих редакторов. Каждая онтология описывает структуру компонента модели, правила его порождения и возможные ограничения; создание и сопровождение компонентов модели осуществляют специалисты разного профиля – эксперты предметной области, эксперты БОС, дизайнеры, программисты [13]. Структура взаимодействия между компонентами модели показана на рис. 1.

Модель ИВТ с БОС включает следующие компоненты:

– Онтология и модель виртуальной среды. Описывает множество сцен, включающих объекты с набором параметров и функций, необходимых для управления виртуальным окружением.
– Онтология и модель исследований. Описывает систему понятий, правил и ограничений для формирования исследования и создания индивидуального сценария работы с учетом параметров пользователя.
– Онтология и модель карты пользователя. Описывает данные сеансов в формате записей, характеризующих сеанс и результаты проведенных исследований.
– Онтология и модель знаний о состояниях пользователя: описывает множество диагностируемых состояний и правил их диагностики на основе статических и динамических показателей пользователей.
– Онтология и модель оборудования: описывает оборудование, его параметры в соответствии с единицами измерений, которые оно использует.

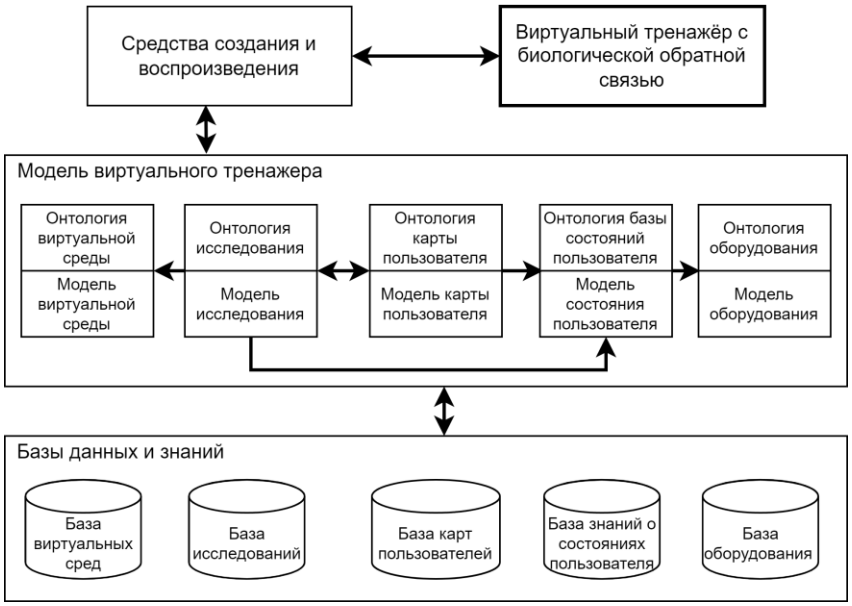


Рис. 1. Модель виртуального тренажера с БОС

В рамках модели определена виртуальная среда, которая содержит множество виртуальных объектов, их параметров и характеристик. Описание виртуальной среды и входящих в нее объектов обеспечивает возможность повторного использования виртуальных сред в процессе создания множества исследований. Каждое исследование характеризуется определением множества сценариев прохождения тренажера в зависимости от персональных признаков (характеристик) пользователя. Все признаки пользователя, а также история сеансов описываются в карте пользователя, в которой содержатся множество данных о прошедших сеансах и результаты их прохождения. В рамках описания прохождения сеанса используются состояния пользователя, которые представляют собой множество признаков, объединенных в группу. Для определения состояния и формирования сценария используются данные о пользователе, полученные от специализированного оборудования, а в некоторых случаях – результаты лабораторных, инструментальных исследований, жалобы и различные факторы из анамнеза жизни.

Инструментальный комплекс. Инструментальный комплекс представляет собой набор программных компонентов, которые позволяют осуществить проектирование, создание, сопровождение и воспроизведение ИВТ с БОС [14]. Инструментальный комплекс включает инструменты для работы с информационными и программные ресурсами и позволяет специалистом разного профиля формировать компонент модели работы в рамках своей ква-

лификации. Структурная схема программного комплекса для проектирования, создания, воспроизведения и сопровождения ИВТ с БОС представлена на рисунке 2.

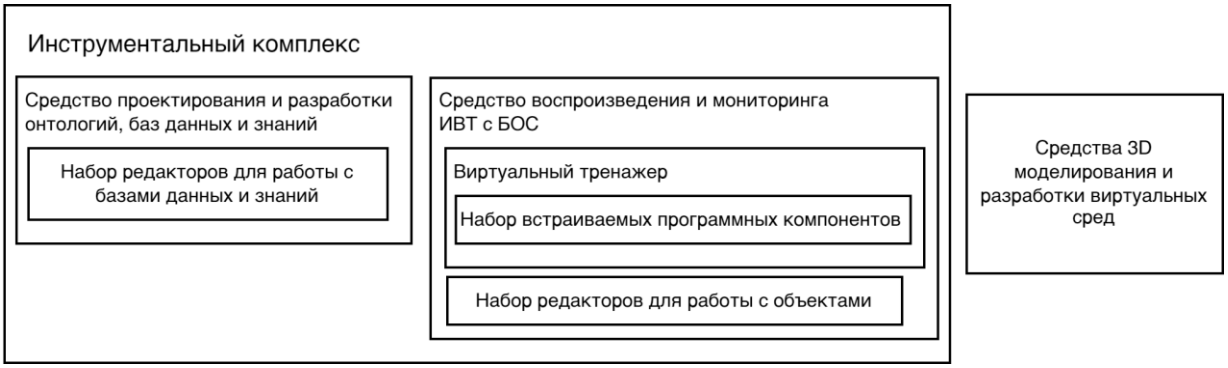


Рис. 2. Структурная схема инструментального комплекса

Инструментальный комплекс состоит из следующих программных продуктов:

Средство проектирования и разработки онтологий, баз данных и знаний. Реализация онтологий и сформированных на их основе баз данных, знаний и моделей выполнена на платформе IACPaaS (Intelligent Applications, Control and Platform as a Service) [15], которая ориентирована, главным образом, на создание интеллектуальных сервисов, работающих с базами знаний и/или данных в семантическом (графовом) представлении. Набор редакторов баз данных и знаний автоматически генерируется по онтологиям.

Средство воспроизведения и мониторинга ИВТ с БОС. Данное средство интерпретирует декларативную модель и обеспечивает воспроизведение и функционирование виртуального тренажера с биологической обратной связью. Набор встраиваемых программных компонентов в виртуальную среду необходим для управления виртуальной сценой и входящими в нее объектам.

Средства 3D-моделирования и разработки виртуальных сред. Для создания виртуальных объектов требуется использовать специализированные программные продукты для 3D-моделирования, такие, как Blender, 3ds MAx и другие. В качестве платформы реализации виртуальных сред используется программный продукт Unity – среда разработки, которая позволяет создавать кроссплатформенные приложения, включая многопользовательские приложения виртуальной реальности.

Использование инструментального комплекса для создания иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью. Формирование модели ИВТ с БОС заключается в информационном наполнении всех входящих в ее состав компонентов.

Создание ИВТ с БОС включает следующие укрупненные стадии:

Создание технического задания на разработку виртуального тренажера. На этом этапе определяются требования и характеристики будущего тренажера. Описываются на неформальном языке сценарий и используемые объекты.

Описание виртуальной среды. На данном этапе (в соответствии с онтологией виртуальной среды) описываются виртуальные сцены тренажера, объекты, их параметры и функции, необходимые для формирования сценария.

Реализация виртуальной среды. На этом этапе с помощью пакета прикладных программ 3D-моделирования и разработки виртуальных сцен происходит первоначальная компоновка виртуальной сцены с использованием готовых или созданных виртуальных объектов.

Генерация программных компонентов. Для реализации возможности взаимодействия и удаленного управления виртуальным тренажером, необходимо сформировать программные компоненты на основе декларативной модели и встроить их в создаваемый виртуальный тренажер. Это обеспечивает возможность создавать различные сценарии без внесения изменений в виртуальную среду.

Создание исследования. Исследование определяет структуру виртуального тренажера и формируется на основе имеющихся виртуальных сред. Формат и правила описания определяет онтология исследования, которая содержит структуру исследований, формируемых на основе виртуальных сред. Она задает правила, условия, ограничения для работы пользователя в виртуальной среде и формирования индивидуального сценария работы.

Подготовка к использованию. На этом этапе происходит добавление оборудования в систему и формирование карты пользователя тренажера. В рамках этой стадии разработанный тренажер доступен для использования.

Для демонстрации представленных в статье решений рассмотрим пример создания виртуального тренажера по безопасному выполнению работ повышенной опасности “Работа на высоте”. Целью данного тренажера является тестирование человека на акрофобию (страх высоты) и профилактика тревожных расстройств, с возможностью изменения параметров виртуальной среды в зависимости от состояния пользователя. В ходе прохождения сценария пользователю ставится задача: отработать в виртуальной реальности навыки выполнения действий на высотных зданиях с постоянным мониторингом физиологических показателей. Такой подход позволяет протестировать и подготовить пользователя к восприятию негативных факторов виртуального окружения и в дальнейшем минимизировать негативные последствия, которые могут появиться в реальной работе на высоте. Для оценки состояния пользователя будут использоваться объективные (полученные от оборудования) и субъективные (со слов человека) признаки, которые позволят оценить состояние человека, помещенного в виртуальную среду и активно в ней действующего.

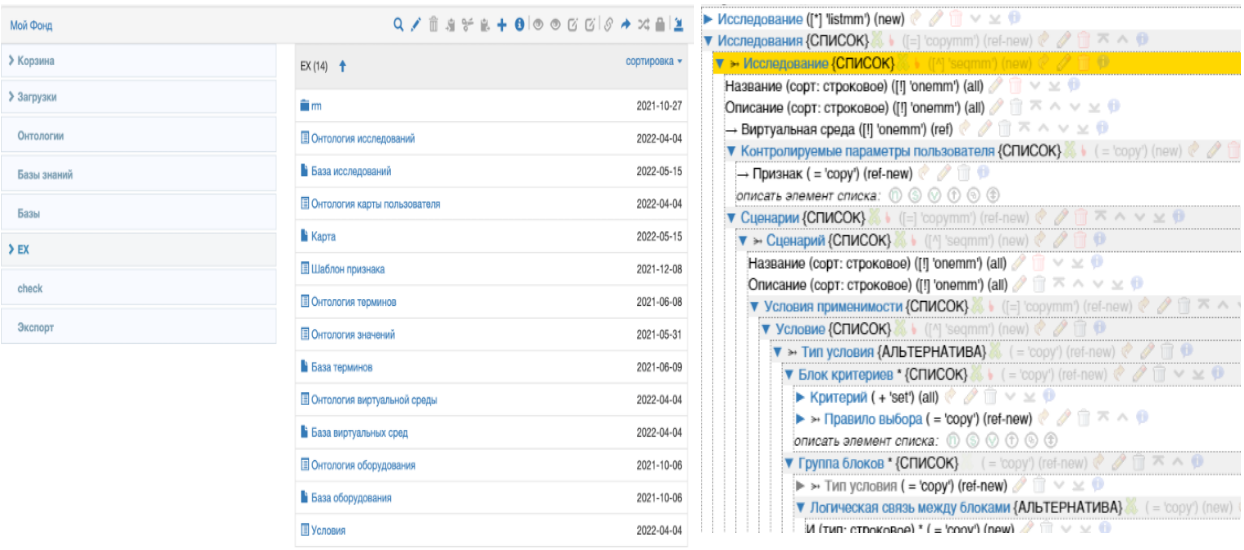
Определим сценарий виртуального тренажера, включающий выполнение следующих этапов:

1. Запуск сеанса.
2. Вызов лифта.
3. Подъема на сконфигурированный этаж.
4. Выход из лифта.
5. Поднятие предмета (на высоте).
6. Изменение этажа.
7. Повтор этапов подъема и поднятия предмета.
8. Спуск на первый этаж.
9. Завершение сеанса.

С помощью платформы IACPaaS (Intelligent Applications, Control and Platform as a Service) необходимо сформировать базы знаний и данных разрабатываемого виртуального тренажера, используя специализированные редакторы. Каждый разработчик тренажера имеет рабочее пространство (личный кабинет), на рисунке 3 (а) показан интерфейс личного кабинета разработчика, рис. 3 (б) демонстрирует интерфейс редактора модели исследований.

На этапе описания виртуальной сцены с помощью специализированного интерфейса (редактора) описываются виртуальные объекты и их характеристики для возможности использования при создании исследований, это необходимо для реализации различных сценариев и удаленного управления виртуальным объектами.

Для реализации тренажера требуется создание виртуальной среды. На этом этапе с помощью пакета прикладных программ 3D-моделирования и разработки виртуальных сцен происходит первоначальная компоновка виртуальной сцены с использованием готовых или созданных виртуальных объектов.



(а) (б)

Рис. 3. Интерфейс личного кабинета разработчика (а) и интерфейс редактора модели исследований (б)

В рамках выполнения данной задачи необходимо определить и подготовить набор виртуальных объектов для сборки виртуального сцены. Для данного виртуального тренажера требуются следующие виртуальные объекты:

1. Основа здания – стартовый объект, в который пользователь входит для инициации запуска сценария и последующего подъема на заданный этаж. Особенностью данного объекта является возможность изменения этажности здания для создания вариативности изменения тренажера и различных условий прохождения. Объект «здание» показан на рисунке 4.

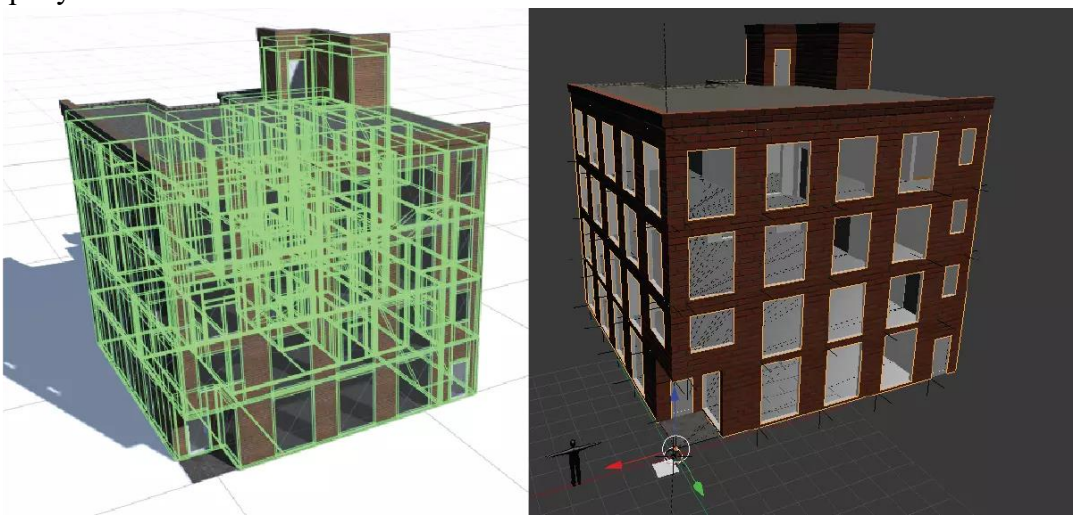


Рис. 4. Объект «здание»

2. Лифт – объект, который будет перемещать пользователя между этажами. Объект «лифт» показан на рисунке 5.
3. Город – является набором объектов, на который будет смотреть пользователь после подъема на этаж. Набор объектов «город» показан на рисунке 6.

Для реализации сцены используется программный продукт Unity, с помощью которого создается проект виртуального тренажера и в который импортируются объекты и производится компоновка сцены в соответствии с техническим заданием. На рисунке 7 показан интерфейс проекта в Unity.

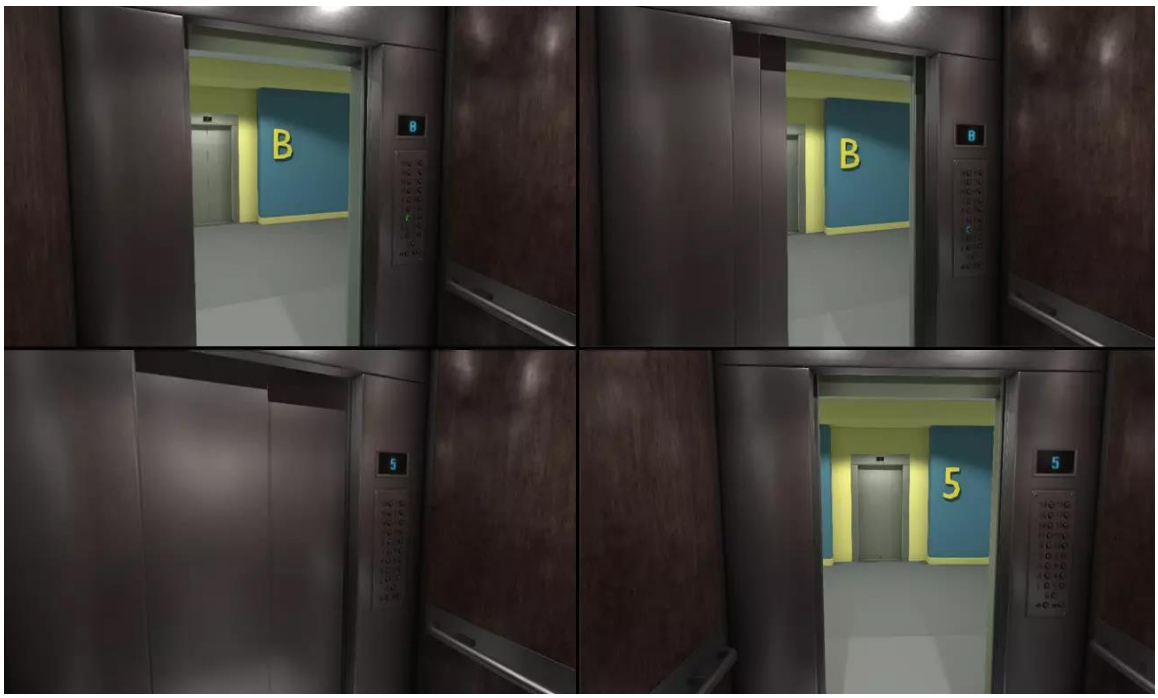


Рис. 5. Объект «лифт»

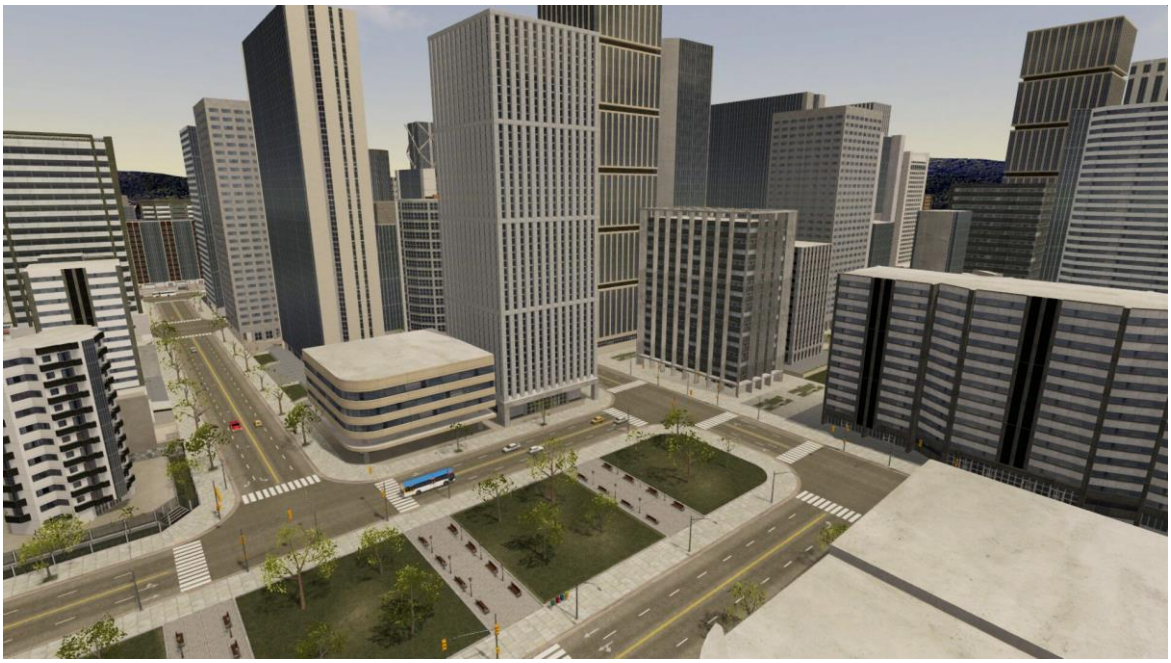


Рис. 6. Набор объектов «город»

Сцены в проекте Unity состоят из объектов (Game Objects), рис. 8 (а). Каждый объект имеет структуру, состоящую из компонентов, ответственных за его поведение и отображение, рис. 8 (б). По умолчанию эти объекты невидимы и не обладают ничем, кроме имени. Каждый объект включает по меньшей мере один компонент, который нельзя удалить, это компонент Transform, который отвечает за настройки позиционирования, вращения и масштабирования объекта. Если предполагается взаимодействие с объектом в рамках выполнения сценария или объект требует внешнего взаимодействия, то объекту необходимо добавить разработанный компонент ObjectManager, рис. 8 (в), принимающий все события, связанные с объектом, и транслирующий команды, которые отвечают за управление данным объектом.

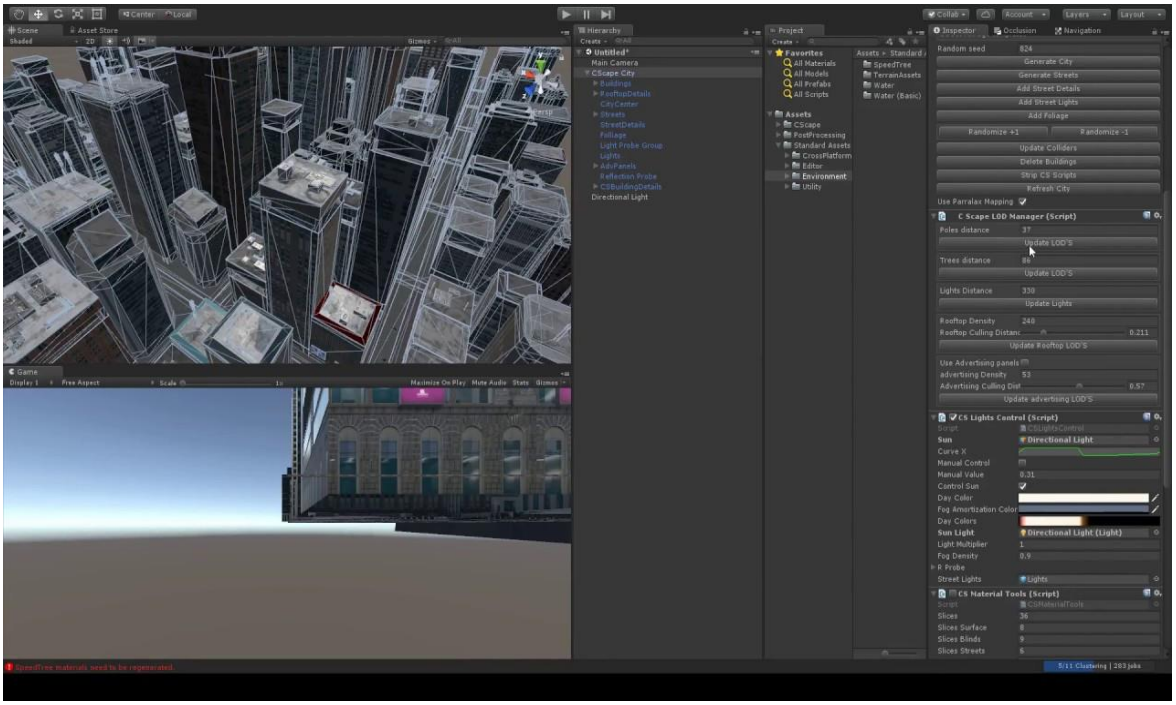
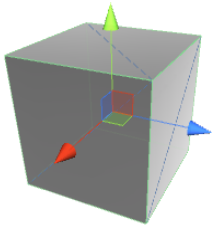
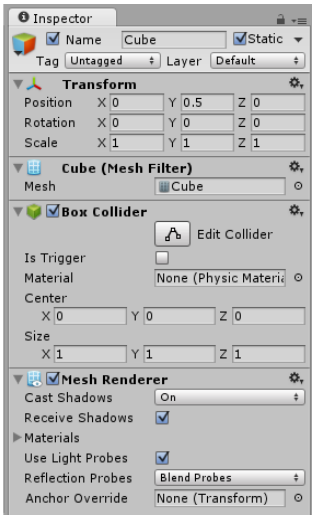
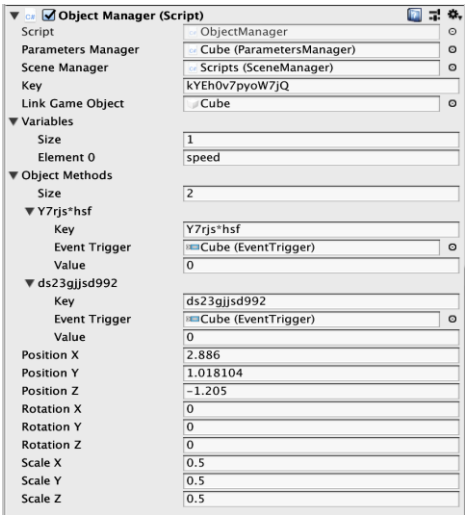


Рис. 7. Интерфейс проекта в Unity

В случае использования компонента ObjectManager необходимо определить все параметры и методы работы с объектом путем создания ссылок на другие компоненты с указанием идентификатора параметра или метода. Объекты могут посылать или принимать сообщения для изменения своего состояния. Каждый объект регистрируется в системе и получает уникальный идентификатор – адрес.







(а) (б) (в)

Рис. 8. Объект (Game Objects) (а), структура объекта (б), компонент ObjectManager (в)

С помощью интерфейса создания исследований происходит формирование сценария работы разрабатываемого тренажера; в дальнейшем с помощью средства воспроизведения производится запуск требуемого сценария на тренажере с возможностью мониторинга его исполнения.

Заключение. Рассмотрена модель иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью, предназначенная для формирования информационного представления виртуального тренажёра. Рассмотрены компоненты и инструменты, входящие в состав инструментального комплекса, позволяющего осуществить проектирование, создание, сопровождение и воспроизведение ИВТ с БОС. Предложенный инструментальный комплекс поз-

воляет формировать информационное наполнение разрабатываемого виртуального тренажера, описывать виртуальные среды, создавать на их основе исследования, сценарии которых исполняются на основе состояний пользователя. В основе предлагаемого решения заложен принцип формирования и дальнейшей интерпретации декларативной модели, что обеспечивает воспроизведение и функционирование ИВТ с БОС. Продемонстрировано использование инструментального комплекса для создания иммерсивного виртуального тренажера с биологической обратной связью на примере реализации виртуального тренажера выполнения работ на высоте, с помощью которого можно провести тестирование человека на акрофобию (страх высоты) и профилактику тревожных расстройств, с возможностью изменения параметров виртуальной среды в зависимости от состояния пользователя. Рассмотрены инструменты, которые используются на этапах создании виртуального тренажера. В настоящее время продолжаются работы по описанию сценариев для различных методов исследования на основе представленной модели и их реализации.

Список источников

1. Копелиович Д.И. Применение методов искусственного интеллекта в 3d-тренажерах на основе функционально-логических моделей / Д.И. Копелиович, А.Л. Сафонов, Р.В. Кондратенко // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении, 2020. – № 4 (10). – С. 33-39.
2. Бурцева Д.Я. Разработка VR. Особенности совместимости с нейротехнологиями / Д.Я. Бурцева, Е.А. Менделеев, И.Л. Хонин [и др.] // Вестник НовГУ, 2021. – № 4 (125) – С. 10-14.
3. Буткина А.А. Разработка основного функционала игрового приложения для персональных компьютеров с использованием Unreal Engine / А.А. Буткина, Ю.С. Кочкаева, Р.А. Чуднова // Огарёв-Online, 2022. –№ 14 (183). – С. 9.
4. Козленко Т.А. BIM И VR: Разработка программного модуля для интеграции информационного моделирования зданий и виртуальной реальности / Т.А. Козленко, С.В. Придвижкин // Вестник СибАДИ, 2021. – № 4 (80). – С. 440-449.
5. Згода Ю.Н. Автоматизированное построение интерактивных визуализаций BIM-моделей в виртуальной реальности / Ю.Н. Згода, К.А. Шумилов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия, 2019. – № 4 (30). – С. 113-118.
6. LaValle S.M. Virtual Reality. University of Illinois. Cambridge University Press, 2017, 430 p., available at: http://vr.cs.uiuc.edu/vrbook.pdf (accessed: 03/11/2023).
7. Мухина О.В. Метод адаптивного представления интерактивных электронных сред с погружением / О.В. Мухина, А.В. Никитин // Информационно-управляющие системы, 2010. – № 1 (44). – С. 15-18.
8. Аладышев А.В. Функциональное биоуправление с обратной связью – перспективная информационная технология в медицине / А.В. Аладышев, Е.А. Субботин // Современные наукоемкие технологии, 2005. – № 3. – С. 86-87.
9. Краснова Т.И. Потенциал иммерсивной виртуальной реальности в обучении иностранным языкам / Т.И. Краснова // МНКО, 2023. – №1 (98). – С. 89-91.
10. Воловик М.Г. Технологии виртуальной реальности в комплексной медицинской реабилитации пациентов с ограниченными возможностями (обзор) / М.Г. Воловик, В.В. Борзиков, А.Н. Кузнецов [и др.] // Современные технологии в медицине, 2018. – Т. 10. – № 4. – С. 173-182.
11. Дубровская Ю.А. Применение тренажеров и симуляторов для формирования профессиональных навыков при практической подготовке горноспасателей / Ю.А. Дубровская, Л.В. Пихконен, Г.В. Руденко // Известия РГПУ им. А. И. Герцена, 2022. – № 203. – С. 168-176.
12. Кугуракова В.В. Математическое и программное обеспечение многопользовательских тренажеров с погружением в иммерсивные виртуальные среды: специальность 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В.В. Кугуракова. – Казань, 2019. – 187 с.
13. Стрекалёв В.О. Комплекс онтологий для виртуальных тренажеров с биологической обратной связью / В.О. Стрекалёв, В.В. Грибова // Онтология проектирования, 2022. – Т. 12. – № 2(44). – С. 172-185. – DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-172-185.
14. Стрекалёв В.О. Инструментальный комплекс для иммерсивных виртуальных тренажеров с биологической обратной связью / В.О. Стрекалёв, В.В. Грибова // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2020. – № 8. – С. 19-28. – DOI: 10.14489/vkit.2020.08.

15. Грибова В.В. Облачная платформа IACPaaS для разработки оболочек интеллектуальных сервисов: состояние и перспективы развития / В.В. Грибова, А.С. Клещев, Ф.М. Москаленко [и др.] // Программные продукты и системы, 2018. – № 3. – С. 527-536.

Стрекалёв Вячеслав Олегович. *Младший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, AuthorID (РИНЦ): 1136593, ORCID: 0000-0002-6209-6226, Researcher ID (WoS): AAD-6228-2022, strekalev@dvo.ru.*

Грибова Валерия Викторовна. *Заведующая лабораторией интеллектуальных систем Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, заместитель директора по научной работе, вице-президент Российской ассоциации искусственного интеллекта, AuthorID (РИНЦ): 7400, Author ID (Scopus): 7801667631, ORCID: 0000-0001-9393-351X, Researcher ID (WoS): Q-4250- 2016, gribova@dvo.ru.*

UDC 004.946:004.4’2
DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.002

Development of an immersive virtual simulator with biofeedback based on a declarative model

Vyacheslav O. Strekalev, Valeriya V. Gribova

Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, Vladivostok, *strekalev@dvo.ru*

Abstract. The paper proposes a model of an immersive virtual simulator with biofeedback, which underlies the instrumental complex for creating, reproducing and maintaining immersive virtual simulators with biofeedback (IVT with BFB). The model is designed to form an information representation of a virtual simulator. The composition and interaction between the components of the model are shown, which make it possible to design, create, maintain and reproduce ICT with biofeedback. The stages of creation of ICT with biofeedback and the tools used are considered. The use of the instrumental complex is demonstrated in the example of the development of a virtual simulator. Currently, work is underway to describe scenarios for various research methods based on the presented model and their implementation.

Keywords: ontology complex, virtual reality, virtual simulators, biofeedback, instrumental complex, virtual environment

References

1. Kopeliovich D.I., Safonov A.L., Kondratenko R.V. Primeneniye metodov iskusstvennogo intellekta v 3d-trenazherakh na osnove funktsional'no-logicheskikh modeley [Application of artificial intelligence methods in 3d simulators based on functional-logical models]. Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proyektirovanii i upravleni [Automation and modeling in design and management], 2020, no. 4 (10), pp. 33-39.
2. Burtseva D.Ya., Mendeleev E.A., Khonin I.L. [and others] Razrabotka VR. Osobennosti sovmestimosti s neyrotekhnologiyami [VR development. Features of compatibility with neurotechnologies], Vestnik NovGU [Bulletin of NovGU], 2021, no. 4 (125), pp. 10-14.
3. Butkina A.A., Kochkaeva Yu.S., Chudnova R.A. Razrabotka osnovnogo funktsionala igrovogo prilozheniya dlya personal'nykh komp'yuterov s ispol'zovaniyem Unreal Engine [Development of the main functionality of a gaming application for personal computers using Unreal Engine]. Ogaryov-Online, 2022, no. 14 (183), 9 p.
4. Kozlenko T.A., Pridvizhkin S.V. BIM I VR: Razrabotka programmnogo modulya dlya integratsii informatsionnogo modelirovaniya zdaniy i virtual'noy real'nosti [BIM and VR. Development of a software module for the integration of building information modeling and virtual reality]. Vestnik SibADI [Bulletin of SibADI], 2021, no. 4 (80), pp. 440-449.
5. Zgoda Yu.N., Shumilov K.A. Avtomatizirovannoye postroyeniye interaktivnykh vizualizatsiy BIM-modeley v virtual'noy real'nosti [Automated construction of interactive visualizations of BIM-models in virtual reality]. Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya. [Engineering and construction bulletin of the Caspian Sea], 2019, no. 4 (30), pp. 113-118.
6. LaValle S.M. Virtual Reality. University of Illinois. Cambridge University Press, 2017, 430 p., available at: http://vr.cs.uiuc.edu/vrbook.pdf (accessed: 03/11/2023).

7. Mukhina O.V Nikitin A.V. Metod adaptivnogo predstavleniya interaktivnykh elektronnykh sred s pogruzheniyem [Method of adaptive representation of interactive electronic media with immersion]. Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy [Information and control systems], 2010, no. 1 (44), pp. 15-18.
8. Aladyshev A.V., Subbotin E.A. Funktsional'noye bioupravleniye s obratnoy svyaz'yu – perspektivnaya informatsionnaya tekhnologiya v meditsine [Functional biocontrol with feedback - a promising information technology in medicine]. Sovremennyye naukoyemkiye tekhnologii [Modern science-intensive technologies], 2005, no. 3, pp. 86-87.
9. Krasnova T.I. Potentsial immersivnoy virtual'noy real'nosti v obuchenii inostrannym yazykam [Potential of immersive virtual reality in teaching foreign languages]. MNCO, 2023, no. 1 (98), pp. 89-91.
10. Volovik M.G. Borzikov V.V., Kuznetsov A.N. [and others] Tekhnologii virtual'noy real'nosti v kompleksnoy meditsinskoy reabilitatsii patsiyentov s ogranichennymi vozmozhnostyami (obzor) [Virtual reality technologies in the complex medical rehabilitation of patients with disabilities (review)]. Sovremennyye tekhnologii v meditsine [Modern technologies in medicine], 2018, v. 10, no. 4, pp. 173-182.
11. Dubrovskaya Yu.A., Pikhkonen L.V., Rudenko G.V. Primeneniye trenazherov i simulyatorov dlya formirovaniya professional'nykh navykov pri prakticheskoy podgotovke gornospasateley [Application of trainers and simulators for the formation of professional skills in the practical training of mine rescuers]. Izvestiya RGPU im. A. I. Gertsena [Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences], 2022, no. 203, pp. 168-176.
12. Kugurakova V.V. Matematicheskoye i programmnoye obespecheniye mnogopol'zovatel'skikh trenazherov s pogruzheniyem v immersivnyye virtual'nyye sredy: spetsial'nost' 05.13.11 «Matematicheskoye i programmnoye obespecheniye vychislitel'nykh mashin, kompleksov i komp'yuternykh setey»: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Mathematical and software support for multi-user simulators with immersion in immersive virtual environments: specialty 05.13.11 "Mathematical and software support for computers, complexes and computer networks": thesis for the degree of candidate of technical sciences]. Kazan (Privolzhsky) Federal University, Kazan, 2019, 187 p.
13. Strekalev V.O., Gribova V.V. Kompleks ontologiy dlya virtual'nykh trenazherov s biologicheskoy obratnoy svyaz'yu [A complex of ontologies for virtual simulators with biofeedback]. Ontologiya proyektirovaniya [Design ontology], 2022, v. 12, no. 2 (44), pp. 172-185, DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-2-172-185.
14. Strekalev V.O., Gribova V.V. Instrumental'nyy kompleks dlya immersivnykh virtual'nykh trenazherov s biologicheskoy obratnoy svyaz'yu [Tool complex for immersive virtual simulators with biofeedback]. Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2020, no. 8, pp. 19-28, pp. 019-028, DOI: 10.14489/vkit.2020.08.
15. Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M. [and others]. Oblachnaya platforma IACPaaS dlya razrabotki obolochek intellektual'nykh servisov: sostoyaniye i perspektivy razvitiya [Cloud platform IACPaaS for the development of shells of intelligent services, state of the art and development prospects]. Programmnyye produkty i sistemy [Software products and systems], 2018, no. 3, pp.527-536.

Vyacheslav Olegovich Strekalev. *Junior Research associate of the Intelligent systems lab at the Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, AuthorID (RSCI): 1136593, ORCID: 0000-0002-6209-6226, Researcher ID (WoS): AAD-6228-2022, strekalev@dvo.ru.*

Valeriya Victorovna Gribova. *Head of the Intelligent systems lab in the Institute for Automation & Control Processes of the FEB RAS, Research Deputy Director, an expert of the Analytic Center in Government of Russian Federation, a Vice-President of Russian Association of Artificial Intelligence, AuthorID (RSCI): 7400, Author ID (Scopus): 7801667631, ORCID: 0000-0001-9393-351X, Researcher ID (WoS): Q-4250-2016, gribova@iacp.dvo.ru.*

Статья поступила в редакцию 24.05.2023; одобрена после рецензирования 13.06.2023; принята к публикации 16.06.2023.
The article was submitted 05/24/2023; approved after reviewing 06/13/2023; accepted for publication 06/16/2023.

УДК 004.0577.4
DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.003

Моделирование алгоритмов позиционирования в сенсорной сети на основе DV-HOP

Виноградов Геннадий Павлович[1,2], Шаронов Дмитрий Александрович[2]
[1]Тверской государственный технический университет, Россия, Тверь, *wgp272ng@mail.ru,*
[2]НИИ Центрпрограммсистем, Россия, Тверь

Аннотация. Предметом исследования являются алгоритмы локализации узлов в реагирующих беспроводных сенсорных сетях (RWSN), которые имеют большую перспективу применения во многих областях. **Актуальность работы** связана с тем, что задача локализации узлов является одной из ключевых в RWSN. Алгоритмы локализации должны быть энергоэффективными, не требовать дополнительных аппаратурных решений и больших вычислительных ресурсов, использовать встроенный протокол маршрутизации, быть защищенными от помех. Перспективными в этом плане является варианты алгоритмов локализации перехода по вектору расстояния (DV-Hop), однако они характеризуется достаточно большой ошибкой при оценке местоположения сенсорных узлов. **Целью работы** является анализ точности существующих алгоритмов DV-Hop при определении местоположения неизвестных узлов внутри области размещения с использованием инфраструктуры сети, технологии радиообмена между узлами для оценки степени их пригодности при решении задач локального позиционирования после выполнения этапа выброса узлов на местности. **Метод.** В процессе анализа использован метод последовательного усложнения моделируемых алгоритмов локализации сенсорных узлов в RWSN с учетом типов узлов и режимов их работы. **Основные результаты.** Исследования показали, что наиболее эффективным является алгоритм, в котором минимальный переход корректируется путем использования технологии определения расстояния на основе мощности принимаемого сигнала (RSSI), а среднее расстояние перехода корректируется средневзвешенным значением ошибки расстояния перехода и ошибки оцененного расстояния. Имитационный эксперимент показал значительное улучшение характеристик классического алгоритма DV-Hop при определении местоположения и уменьшение до приемлемых величин ошибки определения местоположения узлов. При проведении имитационного эксперимента в среде NetTopo использован алгоритм CKN. Результаты эксперимента показывают, что улучшенный алгоритм уменьшает ошибку определения местоположения и обладает более высокой точностью определения местоположения. **Практическая значимость.** Обоснована целесообразность применения полученных результатов при проектировании RWSN.

Ключевые слова: беспроводные сети, моделирование, позиционирование, алгоритмы локализации

Цитирование: Виноградов Г.П. Моделирование алгоритмов позиционирования в сенсорной сети на основе DV-HOP / Г.П. Виноградов, Д.А. Шаронов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 25-35. – DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.003.

Введение. Реагирующая беспроводная сенсорная сеть (RWSN) – это сеть пространственно-распределенных сенсорных узлов, используемая для контроля физических параметров некоторой области и выработки воздействия на нее для получения желаемых состояний [1]. Широкое применение RWSN в различных областях стало возможным благодаря результатам, полученным в процессе развития микроэлектроники, теории управления сенсорными сетями и узлами [2]. В реагирующих сенсорных сетях данные, фиксируемые сенсорными узлами, используются для определения факта и места некоторого события для последующего прогнозирования его развития, расчета величины воздействия на среду. Такая сеть способна определять факт проникновения в защищаемую область, число и тип объектов проникновения, скорость, направление их движения и т.п. Достижение максимального эффекта от воздействия на объекты проникновения предполагает знание местоположения узлов сети с требуемой точностью [2]. В ряде приложений важной характеристикой является помехозащищенность. Это делает актуальной задачу локализации сенсорных узлов с минимальной погрешностью с выполнением требований по защищенности.

Сенсорные узлы в RWSN можно разделить на два типа: якорные (опорные) и узлы, позиция которых определяется расчетным путем с помощью алгоритмов локализации (неизвестные узлы). Местоположения опорных узлов определяются глобальной системой позиционирования (*GPS, ГЛОНАСС)* или привязкой к реперам ручным способом.

Алгоритмы локализации для RWSN можно разделить на две категории: основанные на измерении дальности и не требующие измерения дальности (англ. range-based and range-free). Первые используют результат измерения расстояния между узлами датчиков для оценки координат неизвестных узлов, алгоритмы второй категории не требуют таких измерений.

К наиболее распространенным методам первой категории относятся методы, определяющие время прибытия сигнала (ToA) [3], оценивающие разницу во времени прибытия сигнала (TDoA) [4], угол прибытия (AoA) [5] и измеряющие уровень мощности принятого сигнала (RSSI) [6]. При использовании алгоритма ToA [3] каждый узел сети посылает сообщение соседним узлам и использует время передачи сигнала для оценки расстояний до соседних узлов. В TDoA [4] используются два сигнала с разными скоростями распространения радиоволн (обычно это радио и ультразвуковые сигналы). Сенсорный узел сначала посылает радиосигнал соседям, а затем, через фиксированный интервал времени посылает ультразвуковой сигнал с фиксированным шаблоном частоты [7]. Как только сосед получает радиосигнал, он записывает время получения радиосигнала и время получения ультразвука. Основываясь на двух зарегистрированных временах и фиксированном временном интервале, сенсорный узел вычисляет расстояние до этого соседа. ToA требует точной синхронизации времени между узлами датчиков. TDoA менее зависит от синхронизации времени, но методы ToA и TDoA сложно реализовать в радиочастотных IPSS, поскольку для достижения приемлемой точности необходимы очень точные таймеры. Кроме того, в условиях многолучевого распространения определение времени прибытия является точным только для очень большой полосы пропускания сигнала. По этой причине некоторые системы используют сверхширокополосную технологию для точной оценки ToA.

AoA (angle of arrival) основан на определении направления на источник сигнала. Для этого используются базовые станции (БС), снабженные несколькими антеннами или антенной с фазированной антенной решеткой. Получив направление на источник сигнала от БС, можно определить место его нахождения. Точность этого метода зависит от направленности антенны, многолучевого отражения и замирания сигнала. Это создает две основные проблемы: узлам требуется направленная антенна с формированием луча, а между передатчиком и приемником необходим путь распространения прямой видимости. Недостатки – сложность антенны, вычислительная сложность определения углов в AoA достаточно велика.

Метод RSSI основан на эффекте падения уровня мощности радиосигнала с увеличением расстояния распространения [6]. Так как уровень мощности сигнала отправителя известен, принимающий сенсорный узел, имея средства измерения уровня мощности принятого сигнала, может вычислить расстояние до отправителя. Помехи и замирание в канале связи являются основным источником ошибок в RSSI [8].

Наиболее часто используемые алгоритмы локализации, *не требующие измерения расстояния* – это Centroid [9], вектор расстояние-переход (DV-Hop) [10], Amorphous [11] и аппроксимационный тест точечной триангуляции (PIT) [12].

В Centroid [9] каждый неизвестный узел вычисляет координаты как центр тяжести координат опорных узлов в пределах радиуса передачи (TR). В DV-Hop [10] через широковещательную передачу пакетов определяется минимальное количество переходов (HC) между сенсорными узлами и якорями. Неизвестный узел оценивает расстояние до узла привязки как произведение минимального HC от этого узла до узла привязки на значение среднего расстояния

за переход (dph). Затем, используя расчетные расстояния до узлов привязки, каждый неизвестный узел рассчитывает свое местоположение. Метод Amorphous [11] схож с DV-Hop. Различие состоит в том, что в нем используются более сложные способы вычисления минимального НС между узлами датчиков, а также оценки dph. APIT [12] сегментирует область RWSN на возможно большое количество триад, используя различные наборы опорных узлов. Неизвестный узел идентифицирует возможные триады, которые окружают его местоположение, с помощью сообщений от узлов привязки и получает область перекрытия этих треугольников. После этого он оценивает свое местоположение как центр тяжести этой перекрывающейся области.

Точность локализации APIT и Centroid в значительной степени зависит от плотности расположения сенсорных узлов в RWSN и радиуса связи сенсорных узлов. Алгоритм Amorphous требует оценки средней плотности сенсорных узлов RWSN. DV-Hop не использует уровень мощности сигнала, простой в реализации алгоритм, более устойчив к шуму и замиранию, не требует дополнительной аппаратурной поддержки, но он не всегда может обеспечить требуемую точность локализации [12].

Наиболее известны две схемы повышения эффективности DV-Hop – это DV-Hop с коррекцией (CDV-Hop) [13] и улучшенный DV-Hop (IDV-Hop) [14].

Целью работы является анализ существующих алгоритмов определения местоположения неизвестных узлов внутри области размещения с использованием инфраструктуры беспроводных сенсорных сетей (БСС), технологии радиообмена между узлами для оценки степени их пригодности для решения задач локального позиционирования после выполнения этапа выброса узлов на местности.

2. Краткое описание базового алгоритма DV-Hop и его модификаций. Принцип алгоритма позиционирования DV-Hop аналогичен классическому алгоритму маршрутизации и выполняется за три этапа [12]:

1. На этапе 1 каждый узел привязки в A широковещательно передает сообщение в сеть (всем сенсорным узлам в S), которое содержит информацию о местоположении узла привязки и параметр, указывающий количество переходов h с начальным значением 1. После получения информации от узла-маяка его соседний узел увеличивает значение перехода h на единицу и пересылает информацию с новым h следующему соседнему узлу. Каждый принимающий сенсорный узел ведет таблицу переходов (НТ). Запись в НТ соответствует узлу привязки и создается при получении сообщения h от каждого узла привязки. Запись содержит идентификацию и координаты узла привязки, а также ссылку на этот узел. При получении сообщения h от узла привязки (маяка) $\alpha \in A$ сенсорным узлом $\varepsilon \in S$ либо обновляется запись для α, либо создается новая запись для α. Если НС в сообщении меньше, чем НС в записи для α, то ε обновляет запись, используя НС из сообщения. Затем он передает свое сообщение с h, увеличивая его на 1; в противном случае ε отбрасывает сообщение. Процесс завершается, когда ε не получает никаких сообщений h по истечении определенного периода времени. В конце этого процесса ε сохраняет минимальные h для всех узлов привязки, которых он может достичь [10]. Таким образом, каждый принимающий узел определяет минимальное значение перехода до каждого узла привязки.

2. Вычисление и трансляция dph каждого узла привязки. На этапе 2 каждый узел привязки $\alpha \in A$ вычисляет dph_α , как показано в [10]:

$$dph_\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{j \le N_\alpha} d(\alpha,\beta_j)}{\sum_{j=1}^{j \le N_\alpha} h_j} \quad (1)$$

где $A_\alpha \subseteq A$ – множество опорных узлов в НТ для α, $N_\alpha = |A_\alpha|$, $\beta_j \in A_\alpha$ для $1 \le j \le N_\alpha$, а h_j – минимальный h от α до β_j.

Каждый узел привязки широковещательно передает сообщение с dph всем неизвестным узлам в U. При получении неизвестным узлом $\mu \in U$ сообщения с dph он сохраняет наименьшую величину dph и передает сообщение соседним узлам. В противном случае он отбрасывает сообщение. Этот процесс заканчивается, когда μ не получает какие-либо сообщения dph по истечении определенного промежутка времени. В конце этого процесса μ сохраняет минимальное значение dph, хотя бы от одного узла привязки [10].

3. Для каждого неизвестного узла $\mu \in U$ известно $A_\mu \subseteq A$ множество опорных узлов в НТ, тогда для всех $N_\mu = |A_\mu|$ и $v_i \in A_\mu$ $1 \le i \le N_\mu$ вычисляется λ_i – расстояние от μ до v_i, [10]

$$\lambda_i = h_i \times dph_\mu \tag{2}$$

где h_i – минимальное значение h от μ до v_i.

Расстояние между неизвестным узлом и узлом привязки v_i с координатами (xi; yi) можно вычислить в соответствии с [10]:

$$\lambda_i = d(\mu, v_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}. \tag{3}$$

Если ввести обозначения, как показано в [10]

$$B = -2 \times \begin{bmatrix} x_1 - x_{N_\mu} & y_1 - y_{N_\mu} \\ x_2 - x_{N_\mu} & y_2 - y_{N_\mu} \\ x_3 - x_{N_\mu} & y_3 - y_{N_\mu} \\ \dots\dots. & \\ x_{N_\mu - 1} - x_{N_\mu} & y_{N_\mu - 1} - y_{N_\mu} \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 - \lambda_{N_\mu}^2 - x_1^2 + x_{N_\mu}^2 - y_1^2 + y_{N_\mu}^2 \\ \lambda_2^2 - \lambda_{N_\mu}^2 - x_2^2 + x_{N_\mu}^2 - y_2^2 + y_{N_\mu}^2 \\ \lambda_3^2 - \lambda_{N_\mu}^2 - x_3^2 + x_{N_\mu}^2 - y_3^2 + y_{N_\mu}^2 \\ \dots\dots. \\ \lambda_{N_\mu - 1}^2 - \lambda_{N_\mu}^2 - x_{N_\mu - 1}^2 + x_{N_\mu}^2 - y_{N_\mu - 1}^2 + y_{N_\mu}^2 \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},$$

то для вычисления v можно использовать метод наименьших квадратов

$$v = (BB^T)^{-1} B^T P$$

Алгоритм CDV-Hop также выполняется в три этапа. Этапы 1 и 2 CDV-Hop такие же, как у DV-Hop, но этап 3 CDV-Hop отличается от этапа 3 DV-Hop. Дело в том, что пути между узлами датчиков не являются прямыми линиями, поэтому исходный метод DV-Hop содержит систематическую ошибку в (1). Для повышения точности оценки определения расстояния, в CDV-Hop введена коррекция вида

$$\lambda_i = h_i \times dph_\mu + c_i = h_i \times dph_\mu + \frac{h_i \times (TR - dph_\mu)}{TR} \tag{4}$$

где c_i – это корректирующий коэффициент [13].

Алгоритм IDV-Hop также состоит из трех этапов. Этап 1 IDV-Hop такой же, как этап 1 DV-Hop, но этапы 2 и 3 IDV-Hop отличаются от этапов 2 и 3 DV-Hop. На этапе 2 после вычисления *dph* с помощью (2) каждый узел привязки передает значение *dph* в сообщении всем неизвестным узлам в *U*. Каждый неизвестный узел $\mu \in U$ сохраняет *dph* от разных узлов привязки. Этот процесс завершается, когда μ по истечении определенного периода времени не поступает никаких сообщений *dph*. В конце этого процесса μ сохраняет *dph* из всех узлов привязки в A_μ. На этапе 3 каждый неизвестный узел $\mu \in U$ вычисляет среднее значение *dph* dph_μ как показано в [14]

$$dph_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^{i<N_{\mu}} dph_{v_i}}{N_{\mu}} \quad (5)$$

где dph_{v_i} - это оцениваемое расстояние от λ_i до v_i, с использованием (2).

Из (4) имеем $\lambda_i^2 = x_i^2 + y_i^2 - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2$, откуда следует $\lambda_i^2 - r_i = -2x_i x - 2y_i y + r$ [14], где $r_i = x_i^2 + y_i^2$, и $r = x^2 + y^2$.

Если ввести вектор $z = [x, y, r]^T$, то его оценка также может быть получена методом наименьших квадратов путем минимизации $\|Pz - q\|$ $z = (P^T P)^{-1} P^T q$ [14].

Основными факторами, влияющими на оценку местоположения неизвестных узлов этими алгоритмами, являются: плотность узлов привязки (AND), количество сенсорных узлов (NS), TR радиус радиовидимости сенсорных узлов и размер окрестности (NS) узлов датчиков. Целью работы являлось исследование влияния этих факторов на эффективность работы описанных трех вариантов алгоритмов.

Моделируемая сенсорная сеть представлена N узлами, которые случайным образом равномерно распределены на двумерном сенсорном поле площадью S и узлами привязки – базовыми станциями (БС). Каждая БС содержит 4-е дополнительных узла (однотипных мотам сенсорного поля), которые являются выносными антеннами для БС.

Формальная модель RWSN – это граф $G = (S; E)$, где S – множество сенсорных узлов в двумерном евклидовом пространстве, а E описывает смежность между сенсорными узлами. $S = A \cup U$ и $A \cap U = \emptyset$, где A - множество узлов привязки, а U - множество неизвестных узлов. $M = |S|, N = |A|$ и $L = |U|$, так что $M = N + L$. Если все сенсорные узлы в S идентичны, любые два сенсорных узла являются соседями тогда и только тогда, когда евклидово расстояние между ними составляет не более t. То есть для $\delta, \varepsilon \in S, \{\delta, \varepsilon\} \in E \Leftrightarrow d(\delta, \varepsilon) \leq t$, где $d(\delta, \varepsilon)$ - евклидово расстояние между δ и ε.

3. Анализ ошибок алгоритма локализации DV-Hop. Использование протокола маршрутизации и технических средств при развертывании RWSN во всех трех вариантов алгоритма DV-Hop для оценки неизвестным узлом своих координат является источником ошибок в их рассчитанных значениях. Во-первых, это связано со случайным и неравномерным размещением узлов на контролируемой площади. Значит, расстояние между неизвестными узлами и узлом маяка в зоне его радиовидимости не будет одинаковым, но расчетные расстояния будут одинаковыми, так как в этом случае значения перехода между всеми неизвестными узлами и узлом маяка в зоне его радиовидимости принимаются равными 1. Для исключения этой ошибки необходимо определять значение перехода в этой ситуации в соответствии с фактическим расстоянием между узлами. Во-вторых, при вычислении расстояния между неизвестным узлом и узлом маяка используется среднее расстояние перехода до ближайшего узла маяка, но фактически линия перехода от неизвестного узла до узлов маяка представляет собой не прямую, а некоторую ломаную линию. Поэтому использование среднего расстояния перехода приводит к ошибкам при вычислении расстояния между неизвестными узлами и узлами маяка. В-третьих, использование оценочных значений в методе наименьших квадратов приводит к возрастанию погрешности при вычислении положения узла. Ее снижение возможно за счет использования коррекции наименьшего значения перехода и среднего расстояния перехода.

Пусть d_0 – расстояние от узла маяка, где потерей мощности сигнала можно пренебречь (d_0 = 1м), $Pr(x)$ – мощность сигнала, соответствующая расстоянию x, известно значение RSSI приемного узла, находящегося на расстоянии 1 м от передающего узла $Pr(d_0)$ – мощность, соответствующая расстоянию d_0, k – коэффициент потерь мощности сигнала. Введем случайную

ошибку X_σ со средним значением равным 0 и стандартным отклонением σ. Обозначим мощность сигнала у, принимаемого узлом через $Pr(d)$, тогда значение RSSI в точке x от передающего узла может быть получено из уравнения:

$$\Pr(x) = A - 10k_0 \lg(d) + X_\sigma, \tag{6}$$

где $A = Pr(d_0)$.

В пределах радиуса *TR* радиовидимости узла маяка определим индивидуальную величину h_1 первого перехода для каждого неизвестного узла в соответствии с интенсивностью ослабления сигнала RSSI. Это позволит уменьшить влияние переходов на ошибку позиционирования и повысить точность позиционирования. Введем число m >1 и разобьем первый переход на m уровней. Это позволяет для каждого подуровня использовать метод RSSI следующим образом

$$A - 10klg\left(\frac{i-1}{m}R\right) + X_\sigma \le RSSI(x) \le A - 10klg\left(\frac{i}{m}R\right) + X_\sigma, \tag{7}$$

где $i \le$ m – положительное целое число, x – расстояние узла до маяка.

Выражение (7) позволяет назначать узлам, находящимся в зоне радио видимости маяка, различные индивидуальные значения весов первого перехода по правилу:

$$h_1^i = \begin{cases} \frac{1}{m}, \quad A - 10klg\left(\frac{1}{m}R\right) + X_\sigma < RSSI(x) \le RSSI(d_0) \\ \frac{i}{m}, A - 10klg\left(\frac{i}{m}R\right) + X_\sigma < RSSI(x) \le A - 10klg\left(\frac{i-1}{m}R\right) + X_\sigma \\ 1, A - 10klg(R) + X_\sigma < RSSI(x) \le A - 10klg\left(\frac{m-1}{m}R\right) + X_\sigma \end{cases} \tag{8}$$

где $i = \overline{1,m}$.

Полученное в (8) значение $h_1^i, i = \overline{1,m}$ первого перехода может быть использовано для коррекции значений других переходов. Для этого введем формулу расчета значения веса переходов между узлами H_j как отношение расстояния d_j j-го перехода, измеренного с помощью технологии RSSI, к расстоянию первого перехода d_1

$$H_j = \frac{d_j}{d_1} = 10^{\frac{\Pr(d_0) - \Pr dB}{10k_0}}, j > 0 \tag{9}$$

Путем умножения H_j на значение h_1 первого перехода можно получить значение j-го перехода этого перехода, и скорректировать расстояние между сенсорными узлами сети следующим образом. Пусть количество узлов в области мониторинга маяка равно n, тогда, используя скорректированное значение перехода среднее расстояние перехода каждого узла маяка $HopSize_i$ сети вычисляется по формуле классического Hop-DV [1]

$$\Delta_{avg} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} HopSize_i.$$

Определим для каждого i–го узла оценку отклонения среднего расстояния перехода узла маяка от Δ_{avg}

$$\Delta_{i1} = \left(HopSize_i - \Delta_{avg}\right)^2.$$

Так как фактические координаты опорных узлов известны, то можно определить отклонение фактического от расчетного расстояния между узлами маяков i и j сети

$$\Delta_{i2} = \frac{1}{n-1}\sum_{i \ne j}\left(\frac{d_{ij} - \acute{d}_{ij}}{hop_{ij}}\right) \tag{10}$$

Здесь d_{ij} – фактическое расстояние между узлом маяка i и j. $\acute{d}_{ij} = HopSize_i \times hop_{ij}$ – оцениваемое расстояние между узлами маяка i и j; hop_{ij} – минимальный переход между узлами маяка i и j.

Введем оценку $\varphi_i = \frac{1}{1+1/(D_{i1}+D_{i2})}$, выполняющую роль весового коэффициента для рассчитанного среднего расстояния перехода между узлами маяка i и j по формуле

$Avghopsize_{ij} = \frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}}{1+1/(D_{i1}+D_{i2})}$. Тогда взвешенное значение среднего расстояние перехода каждого узла маяка сети определяется

$$\chi = \frac{\sum_j^{n-1}(\varphi_j \cdot Avghopsize_{ij})}{\sum_j^{n-1}\varphi_j} \quad (11)$$

Если (x_k, y_k) координаты неизвестного узла и (x_i, y_i) узла маяка, то расстояние перехода от неизвестного узла k до узла маяка i будет определяться выражением

$$d_{ki} = h_{ki} \times \chi \quad (12)$$

где k и i – переменные.

4. Реализация алгоритмов DV-Hop. Моделирование описанных алгоритмов локализации выполнено средствами NetTopo [17, 18], который предоставляет расширяемую интегрированную платформу моделирования и визуализации. Его достоинством является возможность интегрироваться с реальными испытательными стендами RWSN. Это симулятор RWSN с открытым исходным кодом, ориентированный на визуализацию связей между сенсорными узлами и данных зондирования и топологии RWSN. В NetTopo пользователи могут задавать и изменять поведение сенсорных узлов при обработке событий. Расширяемость NetTopo позволяет моделировать различные алгоритмы локализации для RWSN.

Архитектура NetTopo содержит компонент Node NetTopo, моделирующий сенсорные узлы. Сенсорные узлы реализуют различную функциональность. NetTopo поддерживает интерфейс VNode, который определяет несколько методов, моделирующих общее поведение сенсорного узла. Пользователи могут настраивать свои собственные классы сенсорных узлов, реализуя интерфейс VNode. Класс Wireless Sensor Network моделирует RWSN, содержащий ноль или более сенсорных узлов. NetTopo позволяет реализовать два класса сенсорных узлов: узел-маяк и класс Unknown Node (неизвестных узлов) для алгоритмов DV-Hop. Эти два класса являются производными от класса DVHopNode. Класс DVHopNode расширяет класс SensorNode и реализует интерфейс VNode. В дополнение к функциональным возможностям класса DVHopNode, класс anchorNode вычисляет и транслирует DPHs. Класс UnknownNode обрабатывает сообщения DPH и оценивает координаты.

Алгоритм RWSN представлен классом, реализующим интерфейс Algorithm. Компонент Algorithm содержит алгоритмы маршрутизации, кластеризации, планирования и управления вплоть до алгоритмов локализации [19]. Каждый алгоритм имеет несколько функциональных возможностей. Функциональность алгоритма представлена классом, реализующим интерфейс AlgorFunc.

Алгоритмы DV-Hop реализованы в классах Algor DV HOP, Algor C-DVHOP и Algor IDVHOP соответственно. Функциональные возможности CDV-Hop и IDV-Hop реализованы в классах CDVHOP_Run CDVHop и IDVHOP_Run_IDVHop соответственно. Поскольку и CDV-Hop, и IDV-Hop имеют некоторые общие черты с DV-Hop, классы CDVHOP_Run_CDVHop и IDVHOP_Run_IDVHop являются производными от класса DVHOP_Run_DVHop.

При моделировании алгоритмов маршрутизации необходимо выводить последовательно из спящего режима только те узлы, которые являются соседями узла привязки. Одним из эффективных алгоритмов планирования режима работа/сон узлов сети является распределенный алгоритм подключения к узлу K-Neighbor (CKN). Он позволяет эффективно уменьшить количество бодрствующих узлов в сети во время работы, гарантируя при этом, что вся сеть находится в подключенном состоянии и выполняется требуемое время передачи пакетов. В CKN бодрствующий сенсорный узел означает, что этот сенсорный узел участвует в RWSN, тогда как спящий сенсорный узел не участвует в RWSN. Индекс k в CKN обозначает подмножество бодрствующих сенсорных узлов $C \subseteq S$. Выбранное подмножество бодрствующих сенсорных узлов C удовлетворяет следующим условиям:

1. Каждый сенсорный узел $\sigma \in S$ имеет, по меньшей мере, $min(k, D_{e_\sigma})$ бодрствующих соседей из C, где D_{e_σ} - количество соседей σ из S.
2. Сенсорные узлы в C подключены, если сенсорные узлы в S подключены.
3. Ни одно подмножество S, удовлетворяющее двум вышеуказанным условиям, не имеет меньшего числа сенсорных узлов, чем C.

Алгоритм CKN обеспечивает субоптимальное решение для выбора сенсорных узлов, удовлетворяющих условиям 1-3 [15, 16]. NS выбранных сенсорных узлов – это k. В CKN, таким образом, время разделено на дискретные эпохи, поэтому подмножества бодрствующих сенсорных узлов, выбранные CKN, различаются по эпохам. В каждую эпоху CKN выполняет следующий алгоритм:

Для каждого узла-сенсора $\sigma \in S$

1: Выбрать ранг для σ, как равномерно распределенное случайное число между 0 и 1.

2: Широковещательно сообщить ранг и принимать ранги на данный момент от соседей N_{e_σ} . Пусть R_σ – множество этих рангов.

3: Широковещательно транслировать R_σ и получат R_ρ от других $\rho \in N_{\mathrm{e}_\sigma}$.

4: Если $\left|\mathrm{N}_{\mathrm{e}_\sigma} < k\right|$ или $\left|\mathrm{N}_{\mathrm{e}_\rho} < k\right|$ для $\rho \in \mathrm{N}_{\mathrm{e}_\sigma}$, σ остается бодрствующим. Останов.

5: Вычислить $\mathrm{C}_\sigma = \{\rho | \rho \in N_{\mathrm{e}_\sigma} \wedge \mathrm{rank}_\rho < \mathrm{rank}_\sigma\}$.

6: σ переходит в спящий режим, если выполняются оба следующих условия; в противном случае σ остается бодрствующим.

Любые два сенсорных узла в C_σ соединены либо напрямую, либо через сенсорные узлы, удовлетворяющие обоим следующим условиям:

- в пределах окрестности 2-х переходов от σ;
- с рангами меньше rank_σ.

Любой сенсорный узел в N_{e_σ} имеет по крайней мере k соседей из C_σ .

7: Останов.

5. Результаты. Количественная оценка точности алгоритмов локализации проводилась путем имитационного эксперимента. Размер RWSN задавался 500 м×500 м. Ошибка локализации неизвестного узла i определялась выражением

$$error_i = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2},$$

где $1 \le i \le L$, Δx_i и Δy_i – ошибки в определении координатах узла i.

Оценка ошибка локализации сети U в целом вычислялась по формуле

$$\overline{error} = \frac{\sum_{i=1}^{L} error_i}{L}.$$

Для исследования влияния на точность позиционирования *плотности размещения узлов-маяков* AND *и радиуса радиовидимости* TR их значения задавались как в [15] 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 20% и 30%, и 45 м, 60 м, 75 м, 90 м, 105 м, 120 м, 135 м и 150 м соответственно, SNN задавалась равным 400. Эксперименты показали, что для всех четырех алгоритмов при фиксированном TR увеличение AND показывает тенденцию снижения средней ошибки локализации. При всех значениях AND алгоритмы показали наименьшую ошибку локализации при значении TR ∈[50-60] м. При изменении значения AND последний алгоритм показал меньшую ошибку локализации, чем традиционный DV-Hop в среднем в два раза.

При исследовании влияния на точность позиционирования *количества сенсорных узлов* SNN и *радиуса связи* TP значение AND задавалось равным 10%, величина SNN изменялась как 300, 400, 500, 600, 700 и 800, значение радиуса всех сенсорных узлов изменялось 30 м, 45 м, 60 м, 75 м, 90 м, 105 м, 120 м, 135 м и 150 м [15]. Эксперимент повторялся 100 раз, и вычис-

лялась средняя ошибка локализации по 100 реализациям для каждой пары SNN и TR. Наилучшие TR для всех алгоритмов составляют при SNN равным 300, 400, 500, 600, 700 и 800 75 м, 60 м, 60 м, 45 м, 45 м и 45 м соответственно, что соответствует результатам работы [15].

При исследовании влияния NS на точность позиционирования алгоритмов DV-Hop использовался CKN. При запуске CKN с различными значениями *k* генерируются сети с значениями NS изменяющимися как 1, 3, 5, 7 и ∞. Выполнялись несколько эпох CKN с одинаковым значением *k* для каждого RWSN. AND изменялось, как и в первом эксперименте. Средняя ошибка локализации вычислялась для 50 эпох и 20 RWSN для каждой пары AND и NS. Эксперимент показал, что увеличение NS от 1 до 5 уменьшает ошибку локализации. Одинаковые значения точности наблюдались, когда NS принимало значения 5, 7 и ∞. Эксперименты показали, что при увеличении NS с 1 до 3 происходило уменьшение ошибки локализации более, чем на 50%. При увеличении NS с 3 до 5 среднее количество бодрствующих сенсорных узлов увеличивается на 35%. Снижение ошибки локализации всех алгоритмов составило от 6% до 12%. При этом время работы всех алгоритмов значительно увеличилось, что соответствует увеличению вычислительных энергетических затрат.

Заключение. Результаты исследования влияния на эффективность локализации трех вариантов алгоритмов DV-Hop основных параметров топологии беспроводной сети показали определенное преимущество описанного подхода. При исследовании влияния плотности узлов привязки (AND) и радиуса передачи (TR) сенсорных узлов на точность локализации узлов тремя алгоритмами лучшие результаты показал IDV-Hop. При заданном TR все три алгоритма показали, что увеличение AND уменьшило ошибку локализации и при значении TR = 60 м при заданном AND все три алгоритма показали наименьшую ошибку локализации.

Исследование влияния AND и размера окрестности (NS) на точность трех алгоритмов с алгоритмом связанной k-окрестности (CKN) показало, что при заданных AND увеличение NS уменьшало ошибку локализации, при этом NS изменялся в диапазоне от 1 до 5. Ошибка локализации была одинаковой при NS, равной 5, 7 и ∞. Для всех трех алгоритмов 3 был лучшим NS в эксперименте, учитывая, как ошибку локализации, так и время выполнения. Для всех трех алгоритмов, при увеличении NS с 3 до 5, среднее количество бодрствующих сенсорных узлов увеличивалось на 34%, снижение ошибки локализации находилось в диапазоне от 6% до 10%. В соответствии с вычислительной сложностью оценки координат расчетное время выполнения всех трех алгоритмов значительно возросло.

Список источников

1. Виноградов Г.П. Алгоритмы управления процессами в реагирующих сенсорных сетях для защиты объектов / Г.П. Виноградов // Программные продукты и системы, 2022. – № 2. – С. 229-239.
2. Виноградов Г.П. Интеллектуальные информационные технологии в соединениях вооруженных сил / Г.П. Виноградов // Двадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, КИИ-22 (Москва, 21-23 декабря 2022г.). –Т.2. – М.: Издательство МЭИ, 2022. – С. 110-121.
3. Rovňáková J., Kocur, D. TOA Estimation and data association for through-wall tracking of moving targets. J Wireless Com Network 2010, 420767 (2010), DOI:10.1155/2010/420767.
4. Li Cong, Weihua Zhuang. Hybrid TDOA/AOA Mobile user location for wideband CDMA cellular systems. IEEE Transactions on wireless communications, July 2002, v. 1, no. 3, pp. 439-447.
5. Torrieri D.J. Statistical theory of passive location systems. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 1984, vol. 20, no. 2, pp. 183-198,
6. Pierlot V., Droogenbroeck M. Van, Urbin-Choffray M. A new three object triangulation algorithm based on the power center of three circles. Research and education in robotics (EUROBOT), 2011, vol. 161, pp. 248-262.
7. Djuric P.M. and Kay S.M. Parameter estimation of chirp signals. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990, vol. 38, no. 12, pp. 2118-2126,
8. Liu H., Darabi H., Banerjee P., Liu J. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews, 2007, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080.

9. Blumenthal J., Grossmann R., Golatowski F., Timmermann D. Weighted centroid localization in Zigbee-based sensor networks. In Intelligent Signal Processing, 2007 WISP 2007 IEEE International Symposium on, 2008, pp. 1-6.
10. Cheikhrouhou O., Bhatti G.M., Alroobaea R. A hybrid DV-hop algorithm using RSSI for localization in large-scale wireless sensor networks, Sensors, 2018, 18, 1469, DOI: 10.3390/s18051469.
11. Lin-zhe Zhao, Xian-bin Wen, Dan Li. Amorphous localization algorithm based on BP artificial neural network. International journal of distributed sensor networks, 2015, 657241, DOI:10.1155/2015/657241.
12. Li M., Jiang F. , Pei C. Improvement of triangle centroid localization algorithm based on PIT criterion (ITCL-PIT) for WSNs. J Wireless Com Network, 2022, 19 (2022), DOI:10.1186/s13638-022-02109-3.
13. Yu W., Li H. An improved DV-Hop localization method in wireless sensor networks. International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2012, pp. 199-202.
14. Chen H., Sezaki K., Deng P., Cheung H. An improved DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008, pp. 1557-1561.
15. Dalong Xue Research of localization algorithm for wireless sensor network based on DV-Hop. Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 218(2019), DOI:10.1186/s13638-019-1539-5.
16. Han G., Xu H., Duong T. Q., Jiang J., Hara T. Localization algorithms of wireless sensor networks: A survey. Telecommunication Systems, 2013, v. 52, no. 4, pp. 2419-2436.
17. Lei Shu, Chun Wu, Yan Zhang, Jiming Chen, Lei Wang, Manfred Hauswirth. NetTopo: Beyond Simulator and Visualizer for Wireless Sensor Networks, available at: https://www.researchgate.net/ publication/234777348_NetTopo_Beyond_Simulator_and_Visualizer_for_Wireless_Sensor_Networks.
18. Mantovani A., Pagiaro A. NetTopo. Available at: https://sites.google.com/site/leishuderi/nettopo.
19. Yinghui Meng, Yuewen Chen, Qiuwen Zhang, Weiwei Zhang MNCE: Multi-hop node localization algorithm for wireless sensor network based on error correction. Journal on wireless communications and networking, 2019, DOI:10.3390/info11050269.

Виноградов Геннадий Павлович. *Д.т.н., профессор Тверского государственного технического университета, заведующий лабораторией НИИ Центрпрограммсистем, член Российской ассоциации искусственного интеллекта, член Российской ассоциации нечетких систем и мягких вычислений. Основные направления научной деятельности: искусственный интеллект, принятие решений, многоагентные системы. AuthorID: 149735, SPIN: 7288-4042, ORCID 0000-0001-5757-2753, Scopus AutorID:23976986500, wgp272ng@mail.ru.*

Шаронов Дмитрий Александрович. *Заведующий отделом НИИ Центрпрограммсистем. Основные направления научной деятельности: искусственный интеллект, принятие решений, многоагентные системы, SharonovDA@cps.tver.ru.*

UDC 004.0577.4
DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.003

Modeling of positioning algorithms in a sensor network based on DV-HOP

Gennady P. Vinogradov[1,2], Dmitry A. Sharonov[2]

[1] Tver State Technical University, Russia, Tver, *wgp272ng@mail.ru*

[2] Research Institute of Centerprogram Systems, Russia, Tver

Abstract. The subject of the study is the algorithms of node localization in responsive wireless sensor networks (RWSN), which have a great prospect of application in many areas. The relevance of the work is due to the fact that the task of localization of nodes is one of the key ones in RWSN. Localization algorithms should be energy efficient, do not require additional hardware solutions and large computing resources, use a built-in routing protocol, noise-proof. Promising in this regard are variants of algorithms for localization of the transition along the distance vector (DV-Hop). However, they are characterized by a rather large error in estimating the location of sensor nodes. The purpose of the work is to analyze the accuracy of existing DV-Hop algorithms in determining the location of unknown nodes within the placement area using network infrastructure, radio exchange technology between nodes to assess their suitability for solving local positioning problems after performing the node ejection stage on the ground. Method. In the process of analysis, the method of sequential complication of the simulated algorithms for localization of sensor nodes in the RWSN was used, taking into account the types of nodes and their operating modes. The main results. Studies have shown that the most effective algorithm is one in which the minimum transition is corrected by using distance determination technology based on the received signal power (RSSI), and the average transition distance is corrected by the weighted average of the transition distance error and the estimated distance error. The simulation experiment showed a significant improvement in the characteristics of the classical DV-Hop algorithm in determining the location and a reduction to acceptable values of the error in determining the location of nodes. When conducting a simulation experiment in the Netlogo

environment, the KNN algorithm was used. The results of the experiment show that the improved algorithm reduces the location error and has a higher accuracy of location determination. Practical significance. The expediency of applying the results obtained in the design of RVSN is substantiated.

Keywords: wireless networks, modeling, positioning, localization algorithms

References

1. Vinogradov G.P. Algoritmy upravleniya processami v reagiruyushchih sensornyh setyah dlya zashchity ob"ektov [Process control algorithms in responsive sensory networks in object protection problems]. Software & systems, 2022, no. 2, pp. 229-239.
2. Vinogradov G.P. Intellektual'nye informacionnye tekhnologii v soedineniyah vooruzhennyh sil [Intelligent information technologies in the armed forces units] / XX Russian conference on artificial intelligence (RCAI-2022) (Moscow, 21-23 December 2022). M. Publisher MPEI, 2022, pp. 110-121.
3. Rovňáková J., Kocur, D. TOA Estimation and data association for through-wall tracking of moving targets. J Wireless Com Network 2010, 420767 (2010), DOI:10.1155/2010/420767.
4. Li Cong, Weihua Zhuang. Hybrid TDOA/AOA Mobile user location for wideband CDMA cellular systems. IEEE Transactions on wireless communications, July 2002, v. 1, no. 3, pp. 439-447.
5. Torrieri D.J. Statistical theory of passive location systems. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 1984, vol. 20, no. 2, pp. 183-198,
6. Pierlot V., Droogenbroeck M. Van, Urbin-Choffray M. A new three-object triangulation algorithm based on the power center of three circles. Research and education in robotics (EUROBOT), 2011, vol. 161, pp. 248-262.
7. Djuric P. M. and Kay S. M. Parameter estimation of chirp signals. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990, vol. 38, no. 12, pp. 2118-2126,
8. Liu H., Darabi H., Banerjee P., Liu J. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews, 2007, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080.
9. Blumenthal J., Grossmann R., Golatowski F., Timmermann D. Weighted centroid localization in Zigbee-based sensor networks. In Intelligent Signal Processing, 2007 WISP 2007 IEEE International Symposium on, 2008, pp. 1-6.
10. Cheikhrouhou O., Bhatti G.M., Alroobaea R. A hybrid DV-hop algorithm using RSSI for localization in large-scale wireless sensor networks, Sensors, 2018, 18, 1469, DOI: 10.3390/s18051469.
11. Lin-zhe Zhao, Xian-bin Wen, Dan Li. Amorphous localization algorithm based on BP artificial neural network. International journal of distributed sensor networks, 2015, 657241, DOI:10.1155/2015/657241.
12. Li M., Jiang F. , Pei C. Improvement of triangle centroid localization algorithm based on PIT criterion (ITCL-PIT) for WSNs. J Wireless Com Network, 2022, 19 (2022), DOI:10.1186/s13638-022-02109-3.
13. Yu W., Li H. An improved DV-Hop localization method in wireless sensor networks. International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2012, pp. 199-202.
14. Chen H., Sezaki K., Deng P., Cheung H. An improved DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008, pp. 1557-1561.
15. Dalong Xue Research of localization algorithm for wireless sensor network based on DV-Hop. Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 218(2019), DOI:10.1186/s13638-019-1539-5.
16. Han G., Xu H., Duong T. Q., Jiang J., Hara T. Localization algorithms of wireless sensor networks: A survey. Telecommunication Systems, 2013, v. 52, no. 4, pp. 2419-2436.
17. Lei Shu, Chun Wu, Yan Zhang, Jiming Chen, Lei Wang, Manfred Hauswirth. NetTopo: Beyond Simulator and Visualizer for Wireless Sensor Networks, available at: https://www.researchgate.net/ publication/234777348_NetTopo_Beyond_Simulator_and_Visualizer_for_Wireless_Sensor_Networks.
18. Mantovani A., Pagiaro A. NetTopo. Available at: https://sites.google.com/site/leishuderi/nettopo.
19. Yinghui Meng, Yuewen Chen, Qiuwen Zhang, Weiwei Zhang MNCE: Multi-hop node localization algorithm for wireless sensor network based on error correction. Journal on wireless communications and networking, 2019, DOI:10.3390/info11050269.

Vinogradov Gennady Pavlovich. *Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Tver State Technical University, Head of the laboratory of the Research Institute of Centerprogram Systems, wgp272ng@mail.ru, member of the Russian Association of Artificial Intelligence, member of the Russian Association of Fuzzy Systems and Soft Computing. Main areas of scientific activity: artificial intelligence, decision-making, multi-agent systems. AutorhID:149735, SPIN: 7288-4042, ORCID 0000-0001-5757-2753, Scopus AutorID:23976986500.*

Sharonov Dmitry Aleksandrovich. *Head of the department of the Research Institute of Centerprogram Systems. Main areas of scientific activity: artificial intelligence, decision-making, multi-agent systems, SharonovDA@cps.tver.ru.*

Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 22.05.2023; принята к публикации 16.06.2023.

The article was submitted 04/13/2023; approved after reviewing 05/22/2023; accepted for publication 06/16/2023.

УДК 004.822
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.004

Построение цифрового профиля устройств Интернета вещей

Исаева Ольга Сергеевна

Институт вычислительного моделирования СО РАН,
Россия, Красноярск, *isaeva@icm.krasn.ru*

Аннотация. В работе выполнена формализация семантического представления обобщённого цифрового профиля IoT-устройств, содержащая знания об архитектурных решениях сети Интернета вещей, критерии анализа сетевой активности участников информационного обмена в схеме «Издатель-Брокер- Подписчик» и характеристики контролируемых физических явлений. Для выбора понятий, которые легли в основу формализации, рассмотрены актуальные исследования в направлениях кибербезопасности и анализа данных Интернета вещей. Сформирована онтология, содержащая концепты предметной области, отражающие понятия рассматриваемой технологии, их взаимосвязи и экземпляры концептов, описывающие реализацию сети Интернета вещей в Красноярском научном центре. Рассматриваемая сеть предназначена для мониторинга технологических помещений с телекоммуникационным оборудованием и включает измерительные устройства, телекоммуникационную среду, виртуальные и физические сервера и прикладные программные решения. Каждый из экземпляров объектов в онтологии имеет своё цифровое представление в базах данных, содержит результаты измерений, статистические и спектральные характеристики данных и предназначен для решения практических задач.

Ключевые слова: интернет вещей, профилирование устройств IoT, протокол обмена сообщениями, Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), онтология, частотный анализ

Цитирование: Исаева О.С. Построение цифрового профиля устройств Интернета вещей / О.С. Исаева // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 36-44. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.004

Введение. В современных направлениях развития информационного общества выделяется тенденция обеспечения передовых сервисов и услуг за счёт организации связи между физическими или виртуальными объектами на основе совместимых информационных и коммуникационных технологий. Концепцией, обеспечивающей такие решения, является технология Интернета вещей (Internet of Things – IoT), поддерживающая информационное взаимодействие распределённых устройств и приложений [1]. Широкая популярность Интернета вещей, мобильность строящихся инфраструктур наряду с неоднородностью сценариев их использования требуют создания специализированных подходов к обеспечению надёжности получения, хранения, обработки и анализа больших объёмов данных. В IoT-сетях используются облегчённые протоколы межсетевого взаимодействия, имеющие ограниченные возможности аутентификации и контроля безопасности, что является причиной развития сетевых атак, направленных на маршрутизацию между их функциональными уровнями. Исследования по обеспечению безопасности вычислительных ресурсов и данных, как правило, ограничиваются анализом сетевого трафика, генерируемого и собираемого устройствами. Ввиду динамичности источников атак и постоянно меняющихся характеристик аномального поведения устройств такого автоматического контроля оказывается недостаточно.

Целью данной работы является создание обобщённого цифрового профиля IoT-устройств, объединяющего как фактические характеристики устройств, сетевых протоколов, архитектурные особенности инфраструктур, так и фактографические данные, журналы сетевого трафика, аномалии контролируемых физических явлений. Новизна подхода заключается в том, что профили устройств, отражающие частоту, периодичность передачи данных, наблюдаемые задержки в сети, размеры пакетов, флаги качества обслуживания, показатели времени установки и удержания соединений и другие параметры, отвечающие за сетевую активность, расширены показателями, построенными в результате анализа и агрегирования собираемых

данных, частотными характеристиками протекающих событий, трендами и критическими значениями, ограничивающими измеряемые показатели.

Исследование проводится на базе сети Интернета вещей, выполняющей мониторинг технологических помещений с телекоммуникационным оборудованием [2] подразделения Красноярского научного центра СО РАН. Построенные цифровые профили позволят выявлять предпосылки аномального поведения элементов сети, выходы из строя или изменения режимов работы оборудования, и строить критерии превентивной защиты в зависимости от настроек политики безопасности серверов.

1. Обзор существующих подходов к исследованию IoT. Несмотря на то, что, по данным аналитических агентств, объем IoT уже оценивается диапазоном от 8 до 30 млрд устройств и прогнозируется их дальнейший существенный рост, универсального определения понятия Интернета вещей не существует [3]. Различаются архитектурные и технологические подходы к организации информационно-телекоммуникационной среды Интернета вещей. Проводимые исследования выполняются совместно специалистами различных областей и включают решения задач сетевого администрирования, кибербезопасности, искусственного интеллекта, анализа больших данных и пр. Для обеспечения семантической связности таких исследований требуется единая информационная платформа, формирующая унифицированный словарь концептов и их взаимосвязей на основе знаний предметной области, отражающий различные аспекты технологии Интернета вещей.

Для выявления понятий, которые бы легли в основу формализации, рассмотрены актуальные исследования в направлениях кибербезопасности и анализа данных Интернета вещей. В качестве основного определения Интернета вещей выбрано его представление как динамической глобальной сетевой инфраструктуры пространственно-распределённых узлов, оснащённых встроенными средствами для взаимодействия друг с другом или с внешней средой, способных измерять, понимать и изменять своё окружение [4]. Сетевая архитектура IoT включает функциональные уровни: сенсорный, транспортный, сервисный и прикладной [5]. В качестве протокола обмена данными в настоящем исследовании выбран Message Queue Telemetry Transport (MQTT) [6], поддерживающий взаимодействие логических сущностей со следующими ролями: Издатель (Publisher) – источник данных, устройство IoT, формирующее сообщение о состоянии наблюдаемых объектов; Брокер (Broker) – программное обеспечение, получающее и распределяющее сообщения (например, Mosquitto MQTT) и Подписчик (Subscriber) – приложение (или устройство), получающее данные по заданным тематическим подпискам [7]. Перечисленные роли распределяются по уровням архитектуры IoT следующим образом: на сенсорном уровне размещаются Издатели (датчики). Транспортный уровень содержит шлюзы и сети передачи данных, через которые от устройств IoT поступают данные. На сервисном уровне устанавливаются Брокеры, которые консолидируют данные, характеризующиеся большим объёмом, разнообразием и частотой генерации [8]. Прикладной уровень формируется Подписчиками – программным обеспечением, решающим задачи предметной области.

Исследование безопасности различных уровней сетевой архитектуры IoT предполагает построение профилей умных устройств. Профили устройств включают статистические характеристики сеансов связи, интенсивность и продолжительность передачи пакетов данных [9, 10]. Особенности протоколов для сети Интернета вещей и проблемы с ограничениями прав доступа к устройствам рассматриваются для информационной схемы «Издатель-Брокер-Подписчик» в [11]. Помимо структурированных данных сеансов связи выполняются исследования журналов обращений [12, 13]. Построены сценарии сетевого поведения при различных видах атак и предложено для обнаружения и смягчения последствий атак выполнять моделирование поведения законных клиентов IoT [14].

Выявление аномального трафика выполняется методами машинного обучения [15, 16], однако большие объёмы данных создают проблемы для их применения. В [17] представлен автоматизированный выбор признаков, необходимых и достаточных для обучения и настройки моделей. Рассмотрены публичные наборы данных для MQTT и показатели, которые они содержат для поиска аномалий методами искусственного интеллекта в контексте IoT [18]. Системы упреждающего поведения при эксплуатации промышленных устройств исследуют временные ряды данных мониторинга и выполняют в них поиск и диагностику аномалий [19, 20]. Такой подход интегрируется в систему безопасности совместно с другими методами анализа.

Из проведённого обзора выделены характеристики, описывающие схему и участников информационного взаимодействия, показатели сетевой активности, настройки политик безопасности, свойства процессов, контролируемых датчиками IoT и прецеденты аномального поведения.

2. Формализация профиля устройств IoT. Для формализации профиля устройств Интернета вещей и интеграции выделенных понятий, свойств и отношений построена онтология. В качестве программных инструментов выбран свободный открытый редактор онтологий и баз знаний Protégé, поддерживающий OWL формат и имеющий web-ресурс для совместной работы группы исследователей. Под онтологией в используемом редакторе понимается формальное явное описание понятий (классов), их свойств (функций и атрибутов), ограничений на свойства и экземпляров классов [21]. Инструмент поддерживает категорированную иерархическую структуру элементов, предоставляет методы контроля зависимостей, восстановления скрытых знаний и построения семантических запросов.

Построенная онтология отражает логические структуры цифрового профиля устройства IoT. На верхнем уровне иерархии выделены классы – участники информационного обмена. Графическое представление классов, показывающее основные характеристики и настройки, приведено на рисунках 1-3.

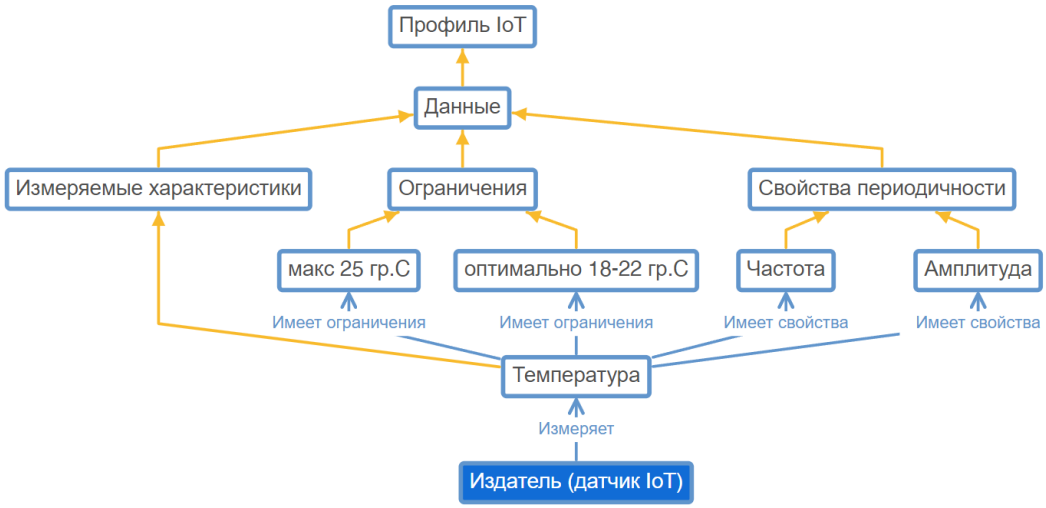


Рис. 1. Графическое представление класса «Издатель»

Онтология «Профиль IoT» содержит сущности и атрибуты, связанные с реализацией сети Интернета вещей в Красноярском научном центре. Издатели в текущей схеме представлены измерительными устройствами CL-210-E (производства ICP DAS), выполняющими мониторинг показателей температуры, влажности, точки росы и концентрации мелкодисперсной пыли (PM2.5). Они размещены в специализированных технологических помещениях с телекоммуникационным оборудованием. В онтологии описаны характеристики: размещение, точность измерения, периодичность передачи данных, даты ввода в эксплуатацию

и поверки (при необходимости), граничные условия на измеряемые параметры и частотные характеристики данных.

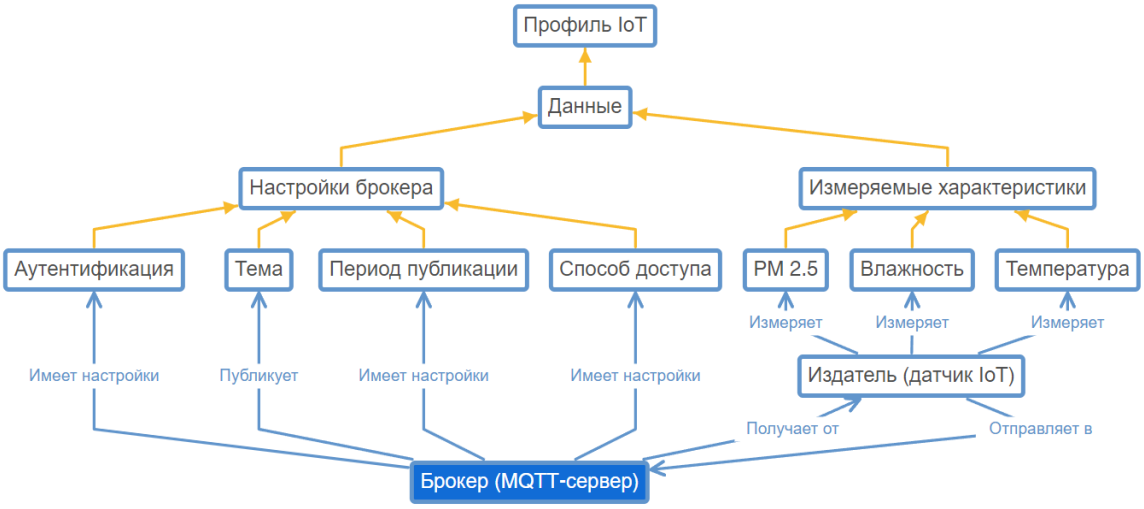


Рис. 2. Графическое представление класса «Брокер»

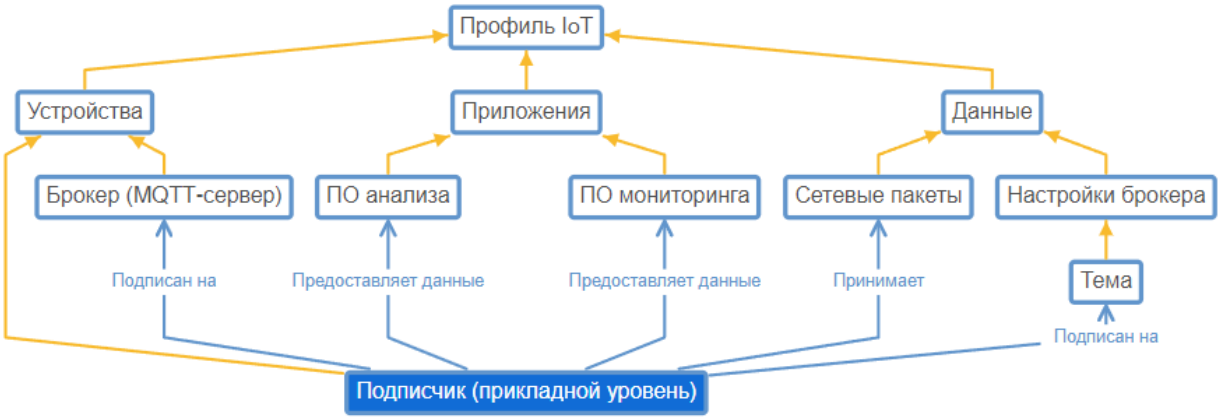


Рис. 3. Графическое представление класса «Подписчик»

Транспортный уровень сети IoT реализуется на основе существующей инфраструктуры корпоративной сети Красноярского научного центра. Для реализации функций брокеров данных развёрнут кластер Kubernetes (K8s) на 10 узлов, включающий несколько физических серверов и виртуальных машин с системой виртуализации Hyper-V. На всех узлах использована ОС Ubuntu Server 20.04. Централизованное управление жизненными циклами контейнеров выполняется на платформе оркестрации Rancher. Брокеры получают результаты измерений от источников данных, обрабатывают их и размещают в базах, а также ведут сетевые журналы, содержащие сведения об обращениях к данным. В настоящий момент происходит наполнение онтологии атрибутами, отражающими особенности сетевой активности, характеристики политик безопасности и данные журналов [22].

Построенная онтология консолидирует знания специалистов предметной области и позволяет решать практические задачи. Например, одной из задач, для которых предназначен профиль устройств IoT, является выбор настроек Брокера данных.

3. Выбор настроек брокера данных IoT. Изменение развёрнутой структуры сети IoT требует выбора настроек безопасности и параметров выдачи данных. Графическое представление классов, экземпляров и отношений, описывающее решение этой задачи, приведено на рисунке 4.

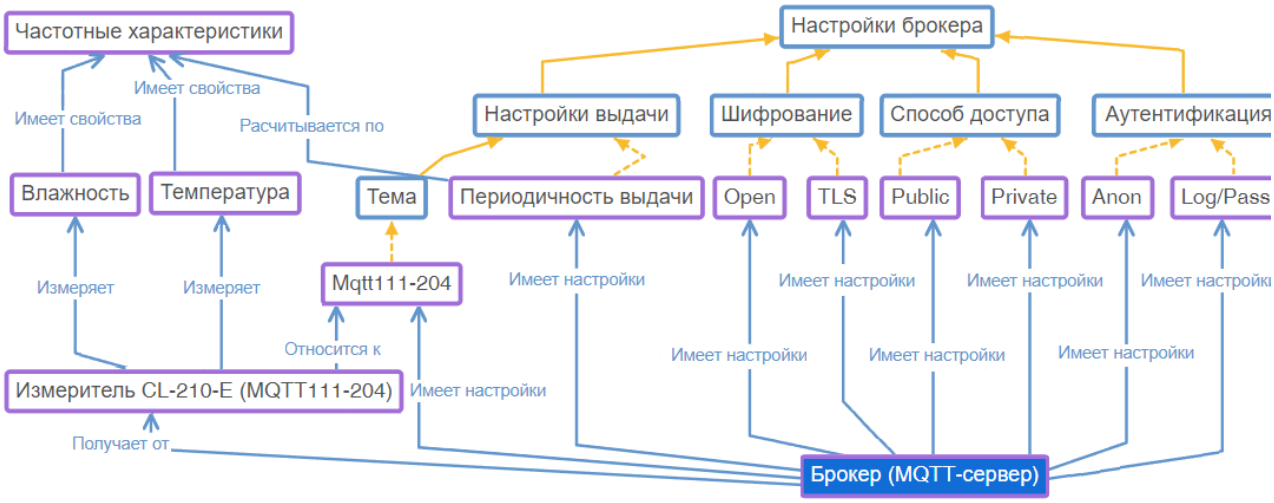


Рис. 4. Графическое представление класса «Настройки брокера»

Варианты настройки Брокеров включают способы доступа (видимость только из внутренней корпоративной сети – Private или из сети Internet – Public), аутентификации (с авторизацией – Log/Pass или без авторизации – Anon), шифрования (протокол Transport Layer Security – TLS или без шифрования – Open).

Кроме того, в онтологии описан способ выбора периодичности публикации Брокером данных, получаемых от издателей [23]. Издатели собирают данные в технологических помещениях со сложным коммуникационным и вычислительным оборудованием, обладающим повышенной теплоотдачей, снабжённых системами кондиционирования. Требуется обеспечить этими данными Подписчиков, в том числе и мобильных, имеющих ограниченные ресурсы на обработку и хранение информации. Для этого необходимо сократить объем рассылок и уменьшить загрузку каналов связи при сохранении адекватности представления протекающих процессов. Исследование показало, что процессы имеют периодический характер и для создания режима выдачи данных, при котором частота их обновления соответствует скорости протекания событий, предложено выполнять анализ частотных характеристик, собираемых Издателями данных.

Для пояснения подхода возьмём набор измерений температуры в N отсчётах (рисунок 5). Для определения частотных характеристик данных рассчитаем параметры гармонического ряда методом дискретного преобразования Фурье [24]. В общем случае свойство периодичности достигается путём повторения рассматриваемых данных с периодом NT, где $T = (t_{n+1} - t_n)$ – период дискретизации, $n = [0, N\text{-}1]$, N – количество отсчётов.

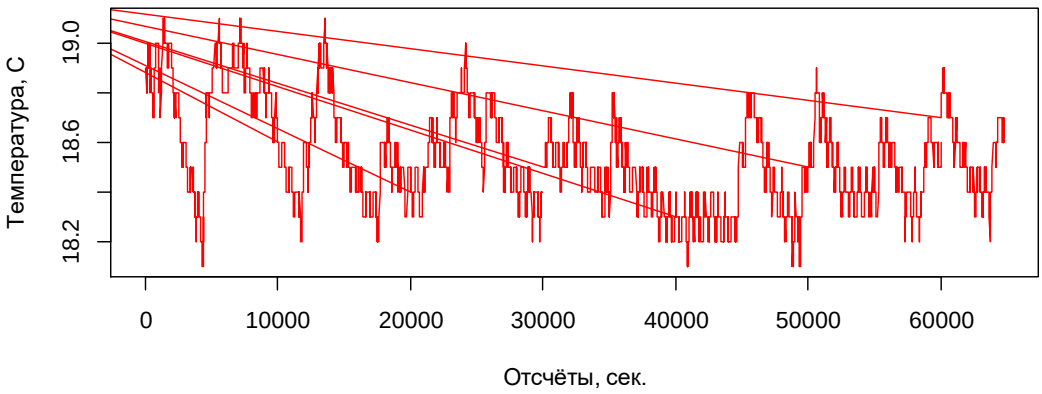


Рис. 5. График измерений температуры помещения в наблюдаемых отсчётах

Результат разложения приведён на рисунке 6, полученные весовые коэффициенты являются комплексным спектром периодического сигнала.

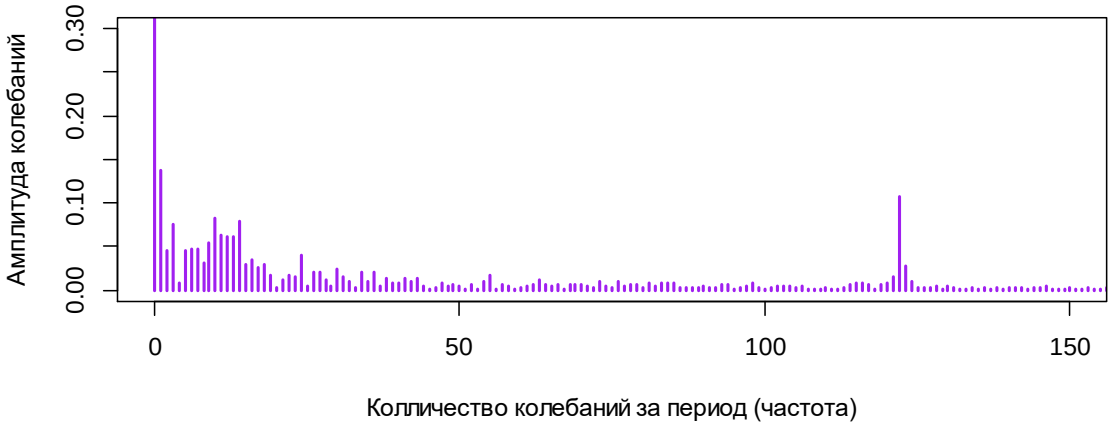


Рис. 6. Частотный спектр анализируемых данных

Если рассмотреть полученный частотный спектр, то его первая гармоника отражает постоянную составляющую данных, остальные характеризуют периодичность сигнала. Выберем максимальную амплитуду среди значений, превышающих порог точности измерений, рассчитаем соответствующую частоту колебаний. Воспользовавшись теоремой Котельникова [25], определим, при каких условиях сигнал может быть однозначно восстановлен по его дискретным отсчётам. На каждое колебание сигнала должно приходится как минимум 2 отсчёта. Затем рассчитаем период дискретизации. Выдача брокером данных должна происходить с полученным периодом.

Такая настройка выполняется по каждому Издателю для каждого Брокера и позволяет обеспечить Подписчиков результатами наблюдений за протекающими в технологических помещениях событиями в соответствии с динамикой изменения данных. Кроме того, изучение частотного спектра позволяет выявлять аномалии в наблюдаемых процессах.

Заключение. Проведённое исследование по формализации знаний и выделению значимых факторов, определяющих цифровые профили IoT-устройств, является основой для описания сети Интернета вещей, функционирующей в Красноярском научном центре. Структура цифрового профиля задана с помощью онтологии, которая содержит объекты, описывающие понятия предметной области, связи, экземпляры объектов, свойства данных, в том числе: диапазоны изменения и критические значения, ограничивающие атрибуты элементов онтологии, настройки архитектуры сети и устройств, выполняющих сбор, передачу данных, их хранение, обработку и пр.

Каждый из экземпляров объектов в онтологии имеет своё цифровое представление в базах данных, включая результаты измерений, статистические и спектральные характеристики данных. В обобщённый цифровой профиль входят дополнительные характеристики: площадь и объем помещений, настройки циклов работы систем кондиционирования, пиковые значения тепловыделения оборудования, факторы цикличности нагрузки (сезонность, время суток) и пр. Профиль наполняется расчётными показателями, отвечающими за сетевую активность элементов IoT в схеме «Издатель-Брокер-Подписчик» при различных настройках политик безопасности и флагах качества обслуживания, в том числе статистикой размеров пакетов, временем установки и удержания соединений и др.

Построенные цифровые профили позволят выявлять предпосылки аномального поведения элементов сети, выходы из строя или изменения режимов работы оборудования и строить критерии реагирования и превентивной защиты, что является одним из аспектов обеспечения надёжности инфраструктуры Интернета вещей.

Благодарности. Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2023-912).

Список источников

1. Дикий Д.И. Протокол передачи данных MQTT в модели удалённого управления правами доступа для сетей Интернета / Д.И. Дикий, В.Д. Артемьева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2019. – Т. 19(1). – С. 109-117.
2. Исаева О.С. Создание инструментов сбора данных для анализа аспектов безопасности Интернета вещей / О.С. Исаева, Н.В. Кулясов, С.В. Исаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2022. – № 3(27). – С. 113-125. – DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.011.
3. Alam T. A reliable communication framework and its use in Internet of Things (IoT). International journal of scientific research in computer science, engineering and information technology, 2018, no. 3(5), pp. 450-456.
4. Rozik A.S., Tolba A.S., El-Dosuky M.A. Design and implementation of the sense Egypt platform for real-time analysis of IoT Data Streams. Advances in Internet of Things, 2016, no. 6(4), pp. 66-91.
5. Javed A., Heljanko K., Buda A., Främling K. CEFIoT: A fault-tolerant IoT architecture for edge and cloud. IEEE World forum on Internet of things, 2018, pp. 813-818, DOI:10.1109/WF-IoT.2018.8355149.
6. Patel C., Doshi N. A Novel MQTT security framework in generic IoT model. Procedia Computer Science, 2020, no. 171, pp. 1399-1408, DOI:10.1016/j.procs.2020.04.150.
7. Dizdarević J., Carpio F., Jukan A., Masip-Bruin X. A Survey of communication protocols for Internet of Things and related challenges of fog and cloud computing integration. ACM Computing Surveys, 2019, no. 1(1).
8. Azad P., Navimipour N.J., Rahmani A.M. The role of structured and unstructured data managing mechanisms in the Internet of things. Cluster Computing, 2020, no. 23, pp. 1185-1198, DOI:10.1007/s10586-019-02986-2.
9. Татарникова Т.М. Обнаружение атак в сетях интернета вещей методами машинного обучения. / Т.М. Татарникова, П.Ю. Богданов // Информационно-управляющие системы, 2021. – № 6. – С. 42-52. – DOI:10.31799/1684-8853-2021-6-42-52.
10. Meidan Y., Bohadana M., Mathov Y., Mirsky Y., Breitenbacher D., Shabtai A., Elovici Y.N. BaIoT: Network-based detection of IoT botnet attacks using deep autoencoders. IEEE Pervasive Computing. Special Issue – Securing the IoT, 2018, no. 17(3), pp. 12-22.
11. Munshi A. Improved MQTT secure transmission flags in smart homes. Sensors, 2022, no. 22(6), p. 2-15.
12. Isaev S.V., Kononov D.D. Analysis of the dynamics of Internet threats for corporate network web services. CEUR Workshop Proceedings, 2021, no. 3047, pp. 71-78, DOI:10.47813/sibdata-2-2021-10.
13. Kononov D.D., Isaev S.V. Development of secure automated management systems based on web technologies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, no. 537(5), DOI: 10.1088/1757–899X/537/5/052024.
14. Haripriya A., Kulothungan K. Secure-MQTT: An efficient fuzzy logic-based approach to detect dos attack in MQTT protocol for Internet of Things. J. Wirel. Commun. Netw, 2019.
15. Bhattacharyya D.K., Kalita J.K. Network anomaly detection: A machine learning perspective. CRC Press, 2014.
16. Nassif A.B., Talib M.A., Nasir Q., Dakalbab F.M. Machine learning for anomaly detection: A systematic review. IEEE Access, 2021, no. 9, pp. 78658-78700.
17. Omar S., Ngadi A., Jebur H. Machine learning techniques for anomaly detection: an overview. International Journal of Computer Applications, 2013, no. 79(2), pp. 32-41.
18. Dissanayake M.B. Feature engineering for cyber-attack detection in Internet of Things. International Journal of wireless and microwave technologies, 2021, no 6, pp. 46-54.
19. Vaccari I., Chiola G., Aiello M., Mongelli M. MQTTset, a New dataset for machine learning techniques on MQTT. Sensors, 2020, no. 20, pp. 6578, DOI:10.3390/s20226578.
20. Cook A.A., Mısırlı G., Fan Z. Anomaly detection for IoT time-series data: a survey. IEEE Internet of Things Journal, 2020, no. 7(7). pp. 6481-6494.
21. Musen M.A. The Protégé project: A look back and a look forward. AI Matters. Association of Computing Machinery Specific Interest Group in Artificial Intelligence, 2015, no. 1(4), DOI: 10.1145/2557001.25757003.
22. Isaeva O.S., Kulyasov N.V., Isaev S.V. Creation of a simulation stand for studying of the internet of things' technologies. AIP Conference Proceedings, 2022, no. 2647, pp. 040030-1-040030-5, DOI:10.1063/5.0104342.
23. Исаева О.С. Формирование адаптивных рассылок брокера данных интернета вещей / О.С. Исаева, С.В. Исаев, Н.В. Кулясов // Информационно-управляющие системы, 2022. – № 5(120). – С. 23-31. – DOI:10.31799/1684-8853-2022-5-23-31.
24. Duhamel P., Vetterli M. Fast Fourier transforms: a tutorial review and a state of the art. Signal Processing, 1990, no. 19, pp. 259-299.
25. Зиатдинов С.И. Восстановление сигнала по его выборкам на основе теоремы отсчётов Котельникова / С.И. Зиатдинов // Известия вузов. Приборостроение, 2010. – №. 53(5). – С. 44-47.

Исаева Ольга Сергеевна. *Старший научный сотрудник отдела Красноярского математического центра Института вычислительного моделирования СО РАН, доктор технических наук. Область научных интересов:*

методы искусственного интеллекта, анализ данных, цифровые двойники. SPIN-код: 8412-5807, ORCID: 0000-0002-5061-6765, Researcher ID: A-8905-2018, isaeva@icm.krasn.ru, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 44, каб. 209.

UDC 004.822
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.004

Building a digital profile of IoT devices

Olga S. Isaeva
Institute of Computational Modeling of SB RAS, Russia, Krasnoyarsk, *isaeva@icm.krasn.ru*

Abstract. The paper formalizes the semantic representation of the common digital profile of IoT devices, containing knowledge about the architectural solutions of the Internet of Things, the criteria for analyzing the network activity of information exchange participants in the Publisher-Broker-Subscriber scheme and the characteristics of controlled physical processes. In order to select the concepts underlying the formalization, current research in the areas of cybersecurity and data analysis of the Internet of Things are considered. The author has formed an ontology containing the concepts of the subject area and their relationships, reflecting IoT-technology and instances of concepts that describe the implementation of the Internet of Things network in the Krasnoyarsk Scientific Center. The described network is used to monitor technological rooms with telecommunications equipment and includes measuring devices, telecommunications environment, virtual and physical servers, and application software. The instances of objects in the ontology have its own digital representation in databases, contains measurement results, statistical and spectral characteristics of data, and is used to solve practical problems.

Keywords: Internet of Things, IoT device profiling, Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), messaging protocol, ontology, frequency analysis

Acknowledgements: This work is supported by the Krasnoyarsk Mathematical Center and financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the establishment and development of regional Centers for Mathematics Research and Education (Agreement No. 075-02-2023-912).

References

1. Dikii D.I., Artemeva V.D. Protokol peredachi dannyh MQTT v modeli udalyonnogo upravleniya pravami dostupa dlya setej Interneta [MQTT data protocol in remote access control management model for Internet networks]. Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki [Scientific and technical journal of information technologies, Mechanics and Optics], 2019, no. 19(1), pp. 109-117, DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-109-117.
2. Isaeva O.S., Kulyasov N.V. Isaev S.V. Sozdanie instrumentov sbora dannyh dlya analiza aspektov bezopasnosti Interneta veshchej [Creating data collection tools to analyze security aspects Internet of Things]. Informacionnye i matematičeskie tehnologii v nauke i upravlenii [Informational and mathematical technologies in science and management], 2022, no. 3(27), pp. 113-125, DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.011.
3. Alam T. A reliable communication framework and its use in Internet of Things (IoT). International journal of scientific research in computer science, engineering and information technology, 2018, no. 3(5), pp. 450-456.
4. Rozik A.S., Tolba A.S., El-Dosuky M.A. Design and implementation of the sense Egypt platform for real-time analysis of IoT Data Streams. Advances in Internet of Things, 2016, no. 6(4), pp. 66-91.
5. Javed A., Heljanko K., Buda A., Främling K. CEFIoT: A fault-tolerant IoT architecture for edge and cloud. IEEE World forum on Internet of things, 2018, pp. 813-818, DOI:10.1109/WF-IoT.2018.8355149.
6. Patel C., Doshi N. A Novel MQTT security framework in generic IoT model. Procedia Computer Science, 2020, no. 171, pp. 1399-1408, DOI:10.1016/j.procs.2020.04.150.
7. Dizdarević J., Carpio F., Jukan A., Masip-Bruin X. A Survey of communication protocols for Internet of Things and related challenges of fog and cloud computing integration. ACM Computing Surveys, 2019, no. 1(1).
8. Azad P., Navimipour N.J., Rahmani A.M. The role of structured and unstructured data managing mechanisms in the Internet of things. Cluster Computing, 2020, no. 23, pp. 1185-1198, DOI:10.1007/s10586-019-02986-2.

9. Tatarnikova T.M., Bogdanov P.Yu. Obnaruzhenie atak v setyah interneta veshchej metodami mashinnogo obucheniya [Intrusion detection in internet of things networks based on machine learning methods]. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 42–52, DOI:10.31799/1684-8853-2021-6-42-52.
10. Meidan Y., Bohadana M., Mathov Y., Mirsky Y., Breitenbacher D., Shabtai A., Elovici Y.N. BaIoT: Network-based detection of IoT botnet attacks using deep autoencoders. IEEE Pervasive Computing. Special Issue – Securing the IoT, 2018, no. 17(3), pp. 12-22.
11. Munshi A. Improved MQTT secure transmission flags in smart homes. Sensors, 2022, no. 22(6), pp. 2-15.
12. Isaev S.V., Kononov D.D. Analysis of the dynamics of Internet threats for corporate network web services. CEUR Workshop Proceedings, 2021, no. 3047, pp. 71-78, DOI:10.47813/sibdata-2-2021-10.
13. Kononov D.D., Isaev S.V. Development of secure automated management systems based on web technologies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, no. 537(5), DOI: 10.1088/1757–899X/537/5/052024.
14. Haripriya A., Kulothungan K. Secure-MQTT: An efficient fuzzy logic-based approach to detect dos attack in MQTT protocol for Internet of Things. J. Wirel. Commun. Netw, 2019.
15. Bhattacharyya D.K., Kalita J.K. Network anomaly detection: A machine learning perspective. CRC Press, 2014.
16. Nassif A.B., Talib M.A., Nasir Q., Dakalbab F.M. Machine learning for anomaly detection: A systematic review. IEEE Access, 2021, no. 9, pp. 78658-78700.
17. Omar S., Ngadi A., Jebur H. Machine learning techniques for anomaly detection: an overview. International Journal of Computer Applications, 2013, no. 79(2), pp. 32-41.
18. Dissanayake M.B. Feature engineering for cyber-attack detection in Internet of Things. International Journal of wireless and microwave technologies, 2021, no 6, pp. 46-54.
19. Vaccari I., Chiola G., Aiello M., Mongelli M. MQTTset, a New dataset for machine learning techniques on MQTT. Sensors, 2020, no. 20, pp. 6578, DOI:10.3390/s20226578.
20. Cook A.A., Mısırlı G., Fan Z. Anomaly detection for IoT time-series data: a survey. IEEE Internet of Things Journal, 2020, no. 7(7), pp. 6481-6494.
21. Musen M.A. The Protégé project: A look back and a look forward. AI Matters. Association of Computing Machinery Specific Interest Group in Artificial Intelligence, 2015, no. 1(4), DOI: 10.1145/2557001.25757003.
22. Isaeva O.S., Kulyasov N.V., Isaev S.V. Creation of a simulation stand for studying of the internet of things' technologies. AIP Conference Proceedings, 2022, no. 2647, pp. 040030-1-040030-5, DOI:10.1063/5.0104342.
23. Isaeva O.S., Kulyasov N.V., Isaev S.V. Formirovanie adaptivnyh rassylok brokera dannyh interneta veshchej [Formation of adaptive publications from the Internet of things data broker]. Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy [Information and Control Systems], 2022, no. 5(120), pp. 23-31, DOI: 10.31799/1684-8853-2022-5-23-31.
24. Duhamel P., Vetterli M. Fast Fourier transforms: a tutorial review and a state of the art. Signal Processing, 1990, no. 19, pp. 259-299.
25. Ziatdinov S.I. Vosstanovlenie signala po ego vyborkam na osnove teoremy otschyotov Kotel'nikova [Reconstruction of signal by its samples on the base of Kotelnikov counts theorem]. Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye [Journal of Instrument Engineering], 2010, no. 53(5), pp. 44-47.

Isaeva Olga Sergeevna. *Senior researcher of the Department of the Krasnoyarsk Mathematical Center of the Institute of Computational Modeling SB RAS, doctor of technical sciences. Research interests: artificial intelligence, data analysis, digital twins. SPIN code: 8412-5807, ORCID: 0000-0002-5061-6765, Researcher ID: A-8905-2018, isaeva@icm.krasn.ru, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/44.*

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 08.06.2023; принята к публикации 16.06.2023.

The article was submitted 05/10/2023; approved after reviewing 06/08/2023; accepted for publication 06/16/2023.

Математическое моделирование

УДК 004.855.5
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.005

Оптимизационные модели подбора параметров технологических процессов на основе результатов машинного обучения

Чернавин Павел Федорович, Чернавин Николай Павлович, Чернавин Федор Павлович
Уральский федеральный университет, Россия, Екатеринбург, *p.f.chernavin@urfu.ru*

Аннотация. При решении практических задач достаточно часто возникает необходимость одновременного применения методов машинного обучения и методов исследования операций. Так как в основе многих методов решения задач в обеих областях может лежать кардинально отличающийся друг от друга математический инструментарий, то объединить их результаты в единый комплекс будет невозможно. В данной статье приведен взаимосвязанный комплекс моделей машинного обучения и исследования операций, предназначенный для подбора параметров технологических процессов. Все модели имеют общую математическую базу на основе задач математического программирования с частично-целочисленными переменными. Модели апробированы на реальной задаче подбора состава шихты и технологических параметров агломерационного производства и приведены в последовательности их возникновения в процессе решения задач, поставленных заказчиками исследования. На первом этапе на основе задач регрессии осуществляется отбор наиболее информативных входных признаков и степень их влияния на выходные признаки. Затем на основе задач классификации определяются рекомендуемые области управляемых входных признаков для получения высококачественной продукции. Данные области могут иметь достаточно сложную геометрическую конфигурацию в пространстве признаков. Далее в рамках задач исследования операций определяется эталонные состояния процесса, к которым необходимо стремиться. На заключительном этапе результаты всех предыдущих исследований объединяются в единую оптимизационную модель, которая может быть дополнена результатами исследований, полученных из других источников информации, если эти результаты можно представить как линейные ограничения. Предлагаемый подход к оптимизации параметров может быть использован в различных предметных областях.

Ключевые слова: математическое программирование, машинное обучение, исследование операций, регрессия, классификация, прочность агломерата

Цитирование: Чернавин П.Ф. Оптимизационные модели подбора параметров технологических процессов на основе результатов машинного обучения / П.Ф. Чернавин, Н.П. Чернавин, Ф.П. Чернавин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 45-56 – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.005.

Введение. Существуют различные направления математического моделирования. В данной статье нами рассмотрены только два из них: исследование операций (ИО) и машинное обучение (МО). На наш взгляд, в настоящий момент в математическом моделировании технологических процессов существует некоторый разрыв между использованием моделей машинного обучения (МО) и моделей исследования операций (ИО). С одной стороны, любая из этих моделей имеет собственную ценность, и они могут применяться в различного рода исследованиях независимо друг от друга. С другой стороны, например, уравнения регрессии предназначены для прогнозирования выходного признака некоторого процесса на основании входных признаков. Возникает простой вопрос: прогноз выходного признака нужен сам по себе или для того, чтобы понять, в какую сторону будет двигаться технологический процесс при изменении входных признаков. Аналогичная ситуация и с задачами классификации. Для простоты, пусть есть 2 класса: хорошее состояние процесса и неудовлетворительное. Конечно, важно уметь по входным признакам понимать состояние процесса, но, наверное, более важно понять, что надо делать, если процесс движется в неблагоприятную сторону. Как говорят философы: «Мало понять почему, главное, как изменить в лучшую сторону». Хотя и понять, почему, тоже непросто.

Ответ на вопрос: «Почему?», – могут дать хорошо интерпретируемые модели МО, на вопрос: «Как изменить что-то в лучшую сторону?», – модели ИО. Таким образом, ответ на оба вопроса в большинстве случаев можно получить, только объединив два этих подхода. К сожалению, многие модели МО (нейронные сети, градиентный бустинг, случайный лес и т.п) либо слабо интерпретируемые, либо не интерпретируемые вообще. Скажем больше, даже ряд хорошо интерпретируемых моделей (методы ближайших соседей, потенциальных функций, деревьев решений) практически невозможно совместить с моделями ИО.

На наш взгляд, одним из условий, необходимых для возможности совмещения моделей ИО и МО, является наличие общей математической базы и способов представления результатов решений, и сделать это можно на основе моделей математического программирования (МП). Действительно, многие методы МО, такие, как классическая линейная регрессия и ее различные модификации (лассо, гребневая, эластичная), линейное разделение множеств и ансамбли на базе линейных разделителей, метод опорных векторов, могут быть представлены, как задачи МП [1-10]. Причем решения, полученные на их основе, являются обычными линейными уравнениями и поэтому легко могут быть включены в различные модели ИО. Чтобы не быть голословными, поделимся нашим опытом интеграции моделей МО и ИО в единый комплекс при решении конкретной практической задачи управления технологическими параметрами для получения высококачественного агломерата. Данная задача решалась по заказу ПАО «Северсталь» на основе реальных данных агломерационного цеха №3.

1. Описание технологического процесса. Производство агломерата стоит в самом начале металлургического процесса. Поэтому от его технико-экономических показателей зависит эффективность всех последующих переделов. Агломерация – сложный, многомерный, растянутый во времени технологический процесс. На качественные характеристики агломерата влияет большое количество различных факторов: химико-минералогический и гранулометрический состав сырья, условия дозирования, увлажнения, смешивания и укладки шихты, режимы спекания и охлаждения агломерата, сбои оборудования и ошибки персонала.

Основной проблемой при производстве агломерата является выход мелкой фракции. Ее нельзя использовать в доменном производстве и поэтому ее приходится перерабатывать вновь. На основе количества мелкой фракции в агломерационном производстве рассчитывается показатель «холодная прочность» агломерата. На основе количества мелкой фракции, образующейся при транспортировке до доменного цеха, рассчитывается показатель «транспортная прочность» агломерата. Высококачественный агломерат должен одновременно соответствовать как минимум этим двум показателям. Для исследований нам был предоставлен набор из 3200 наблюдений. Каждое наблюдение содержало 321 входной признак. Далее опишем, в какой последовательности возникали взаимосвязанные по смыслу, но разные по методам решения задачи, и как они были решены.

2. Первоначальная постановка задачи. В начале исследований была поставлена задача – найти уравнения регрессии, прогнозирующие холодную и транспортную прочность при минимальном числе необходимых для этого признаков. Стандартными методами машинного обучения на основе программ из библиотеки Sklearn была сделана проверка на мультиколлинеарность и информативность признаков. В результате количество признаков было уменьшено до 240. После обсуждения с практическими специалистами информативности признаков были оставлены 78 признаков и именно на их основе строились модели регрессии.

Как уже отмечалось, агломерация относится к числу сложных и многомерных процессов, поэтому на входные и выходные признаки влияют множество факторов. По этой причине в исходных данных могут содержаться нетипичные наблюдения (выбросы), устранение которых простыми статистическими методами невозможно. Термин «выбросы» (outliers) является устоявшимся термином, поэтому далее по тексту мы будем его использовать. Изначальным

требованием к модели регрессии было автоматическое исключение выбросов в рамках самой модели. Для этих целей была использована следующая модель:

$$\min \sum_{j\epsilon J} z_j, \tag{1}$$

$$(1-d)*Y_j - L*z_j \le \sum_{i\in I} X_{ij}*a_i + \mathrm{b} \le (1+d)*Y_j + L*z_j, \qquad j \in J, \tag{2}$$

где $I -$ множество исходных входных признаков;

$J -$ множество наблюдений;

$X_{ij} -$ значения входных признаков;

Y_j $-$ значения выходного признака;

a_i – коэффициенты уравнения регрессии (искомые переменные);

b – свободный член уравнения регрессии для t-ого показателя (искомая переменная);

d – число ($0 < d < 1$);

z_j – булева переменная;

L – большая константа, значительно превышающая входные и выходные параметры.

Работа с моделью (1) – (2) осуществляется следующим образом. Задается величина d в рамках указанного диапазона. Булевы переменные предназначены для фиксации факта попадания или нет конкретного наблюдения в диапазон, задаваемый числом d. Наблюдения, у которых $z_j = 1$, расцениваются, как выбросы. Таким образом, модель (1) – (2) позволяет находить разумный компромисс между погрешностью прогноза выходных признаков и количеством наблюдений, исключенных из рассмотрения. Конечно, список исключенных из рассмотрения наблюдений анализировался отдельно на предмет обоснованности их исключения. В кодах пакета IBM ILOC CPLEX описание данной модели приведено на листинге 1:

Листинг 1. Модель регрессии с исключением выбросов в рамках заданного диапазона.

```
float d=...;//число, задающее диапазон погрешности прогноза (доля от
выходного признака)
int L=...;//большое число
int k=...;//число наблюдений
range j = 1..k;// индекс наблюдения
int n=...;//число входных признаков
range i = 1..n;// индекс признака
float X[j][i]=...; //множество значений входных признаков
float Y[j]=...; //множество значений выходного признака
/* искомые переменные */
dvar float a[i]; //коэффициенты уравнения регрессии
dvar float b;//свободный член уравнения регрессии
dvar boolean z[j];//признак попадания в диапазон
/*целевая функция*/
Minimize sum(j in j) z[j];
/*система ограничений*/
subject to {
forall( j in j)  sum(i in i) X[j][i]*a[i]+b <= (1+d)*Y[j]+L*z[j];
forall( j in j) sum(i in i) X[j][i]*a[i]+b >= (1-d)*Y[j]-L*z[j];
   };
```

На основе модели (1) – (2) были сформулированы уравнения регрессии для прогноза четырех выходных параметров. Задачи решались для каждого выходного параметра отдельно. Значение d задавалось в диапазоне от 0.05 до 0.15 с шагом 0.01. Требовалось найти разумный компромисс между отклонением прогнозируемых показателей от фактических и процентом исключенных из рассмотрения наблюдений. Результаты расчетов оценивались практическими специалистами по агломерационному производству. По их мнению, разумный компромисс достигается при d=0.1, при этом процент исключенных из рассмотрения наблюдений составил

от 5.47% до 11.04%. Отметим, что список исключенных наблюдений специалистами анализировался отдельно для выяснения причин отклонений. Более подробно описание расчетов приведено в [11]. Там же приведено сравнение качественных характеристик предлагаемого подхода с другими моделями регрессии. Расчеты проводились на компьютерах с частотой процессора 4.00 GHz и объемом оперативной памяти 32.0 ГБ. Время счета отдельной задачи составляло 1.5-3.5 часа и зависело от выходного параметра и величины d.

В рамках модели (1)-(2) мы нашли устраивающие нас значения d и $\sum_{j\epsilon J} z_j$. Обозначим их как d^* и G. Тогда, чтобы избавиться от неинформативных признаков, нам надо решить следующую задачу:

$$\min \sum_{i\epsilon I} w_i, \tag{3}$$

$$(1-d^*)*Y_j - L*z_j \le \sum_{i\in I} X_{ij}*a_i + \mathrm{b} \le (1+d^*)*Y_j + L*z_j, \qquad j\in J, \tag{4}$$

$$\sum_{j\epsilon J} z_j \le G, \tag{5}$$

$$-L*w_i \le a_i \le L*w_i, \qquad i\in I. \tag{6}$$

где w_i - булева переменная (1 – признак информативен, 0 – неинформативен).

Естественно, что программу в кодах CPLEX необходимо дополнить соответствующими условиями и изменить целевую функцию. Если расчеты по моделям (1) – (2) и (3) – (6) делать отдельно для каждого выходного признака (в нашем случае их было два), то может возникнуть ситуация, когда наборы информативных признаков для различных выходных признаков не будут совпадать. Если требуется подобрать минимальный набор информативных входных признаков, который подходит для прогнозирования нескольких выходных признаков, то условия (4) и (6) следует заменить на следующие:

$$(1-d^t)*Y_j^t - L*z_j \le \sum_{i\in I} X_{ij}*a_i^t + b^t \le (1+d^t)*Y_j^t + L*z_j,\ t\in T,\ j\in J, \tag{4.1}$$

$$-L*w_i \le a_i^t \le L*w_i, \qquad i\in I, t\in T. \tag{6.1}$$

где T – множество выходных показателей (холодная и транспортная прочности);
Y_j^t – t-ый выходной признак j-го наблюдения (числа);
a_i^t – коэффициенты уравнения регрессии для t-ого показателя (искомые переменные);
b^t – свободный член уравнения регрессии для t-ого показателя (искомая переменная);
d^t – числа ($0 < d^t < 1$).

Результаты расчетов по модели (3), (4.1), (5), (6.1) и таблица сравнения их качества с другими моделями регрессии приведены в [11]. Там же приведен список наиболее информативных параметров и степень их влияния на различные показатели качества агломерата. Из 78 исходных признаков на основе моделей (3) – (6) в качестве информативных были выбраны 43 признака. Причем практическим специалистам агломерационного цеха представлялись наборы признаков одинаковые по их числу, но отличающиеся по составу. Делалось это с целью отобрать наиболее интерпретируемые и управляемые, чтобы в дальнейшем можно было влиять на процесс агломерации и понимать к чему должно привести изменение тех или иных параметров. В данной статье подробно не рассматривается вопрос интерпретируемости признаков, но хотелось бы отметить, что интерпретируемость решений стала настолько важной, что в исследованиях по искусственному интеллекту (ИИ) уже формируется новое направление: интерпретируемый ИИ.

3. Определение областей управляемых параметров для получения высококачественного агломерата. Практическим специалистам модели регрессии были необходимы для

оценки влияния входных параметров на величину выходных, но на основе уравнений регрессии достаточно сложно определить допустимые области входных параметров, нахождение в которых обеспечивает получение высококачественного агломерата. Причем допустимые области могут иметь достаточно сложную конфигурацию, которую невозможно описать только через нижние и верхние границы по каждому параметру в отдельности.

Для начала требовалось определиться, что будем понимать под высококачественным агломератом и агломератом удовлетворительного качества. Практическими специалистами были определены верхние границы по выходу мелочи в агломерационном цехе и при транспортировке агломерата в доменный цех. Если агломерат одновременно удовлетворял двум этим показателям, то он считался высококачественным, по этому принципу наблюдения были разбиты на 2 класса. Высококачественный класс составил 535 наблюдений, удовлетворительный – 2680 наблюдений. Отметим, что заказчиков исследования интересовало не просто решающее правило (РП), которое давало бы ответы «да», «нет», а именно области в пространстве признаков, соответствующие этим классам. Кроме того, при выборе метода поиска РП следовало учесть, что классы сильно не сбалансированы. Для решения поставленной задачи была использована авторская математическая модель комитетных конструкций в наиболее общем виде. Комитетный подход для решения задач классификации наиболее активно развивался в Уральской школе распознавания образов под руководством Мазурова В. Д. [9, 10]. Важнейшим качеством метода комитетов является то обстоятельство, что полученные результаты имеют геометрическую интерпретацию, а РП может быть представлено в виде системы линейных ограничений, в которую в дальнейшем можно включать дополнительные условия. Комитетный подход к решению задач классификации на основе моделей линейного программирования с частично целочисленными переменными достаточно подробно описан авторами статьи в монографии [12]. В данной статье приводится модель, где условия разграничения множеств гиперплоскостями были записаны следующим образом:

$$\sum_{i \in I} X_{ij} * a_i^h + b^h + L * z_j^h \geq E, \quad j \in J_1, \qquad h \in H, \tag{7}$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} * a_i^h + b^h - L * z_j^h \leq 0, \quad j \in J_2, \qquad h \in H, \tag{8}$$

где J_1 и J_2 – множества, которые необходимо разделить;

$J = J_1 \cup J_2$ – множество наблюдений;

H – множество членов комитета (гиперплоскостей, линейных нейронов);

h – индекс гиперплоскости;

$a_i^h x_i^t$ – коэффициент гиперплоскости h для i-го параметра (переменная);

b^t – свободные члены гиперплоскостей (переменная);

$z_j^h z_j^t$ – булевы переменные для фиксации нарушений условий разделения множеств;

E – малое число (используем для строгости ограничений).

В контексте данной статьи термины «разделяющая гиперплоскость», «член комитета» и «линейный нейрон» используются как синонимы. В модели (7), (8) одновременно присутствует L – большое число и E – малое число. В ряде программ для решения задач МП, которые использовались в прошлом веке, это могло порождать проблему потери точности счета. В современных пакетах программ такая проблема практически отсутствует.

В практических задачах обычно не требуется построение комитета со 100 % разделяющей способностью. Более того, излишне высокая точность решающего правила (РП) может свидетельствовать о переобученности РП. Поэтому условия комитета сразу записываем с возможностью их корректировки:

$$\sum_{h\in H} V^h * z_j^h \le m + (\sum_{h\epsilon H} V^h) * \Delta_j, \qquad j \in J_1, \tag{9}$$

$$\sum_{h\in H} V^h * z_j^h \le \sum_{h\epsilon H} V^h - m - 1 + (\sum_{h\in H} V^h) * \Delta_j, \quad j \in J_2, \tag{10}$$

$$\text{Целевая функция: } min \sum_{j\epsilon J} \Delta_j, \tag{11}$$

где V^h – веса членов комитета (константы);

m – квалифицированное меньшинство (переменная $0 \le m \le \sum_{h\epsilon H} V^h - 1$);

$\Delta_j -$ булевы переменные для фиксации нарушений условий комитета.

В качестве весов удобно использовать степени числа 2, то есть ($V^h = 2^{h-1}$; $h = 1,2, \dots H^*$, где H^* – задаваемое число гиперплоскостей). Модель (7) – (11) является универсальной и на ее основе могут быть построены комитеты единогласия, большинства и старшинства. Подробное описание каждого из этих комитетов с графическими иллюстрациями приведено в [12]. В кодах CPLEX описание данной модели приведено на листинге 2:

Листинг 2. Универсальная модель комитетов.

```
/*описание данных*/
int H=...;//число гиперплоскостей (линейных нейронов,членов комитета)
range h = 1..H; //индекс члена комитета
int V[h]=...;// веса членов комитета
int SV=...;//сумма весов (гиперплоскостей, членов комитета)
int N=...;//число входных признаков
range i = 1..N;   // индекс входного признака
int K1=...;//число наблюдений в множестве 1
int K2=...;//число наблюдений в множестве 2
range j1 = 1..K1;// индекс наблюдения 1-го множества
range j2 = 1..K2;// индекс наблюдения 2-го множества
int L=...;//большое число для коррекции условий разделения множеств
         // в случае невозможности выполнения этих условий
float E=...;//малое число для выполнения строгости ограничений
float X1[j1][i]=...; //значение признаков наблюдений множества 1
float X2[j2][i]=...; //значение признаков наблюдений множества 2
/*искомые переменные*/
dvar float a[i][h] ; //коэффициенты гиперплоскостей
dvar float b[h];//свободные члены гиперплоскостей
dvar boolean z1[j1][h];// индикатор нарушения условия отнесения к множеству1
dvar boolean z2[j2][h];// индикатор нарушения условия отнесения к множеству2
dvar boolean d1[j1];//индикатор нарушения условий комитета для наблюдений множе-
ства1
dvar boolean d2[j2];//индикатор нарушения условий комитета для наблюдений множе-
ства2
dvar int+ m;//меньшинство с учетом весов
/*технические переменные для нормировки коэффициентов гиперплоскостей*/
dvar boolean g[h];
dvar boolean q[h];
/*условия модели*/
minimize sum( j1 in j1)d1[j1]+sum( j2 in j2)d2[j2];
subject to {
forall (h in h)forall(j1 in j1) sum(i in i)X1[j1][i]*a[i][h]+b[h]+L*z1[j1][h] >= E;
forall(h in h)forall(j2 in j2)  sum(i in i)X2[j2][i]*a[i][h]+b[h]-L*z2[j2][h]<=0;
forall(j1 in j1)sum(h in h) V[h]*z1[j1][h]<=m + L*d1[j1]; // условия комитета
forall(j2 in j2)sum(h in h)V[h]*z2[j2][h]<=SV-m-1+L*d2[j2];// условия комитета
/*Условия для нормировки коэффициентов гиперплоскостей относительно коэффициента
при одном из признаков. Данная часть программы не является обязательной и может
быть исключена, но она очень удобна при решении практических задач*/
/*По умолчанию коэффициент при первом признаке будет = 1 или -1*/
/* Для изменения нормировки можно изменить число в [], например указать a[2] [h]*/
forall(h in h) a[1] [h]==g[h]-q[h];
forall(h in h) g[h]+q[h]==1;
};
```

Хорошие результаты показал комитет старшинства из 5 членов. На его основе были выделены 2 выпуклых множества в пространстве признаков, соответствующие высококачественному агломерату. В одном из них было сконцентрировано 338 наблюдений, в другом 35, остальные 162 наблюдения распределились случайным образом в пространстве признаков. Для конкретных рекомендаций было выбрано множество с наибольшим числом наблюдений. На его основе специалистами по агломерационному производству были разработаны конкретные рекомендации, которые приведены в [13].

4. Поиск эталонных точек. Выпуклые области, полученные в результате расчетов по модели (7) – (11), могут иметь достаточно сложную форму. Для лучшего восприятия результатов решения внутри этих областей могут выделяться геометрически правильные фигуры. Например, Ащепков Л.Т. в заданной области выделяет максимальный куб [14].

Так как внутри рекомендуемой выпуклой области находятся наблюдения, соответствующие высококачественному агломерату, а за ее пределами, в основном, – удовлетворительному, любой практик прекрасно понимает, что чем ближе к границам области, тем выше вероятность получить не высококачественный агломерат, а только удовлетворительного качества. Поэтому в нашем случае после того, как выпуклая область для рекомендаций была сформулирована в виде системы неравенств, у заказчиков исследования сразу возникло желание найти центр этой области. Таким центром является некоторая эталонная точка, минимальное расстояние от которой до границ области максимально. Такую точку можно найти на основе следующей модели:

$$\sum_{i\in I} a_i^h * p_i + b^h = \sqrt[2]{\sum_{i\in I} (a_i^h)\text{^}2 * r^h}, \qquad h \in H. \tag{12}$$

$$r^h \geq \varphi, \qquad h \in H. \tag{13}$$

$$\max \varphi, \tag{14}$$

где a_i^h, b^h– константы, найденные на основе модели (7) – (11);

p_i – искомые координаты (технологические параметры) точки эталона;

r^h– длина перпендикуляра от эталонной точки до h-ой гиперплоскости;

φ – минимальная длина перпендикуляра до гиперплоскостей.

С геометрической точки зрения φ можно интерпретировать как радиус гипершара, вписанного в заданную выпуклую область, а координаты p_i – как координаты его центра.

В кодах CPLEX описание данной модели приведено на листинге 3:

Листинг 3. Поиск центра системы неравенств (эталонной точки).

```
int N=...; //размерность пространства (число параметров наблюдений)
range i = 1..N;   // индекс параметра
int H=...; //число гиперплоскостей
range h = 1..H;// индекс гиперплоскости
float A[h][i]=...; //матрица коэффициентов гиперплоскостей
float b[h]=...;//свободные члены гиперплоскостей
float Sqrt[h]=...;//корень из суммы квадратов коэф. гиперплоскости
/* искомые переменные*/
dvar float p[i] ; //координаты центра системы (эталон)
dvar float+ r[h] ; //перпендикуляр от центра до гиперплоскости
dvar float+ minr ;//минимальное расстояние от центра до гиперплоскостей

maximize minr;
subject to {
forall(h in h) sum(i in i) A[h][i]*p[i]+b[h]==Sqrt[h]*r[h];
forall(h in h) r[h]>=minr;
};
```

Обозначим параметры эталонного состояния как $p_i^* \forall\, i \in I$. Точка с координатами $p_i^* \forall\, i \in I$ может быть рекомендована как некоторый набор параметров, к которому надо стремиться для того, чтобы устойчиво иметь хорошие качественные показатели агломерата.

Есть другой способ поиска эталонной точки. Для каждой точки, находящейся внутри рекомендуемой области, рассчитать расстояние (длина перпендикуляра) до каждой гиперплоскости и выбрать реальное наблюдение, соответствующее минимаксу расстояния. Теоретикам больше нравится первый способ, практикам – второй. Естественно, что вряд ли существует некоторая универсальная точка на все случаи жизни. Правильным будет подход, когда выделяются некоторые периоды, близкие по составу шихты, сезонным и погодным условиям. Для каждого такого периода ищется эталонная точка.

5. Построение оптимизационных моделей. Современная конкурентная среда на рынке металлов постоянно побуждает к экспериментам как с составом шихты, так и с технологическими параметрами. Поэтому, после построения имитационной модели возникло желание не только автоматизировать подбор состава шихты и технологических параметров, но и расширить число учитываемых ограничений. На наш взгляд, для этих целей наилучшим образом подходят модели на основе задач МП.

Рассмотрим, какие блоки ограничений возможны для построения оптимизационной модели. В результате расчетов по модели (1) – (6) имеются коэффициенты уравнений регрессии a_i^t для каждого качественного показателя. В результате расчетов по модели (7) – (11) получена система ограничений, которая высекает допустимую выпуклую область в пространстве признаков. В результате решения задачи (12) – (14) у нас есть точка эталонного состояния.

Конечно, эталонное состояние надо знать и к нему надо стремиться, но может оказаться, что в конкретный момент времени выполнить все условия эталонного состояния невозможно. Например, в конкретный момент нет в наличии необходимого количества одного из железорудных концентратов, но есть другие, поэтому его содержание в шихте может быть в рекомендуемых границах, но меньше эталонного. По этим причинам из практических соображений следует задать границы возможного отклонения от эталонного состояния. Естественно, что эталонная точка должна находиться внутри этих границ. Тогда базовая оптимизационная модель может быть записана следующим образом:

$$\min \textstyle\sum_{i\in I}(p_i^* - p_i)\text{^}2, \tag{15}$$

$$\sum_{i\epsilon I} a_i^h * p_i + b^h \ \geq 0, h \in H, \tag{16}$$

$$\alpha^t \ \leq \sum_{i\epsilon I} a_i^t * p_i \ \leq \ \beta^t, \quad t \in T, \tag{17}$$

$$\alpha_i \ \leq \ p_i \ \leq \ \beta_i, \quad i \in I, \tag{18}$$

где α^t, β^t – желаемые границы качественных показателей;

α_i, β_i – уточненные границы технологических параметров

В результате решения задачи (15) – (18) можно определить состав шихты и набор технологических параметров, соответствующих системе ограничений (16) – (18) при минимальном эвклидовом расстоянии от эталонного состояния. На наш взгляд, на основе приведенных предыдущих программ в кодах CPLEX читатели смогут самостоятельно запрограммировать модель (15) – (18). Задачи квадратичного программирования пакетом IBM ILOC CPLEX решаются быстро и качественно.

Модель (15) – (18) может дополняться дополнительными ограничениями при условии, что система ограничений в целом остается выпуклым множеством. Конечно, наращивание системы ограничений в какой-то момент может привести к ее противоречивости и отсутствию

допустимого решения. В этом случае модель надо будет видоизменить и использовать последовательную оптимизацию.

Особо хотелось бы отметить, что приведенные в данной статье модели только на первый взгляд могут показаться сложными. Специалисты с инженерным образованием достаточно быстро осваивают этот инструментарий и начинают его воспринимать, как некоторый метаязык для формулировки своих пожеланий, причем специальных знаний из области математического программирования не требуется. Эффективные алгоритмы решения таких задач создавались лучшими математиками мира, начиная с тридцатых годов прошлого столетия. В настоящий момент эти алгоритмы оформлены в виде различных программных комплексов [15], которые позволяют решать задачи большой размерности за приемлемое время. Эти программные комплексы имеют дружественный интерфейс, освоить который гораздо проще, чем языки программирования высокого уровня. Для освоения формы записи требуются только логика и знание простых приемов математической записи линейных ограничений.

Приведенный в данной статье комплекс моделей был успешно использован для подбора технологических параметров в агломерационном цехе №3 ПАО «Северсталь» [11, 13]. Отметим также, что приведенные нами модели можно использовать не только для подбора параметров технологических процессов. Модели (1) – (2), (1) – (6) с различными целевыми функциями использовались для прогнозирования оборотов торгового эквайринга и пассивов физических лиц для 89 региональных филиалов крупного банка [16]. Модель (5) – (9) успешно используется нами в задачах медицинской диагностики [17], прогнозировании волатильности валютных курсов и показателей фондовых рынков [18]. Таким образом, приведенные в данной статье модели следует воспринимать как некоторый конструктор, на основе которого можно создать модель для решения задачи из конкретной предметной области.

Заключение. Предлагаемый нами подход обладает следующими достоинствами:
1) позволяет достигать качественных характеристик РП, сформулированных заказчиком, если это возможно, и предлагает оптимальную коррекцию пожеланий в противном случае;
2) позволяет минимизировать число признаков, необходимых для выполнения первого пункта;
3) позволяет давать геометрическую интерпретацию найденных решений, на основе которой практические специалисты могут переходить к содержательной интерпретации.

Математические модели достаточно простые, хорошо воспринимаются практическими специалистами, не требуют знания методов МП и навыков программирования на языках высокого уровня. Результаты моделей машинного обучения на базе математического программирования легко в дальнейшем использовать в моделях исследования операций.

Предлагаемый подход можно использовать в различных предметных областях.

Список источников

1. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным / В.Н. Вапник. – М.: Наука, 1979. – 447 с.
2. Bradley P., Fayyad U., Mangasarian O. Mathematical programming for data mining formulation and challenges. Journal on Computing, vol. 11, 1999, pp. 217-238.
3. Bennett K., Demiriz A., Taylor J. Linear programming boosting via column generation. Proceedings of Seventeenth Conference on Machine Learning, 2000, pp. 65-72.
4. Воронцов К.В. Лекции по методам оценивания и выбора моделей. – URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/2/2d/Voron-Ml-Modeling.pdf (дата обращения: 01.12.2022)
5. Wang B.Q., Chukova S., Lai C.D. On the relationship between regression analysis and mathematical programming. Journal of applied mathematics and decision sciences, vol. 8(2), 2004, pp. 131-140.
6. Yang L., Liu S., Tsoka S., Papageorgiou L.G. A regression tree approach using mathematical programming. Expert Systems with Applications, vol. 78, 2017, pp. 347-357.

7. Базилевский М.П. Сведение задачи отбора информативных регрессоров при оценивании линейной регрессионной модели по методу наименьших квадратов к задаче частично-булевого линейного программирования / М.П. Базилевский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, Воронеж, 2018. – Т. 6. – № 1 (20). – С. 108-117.
8. Горелик В.А. Решение задачи линейной регрессии с использованием методов матричной коррекции в метрике l_1 / В.А. Горелик, О.С. Трембачева // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2016. – Т. 56. – № 2. – С. 202-207.
9. Мазуров В.Д. Комитеты системы линейных неравенств / В.Д. Мазуров, М.Ю. Хачай // Автоматика и телемеханика, 2004. – № 2. – С. 43-54.
10. Мазуров В.Д. Экзистенциальные вопросы комитетных конструкций / В.Д. Мазуров // Часть II. Вестник Южно-Уральского государственного университета, 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 114-120.
11. Чернавин П.Ф. Анализ и прогнозирование выхода годного и прочности агломерата на основе моделей математического программирования / П.Ф. Чернавин, А.В. Малыгин, Т.В. Деткова [и др.] // Черные Металлы, 2021. – № 12. – С. 20-24.
12. Чернавин П.Ф. Машинное обучение на основе задач математического программирования / П.Ф. Чернавин, Д.Н. Гайнанов, В.Н. Панкращенко [и др.] – М.: Наука, 2021. – 128 с.
13. Чернавин П.Ф. Имитационная модель подбора технологических параметров для получения агломерата с высокими потребительскими свойствами на основе метода комитетов / П.Ф. Чернавин, А.Ф. Малыгин, Т.В. Деткова [и др.] // Черные металлы, 2022. – № 3. – С. 10-14.
14. Ащепков Л.Т. О построении максимального куба, вписанного в заданную область. / Л.Т. Ащепков // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1980. – Т. 20. – № 2. – С. 510-513.
15. Meindl B., Templ M. Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems. Institut f. Statistik u. Wahrscheinlichkeitstheorie, Austria, 2012, available at: https://www.researchgate.net/publication/265117825_Analysis_of_commercial_and_free_and_open_source_solvers_for_linear_optimization_problems (accessed: 12/01/2022)
16. Чернавин П.Ф. Сведение задач регрессии к задачам линейного целочисленного программирования. Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем / П.Ф. Чернавин, Ф.П. Чернавин, Н.П. Чернавин // Сборник научных трудов XIV Всероссийской с международным участием школы-симпозиума АМУР-2020, Симферополь, 2020. – С. 383-386
17. Тюлькова Т.Е. Практическое применение различных методов машинного обучения на примере активности туберкулезного процесса у лиц с минимальными туберкулезными изменениями, выявленными на рентгенограмме органов грудной клетки. / Т.Е. Тюлькова, П.Ф. Чернавин, Н.П. Чернавин [и др.] // Клинический вестник им. А.И. Бурназяна, 2022. – № 2. – С. 64-73.
18. Чернавин Н.П. Прогнозирование волатильности курса валют методом комитетов. / Н.П. Чернавин // Вестник Челябинского государственного университета, 2019. – № 11(43). – С. 82-94.

Чернавин Павел Федорович. *к.э.н., доцент кафедры Аналитика больших данных и методы видеоанализа, Уральский федеральный университет. Научные интересы: построение математических моделей с использованием методов исследования операций и машинного обучения. AuthorID: 117430, SPIN:6370-8103, ORCID: 0000-0003-3214-3906, chernavin.p.f@gmail.com, 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира д. 19.*

Чернавин Николай Павлович. *ассистент кафедры Аналитика больших данных и методы видеоанализа, Уральский федеральный университет, AuthorID : 971565, SPIN:5722-9436, ORCID: 0000-0003-3214-3906, ch_k@mail.ru, 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира д. 19.*

Чернавин Федор Павлович. *к.э.н., доцент кафедры Моделирование управляемых систем, Уральский федеральный университет, AuthorID: 971595, SPIN: 9237-5190, ORCID: 0000-0003-3214-3906, chernavin_fedor@mail.ru, 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира д. 19.*

UDC: 004.855.5
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.005

Optimization models for selecting parameters of technological processes based on the machine learning results

Pavel F. Chernavin, Nikolai P. Chernavin, Fedor P. Chernavin
Ural Federal University, Russia, Yekaterinburg, *p.f.chernavin@urfu.ru*

Abstract. When solving practical problems, quite often there is a need for the simultaneous application of machine learning and operations research methods. Since many methods for solving problems in both areas can be based on fundamentally different mathematical tools, it will be impossible to combine their results into a single model. This article presents an interconnected set of machine learning and operations research models designed to select the parameters of the technological processes. All models have a common mathematical formulation based on the mathematical programming problems with the partial-integer variables. The models have been tested on a real problem of selecting the composition of the charge and technological parameters of sinter production. It is presented in the sequence of their occurrence in the process of solving the problems set by the customers of the research. The first stage is based on solution of the regression problems with a selection of the most informative features and the degree of their influence on the output features is carried out. Then, based on the classification problems, the recommended areas of controlled input features are determined to obtain the high-quality products. These areas can have a rather complex geometric configuration in a feature space. Further, within the framework of the operations research problems, the reference states of a process are determined, to which it is necessary to strive. At the final stage, the results of all previous studies are combined into a single optimization model, which can be supplemented with the results of the researches obtained from other sources of information, if these results can be represented as the linear constraints. The proposed approach to the parameter optimization can be used in the various subject areas.

Keywords: mathematical programming, machine learning, operations research, regression, classification, strength of sinter

References

1. Vapnik V. N. Vosstanovlenie zavisimostej po empiricheskim dannym [Recovery of dependences on empirical data]. Moscow, Nauka, 1979, 447 p.
2. Bradley P., Fayyad U., Mangasarian O. Mathematical programming for data mining formulation and challenges. Journal on Computing, v. 11, 1999, pp. 217-238.
3. Bennett K., Demiriz A., Taylor J. Linear programming boosting via column generation. Proceedings of Seventeenth Conference on Machine Learning, 2000, pp. 65-72.
4. Voroncov K.V. Lekcii po metodam ocenivaniya i vybora modelej [Lectures on estimation methods and model selection], available at: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/2/2d/Voron-Ml-Modeling.pdf (accessed: 01/12/2022).
5. Wang B.Q., Chukova S., Lai C.D. On the relationship between regression analysis and mathematical programming. Journal of applied mathematics and decision sciences, vol. 8(2), 2004, pp. 131-140.
6. Yang L., Liu S., Tsoka, S., Papageorgiou L.G. A regression tree approach using mathematical programming. Expert systems with applications, vol. 78, 2017, pp. 347-357.
7. Bazilevskij M.P. Svedenie zadachi otbora informativnyh regressorov pri ocenivanii linejnoj regressionnoj modeli po metodu naimen'shih kvadratov k zadache chastichno-bulevogo linejnogo programmirovaniya [Reduction of the problem of selecting informative regressors when evaluating a linear regression model using the least squares method to the problem of partially Boolean linear programming]. Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii [Modeling, optimization and information technologies], Voronezh, 2018, v.6, no.1 (20), pp. 108-117.
8. Gorelik V.A., Trembacheva O.S. Reshenie zadachi linejnoj regressii s ispol'zovaniem metodov matrichnoj koprekcii v metrike [Solving a linear regression problem using matrix correction methods in metrics]. Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki [Journal of computational mathematics and mathematical physics], no. 2, 2016, pp. 202-207.
9. Mazurov V.D., Khachai M.Yu. Komitety sistemy linejnyh neravenstv [Committees of the system of linear inequalities]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemechanics], no.2, 2004, pp. 43-54.
10. Mazurov V.D. Ekzistencial'nye voprosy komitetnyh konstrukcij [Existential questions of committee constructions]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta [Part II. Bulletin of the South Ural state university], 2019, vol.19, no.1, pp. 114-120.

11. Chernavin P.F., Malygin A.V., Detkova T.V. [et al.]. Analiz i prognozirovanie vyhoda godnogo i prochnosti aglomerata na osnove modelej matematicheskogo programmirovaniya [Analysis and prediction of yield and strength of sinter based on mathematical programming models]. Chernyye metally [Black metals], no. 12, 2021, pp. 20-24.
12. Chernavin P.F., Gajnanov D.N., Pankrashchenko V.N. [et al.]. Mashinnoe obuchenie na osnove zadach matematicheskogo programmirovaniya [Machine learning based on mathematical programming problems]. Moscow, Nauka [Moscow, Scince], 2021, 128 p.
13. Chernavin P.F., Malygin A.V., Detkova T.V. [et al.]. Imitacionnaya model' podbora tekhnologicheskih parametrov dlya polucheniya aglomerata s vysokimi potrebitel'skimi svojstvami na osnove metoda komitetov [Simulation model of selection of technological parameters for obtaining agglomerate with high consumer properties based on the method of committees]. Chernyye metally [Black metals], no. 3, 2022, pp. 10-14.
14. Ashchepkov L.T. O postroyenii maksimal'nogo kuba, vpisannogo v zadannuyu oblast'. [On the construction of a maximum cube inscribed in a given area]. Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki [Journal of computational mathematics and mathematical physics], 1980, vol.20, no. 2., pp. 510-513.
15. Meindl B., Templ M. Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems. Institut f. Statistik u. Wahrscheinlichkeitstheorie, Austria, 2012, available at: https://www.researchgate.net/publication/265117825_Analysis_of_commercial_and_free_and_open_source_sol. (accessed: 12/01/2022).
16. Chernavin P.F., Chernavin F.P., Chernavin N.P. Svedenie zadach regressii k zadacham linejnogo celochislennogo programmirovaniya. Analiz, modelirovanie, upravlenie, razvitie social'no-ekonomicheskih sistem [Reduction of regression problems to linear integer programming problems. Analysis, modeling, management, development of socio-economic systems]. Sbornik nauchnykh trudov XIV Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiyem shkoly-simpoziuma AMUR-2020] [Collection of scientific papers of the XIV All-Russian School-symposium with international participation AMUR-2020], Simfiropol, 2020, pp. 383-386.
17. Tyulkova T.E., Chernavin P.F., Chernavin N.P. et. al. Prakticheskoe primenenie razlichnyh metodov mashinnogo obucheniya na primere aktivnosti tuberkuleznogo processa u lic s minimal'nymi tuberkuleznymi izmeneniyami, vyyavlennymi na rentgenogramme organov grudnoj kletki.[Practical application of various machine learning methods on the example of the activity of the tuberculosis process in persons with minimal tuberculosis changes detected on the chest X-ray.] Klinicheskiy vestnik im. A.I. Burnazyana [A.I. Burnazyan clinical bulletin], no. 2, 2022, pp. 64-73.
18. Chernavin N.P. Prognozirovanie volatil'nosti kursa valyut metodom komitetov. Vestnik CHelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. [Forecasting the volatility of the exchange rate by the method of committees.] Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of chelyabinsk state university], 2019, no. 11(43), pp. 82-94.

Chernavin Pavel Fedorovich. *Ph.D., Associate Professor of the Department of Big Data Analytics and Video Analysis Methods, Ural Federal University. Research interests: building mathematical models using operations research and machine learning methods. AuthorID: 117430, SPIN:6370-8103, ORCID: 0000-0003-3214-3906, chernavin.p.f@gmail.com, 620002, Russia, Sverdlovsk region, Ekaterinburg, st. Mira 19.*

Chernavin Nikolay Pavlovich. *Assistant Professor of Big Data Analytics and Video Analysis Methods, Ural Federal University, AuthorID: 971565, SPIN:5722-9436, ORCID: 0000-0003-3214-3906, ch_k@mail.ru, 620002, Russia, Sverdlovsk region, Ekaterinburg, st. Mira 19.*

Chernavin Fedor Pavlovich. *Ph.D., Associate Professor, Department of Controlled Systems Modeling, Ural Federal University, AuthorID: 971595, SPIN: 9237-5190, ORCID: 0000-0003-3214-3906, chernavin_fedor@mail.ru, 620002, Russia, Sverdlovsk region, Ekaterinburg, st. Mira 19.*

Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена после рецензирования 28.04.2023; принята к публикации 04.05.2023.
The article was submitted 01/10/2023; approved after reviewing 04/28/2023; accepted for publication 05/04/2023.

УДК 519.6: 533.1: 620.1
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.006

Нестационарная двухмерная численная модель конвективно-пленочного охлаждения пластины на основе явной конечно-разностной схемы предиктор-корректор

Тукмаков Алексей Львович[1,2], Щукин Андрей Викторович[1], Харьков Виталий Викторич[1], Тукмакова Надежда Алексеевна[1], Ахунов Адель Айратович[1], Тукмаков Дмитрий Алексеевич[2]

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет,
[2]Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр РАН,
Россия, Казань, *tukmakov@imm.knc.ru*

Аннотация. В работе представлена нестационарная модель течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа, позволяющая описать тепловые и скоростные поля, создаваемые основным высокотемпературным потоком, протекающим с внешней стороны пластины, внутренним охлаждающим потоком и струей, создающей охлаждающую пленку на защищаемой поверхности. Динамика газа описана на основе численного решения системы уравнений Навье-Стокса явным методом Мак-Кормака с расщеплением исходного оператора по пространственным направлениям и схемой нелинейной коррекции. Блочная конечно-разностная сетка построена методом Томпсона со сгущением узлов в пристеночной области. В качестве модели подсеточной турбулентности применяется алгебраическая модель Смагоринского. Записана итерационная схема Зейделя для стационарного уравнения теплопроводности в обобщенных криволинейных координатах.

Ключевые слова: уравнения Навье-Стокса, явная схема Мак-Кормака, уравнение теплопроводности, пристеночные функции, конвективно-пленочное охлаждение

Цитирование: Тукмаков А.Л. Нестационарная двухмерная численная модель конвективно-пленочного охлаждения пластины на основе явной конечно-разностной схемы предиктор-корректора / А.Л. Тукмаков, А.В. Щукин, В.В. Харьков, Н.А. Тукмакова, А.А. Ахунов, Д.А. Тукмаков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 57-67. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.006.

Введение. Одним из применений математических методов является разработка математических моделей физических процессов. Математические модели газовой динамики представляют собой нелинейные системы уравнений в частых производных, для интегрирования которых в частности применяются численные алгоритмы. В данной работе к системе уравнений динамики газа применен один из конечно-разностных методов, реализованный в виде компьютерной программы. Для определения сеточной сходимости численного алгоритма проведен ряд численных экспериментов на последовательности вложенных сеток. Математическая модель описывала процесс конвективно-пленочного охлаждения.

Актуальность моделирования конвективно-пленочной системы воздушного охлаждения турбин газотурбинных двигателей определяется требованиями разработки системы расчета и проектирования турбинных лопаток, позволяющей обеспечить минимально возможный расход охлаждающего воздуха при прочих равных условиях [1]. Данная задача является одной из приоритетных для турбостроения, так как основным направлением в совершенствовании авиационных газотурбинных двигателей остается повышение температуры и давления газа перед турбиной высокого давления, что требует создания жаропрочных сплавов и совершенствования систем охлаждения [2].

Важно отметить, что при увеличении температуры газа перед турбиной, достигающей в настоящее время 1900…2000 К, с каждого килограмма горячего газа вырабатывается больше полезной работы [3]. Для реализации «заградительных» способов охлаждения были разработаны различные схемы подачи воздуха на внешнюю поверхность турбинных лопаток, такие, как инжекционные [4], эффузионные [5], транспирационные [6] и пленочные варианты [7].

Наиболее хорошо себя зарекомендовали системы пленочного охлаждения с вдувом охлаждающего воздуха через отверстия и щели в поток горячего газа. Они являются наиболее технологичными, надежными и эффективными способами тепловой защиты [4].

Наряду с физическим экспериментом, исследование термо- и газодинамических процессов, происходящих при конвективно-пленочном охлаждении, ведется методами математического моделирования [8]. В практике инженерных расчетов, наряду с осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса и их замыканием с помощью полуэмпирических моделей турбулентности (RANS), используются различные модели крупных вихрей (LES) с подсеточными моделями вихревой турбулентной вязкости [9-11]. В данной работе для описания процессов, сопровождающих конвективно-пленочное охлаждение плоской пластины используется метод крупных вихрей с использованием пристеночных функций для решения нестационарной системы уравнений вязкого сжимаемого теплопроводного газа с моделью подсеточной вязкости Смагоринского [9-11]. Для получения квазистационарных решений применяется метод установления.

1. Схема расчетной области и методика расчета. Схема расчетной области приведена на рис. 1. Пластина разделяет потоки горячего (область V) и холодного газа (область I), движущиеся со скоростями $\boldsymbol{U}$, температурами T, плотностями ρ и давлениями p. Параметры горячего потока на входе – U_1, T_1, ρ_1, p_1, холодного – U_2, T_2, ρ_2, p_2. Области соединяются плоским каналом, расположенным под углом α к верхней и нижней поверхностям пластины. В области холодного течения (I) создано более высокое давление $p_2 > p_1$, в результате чего формируется холодная струя, создающая защитную пленку на внешней поверхности пластины в области V. В процессе взаимодействия с горячим потоком происходят нагрев и разрушение защитной пленки. Интерес представляет анализ температурных полей по обе стороны от пластины и распределения температуры внутри нее при различных режимных параметрах потоков, геометрических параметрах пластины и канала, интенсивностях теплоотдачи на внутренней и внешней обтекаемых поверхностях.

Для описания динамики газа была использована система уравнений метода LES в обобщенных криволинейных координатах $\xi = \xi(x, y)$, $\eta = \eta(x, y)$ [11], где (x, y) – физические, а ξ, η – расчетные координаты [12−15]:

$$\mathbf{q}_t + \mathbf{F}_\xi + \mathbf{G}_\eta = \mathbf{H}, \tag{1}$$

где $\mathbf{q}$ – вектор независимых газодинамических функций в консервативной форме; t – время; $\mathbf{F}$, $\mathbf{G}$ – вектора потоков, включающие в себя идеальную и вязкую составляющие; $\mathbf{H}$ – источниковое слагаемое;

$$\mathbf{q} = \left[\frac{\rho}{J}, \frac{\rho u}{J}, \frac{\rho v}{J}, \frac{E}{J}\right]^T;$$

$$\mathbf{F} = \frac{1}{J}\begin{bmatrix} \xi_x \rho u + \xi_y \rho v \\ \xi_x\left(\rho u^2 + p - \tau_{xx}\right) + \xi_y\left(\rho u v - \tau_{xy}\right) \\ \xi_x\left(\rho u v - \tau_{xy}\right) + \xi_y\left(\rho v^2 + p - \tau_{yy}\right) \\ \xi_x\left(\left(E + p - \tau_{xx}\right)u - \tau_{xy} v + Q_x\right) + \xi_y\left(\left(E + p - \tau_{yy}\right)v - \tau_{xy} u + Q_y\right) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G}=\frac{1}{J}\begin{bmatrix}\eta_x\rho u+\eta_y\rho v\\ \eta_x\left(\rho u^2+p-\tau_{xx}\right)+\eta_y\left(\rho uv-\tau_{xy}\right)\\ \eta_x\left(\rho uv-\tau_{xy}\right)+\eta_y\left(\rho v^2+p-\tau_{yy}\right)\\ \eta_x\left(\left(E+p-\tau_{xx}\right)u-\tau_{xy}v+Q_x\right)+\eta_y\left(\left(E+p-\tau_{yy}\right)v-\tau_{xy}u+Q_y\right)\end{bmatrix};$$

$$\mathbf{H}=\frac{1}{J}\begin{bmatrix}div(\nu_t\nabla\rho)\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix};$$

Здесь ρ, u, v, E, I, T, p – плотность, продольная и поперечная составляющие скорости, полная и внутренняя энергия, температура и давление газа, соответственно; J – якобиан перехода; $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$ – метрические коэффициенты; Q_x, Q_y – тепловые потоки ; τ_{xx}, τ_{yy}, τ_{xy} – составляющие тензора вязких напряжений:

$$\tau_{xy}=\left(\mu+\mu_t\right)\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right);\quad \tau_{xx}=2\left(\mu+\mu_t\right)\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{2}{3}\left(\mu+\mu_t\right)div(\mathbf{U});$$

$$\tau_{yx}=\tau_{xy};\quad \tau_{yy}=2\left(\mu+\mu_t\right)\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{2}{3}\left(\mu+\mu_t\right)\cdot div(\mathbf{U});\quad div\left(\mathbf{U}\right)=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y};$$

μ, μ_t – динамическая молекулярная и подсеточная вихревая вязкость газа, соответственно.

Составляющие теплового потока Q_x и Q_y:

$$Q_x=-(\mathrm{k}+\mathrm{k}_t)\frac{\partial T}{\partial x};\quad Q_y=-(\mathrm{k}+\mathrm{k}_t)\frac{\partial T}{\partial y};\quad \mathrm{k}_t=C_p\mu_t/Pr_t,$$

где Pr_t – подсеточное турбулентное число Прандтля; k, k_t – коэффициенты молекулярной и подсеточной вихревой теплопроводности, соответственно; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Полная энергия газа рассчитывалась по уравнению $E=I+0.5\rho\left(u^2+v^2\right)$, а внутренняя энергия газа – $I=\rho C_V T$, где C_V – удельная теплоемкость при постоянном объеме. Температура газа определялась как $T=\left(E-0.5\rho(u^2+v^2)\right)/\rho C_V$, а давление газа – $p=(\gamma-1)\rho I$ где γ – постоянная адиабаты.

Метрические коэффициенты и якобиан перехода от расчетных координат к физическим задаются в виде [12–15]: $\xi_x=J\cdot y_\eta$, $\xi_y=-J\cdot x_\eta$, $\eta_x=-J\cdot y_\xi$, $\eta_y=J\cdot x_\xi$, $J=\xi_x\eta_y-\xi_y\eta_x$.

Система (1) решалась явным методом Мак-Кормака второго порядка [13, 15-18] с расщеплением исходного оператора по пространственным направлениям:

$$\mathbf{q}_{j,k}^{n+1}=\mathbf{P}_\xi(\Delta t_\xi/2)\mathbf{P}_\eta(\Delta t_\eta/2)\mathbf{P}_\eta(\Delta t_\eta/2)\mathbf{P}_\xi(\Delta t_\xi/2)\mathbf{q}_{j,k}^{n}\qquad(2)$$

Переход с временного слоя t^n на слой t^{n+1} за счет применения одномерных операторов к вектору газодинамических функций с предыдущего слоя осуществляется следующим образом:

$$\mathbf{q}_{j,k}^{(1)}=\mathbf{P}_\xi(\Delta t_\xi/2)\mathbf{q}_{j,k}^{n},\quad \mathbf{q}_{j,k}^{(2)}=\mathbf{P}_\eta(\Delta t_\eta/2)\mathbf{q}_{j,k}^{(1)},$$

$$\mathbf{q}_{j,k}^{(3)}=\mathbf{P}_\eta(\Delta t_\eta/2)\mathbf{q}_{j,k}^{(2)},\quad \mathbf{q}_{j,k}^{n+1}=\mathbf{P}_\xi(\Delta t_\xi/2)\mathbf{q}_{j,k}^{(3)}.\qquad(3)$$

Здесь $\Delta t_\xi = \Delta t_\eta = \Delta t$. Так, для получения промежуточных значений вектора $\mathbf{q}^{(1)}$ необходимо применить одномерный оператор $\mathbf{P}_\xi(\Delta t_\xi / 2)$ по переменной ξ к вектору газодинамических функций на временном слое t^n. Действие каждого одномерного оператора $\mathbf{P}$ состоит в последовательном выполнении шагов «предиктор» и «корректор» по соответствующей пространственной переменной:

$$\mathbf{q}_{j,k}^{(1)*} = \mathbf{q}_{j,k}^{n} - \frac{(\Delta t_\xi / 2)}{\Delta\xi}\left(\mathbf{F}_{j+1,\,\mathrm{k}}^{n} - \mathbf{F}_{j,\,\mathrm{k}}^{n}\right), \tag{4}$$

$$\mathbf{q}_{j,k}^{(1)} = 0.5(\mathbf{q}_{j,k}^{n} + \mathbf{q}_{j,k}^{(1)*}) - 0.5\frac{(\Delta t_\xi / 2)}{\Delta\xi}\left(\mathbf{F}_{j,\,\mathrm{k}}^{(1)*} - \mathbf{F}_{j-1,\,\mathrm{k}}^{(1)*}\right), \tag{5}$$

$$\mathbf{q}_{j,k}^{(2)*} = \mathbf{q}_{j,k}^{1} - \frac{(\Delta t_\eta / 2)}{\Delta\eta}\left(\mathbf{G}_{j,\,\mathrm{k+1}}^{(1)} - \mathbf{G}_{j,\,\mathrm{k}}^{(1)}\right), \tag{6}$$

$$\mathbf{q}_{j,k}^{(2)} = 0.5(\mathbf{q}_{j,k}^{1} + \mathbf{q}_{j,k}^{(2)*}) - 0.5\frac{(\Delta t_\eta / 2)}{\Delta\eta}\left(\mathbf{G}_{j,\,\mathrm{k}}^{(2)*} - \mathbf{G}_{j,\,\mathrm{k\text{-}1}}^{(2)*}\right), \text{ и т. д.} \tag{7}$$

На шаге «предиктор» аппроксимация производных по ξ, входящих в $\mathbf{F}_{j+1,k}^{n}$, $\mathbf{F}_{j,k}^{n}$ выполняется с помощью левой разностной схемы первого порядка точности, на шаге «корректор» – при помощи правой, а производные по η приближаются центральными разностными схемами второго порядка. Производные по η, входящие в $\mathbf{G}_{j,k+1}^{n}$, $\mathbf{G}_{j,k}^{n}$ аппроксимируются на шаге «предиктор» левыми разностными схемами первого порядка, а на шаге «корректор» – правыми. Разностные производные по ξ в $\mathbf{G}_{j,k+1}^{n}$, $\mathbf{G}_{j,k}^{n}$ на каждом шаге – центральные.

Подсеточная динамическая вязкость определялась при помощи модели Смагоринского [10]:

$$\mu_t = \rho(C_\mu \Delta)^2 S, \quad \Delta = \min(\Delta x, \Delta y), \quad S = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2},$$

где C_μ – константа Смагоринского, $C_\mu = 0.151$.

Блочно-структурированная конечно-разностная сетка строилась путем объединения сеточных блоков области течения газа, показанных на рис. 1б. Внутри каждого блока для построения сетки применялся метод Томпсона [13]. Сетки смежных блоков, в том числе, твердотельные, предназначенные для решения задачи теплопроводности, строились конформные, с совпадающими на границах блоков узлами.

На твердых границах расчетной области для составляющих скорости задавались условия прилипания, для давления, температуры, энергии и плотности газа – однородные граничные условия 2 рода. На входных границах областей течения горячего и холодного газа задавались давление, плотность и температура, а также однородные граничные условия 2 рода для составляющих скорости. На выходных границах задавались значения давления и ставились однородные граничные условия 2 рода для остальных газодинамических функций.

Для моделирования теплового пограничного слоя и определения температуры поверхности пластины применялись скоростная и тепловая пристеночные функции, связывающие безразмерные параметры $T^+ = (T_w - T_i)/T_\tau$ и $y^+ = \rho u_\tau d_0 / \mu$. Здесь T_w – температура стенки в данном узле на поверхности пластины; T_i – температура потока в ближайшем к нему узле газодинамической сетки; $T_\tau = q_w / (\rho C_p u_\tau)$ – температура трения [19]; d_0 – расстояние от узла, расположенного на поверхности пластины до ближайшего узла газодинамической сетки. Использовалась тепловая пристеночная функция вида [19]:

$$T^+(y^+) = \begin{cases} y^+Pr,\ y^+Pr < 1, \\ 1.87\ln(y^+Pr+1) + 0.065y^+Pr - 0,36,\ 1 \le y^+Pr \le 11.7, \\ 2.5\ln(y^+Pr) - 1,\ y^+Pr > 11.7 \end{cases} \quad (8)$$

Касательное напряжение поверхностного трения τ_w и динамическая скорость $u_\tau = (\tau_w / \rho)^{1/2}$ определяются методом, описанным в [20]. Тепловой поток выражается через температуру трения и параметр T^+ [19]: $q_w = (T_w - T_i)\rho C_p u_\tau / T^+$. Отсюда коэффициент теплоотдачи на поверхности пластина-газ $\alpha = \rho C_p u_\tau / T^+$.

Зная температуры газа T_1, T_2 вблизи горячей и холодной поверхностей пластины в ближайших к поверхности узлам газовой сетки, коэффициенты теплоотдачи поверхностей α_1, α_2, теплопроводность пластины λ и ее толщину h, найдем температуры в узлах на поверхностях пластины [21]:

$$T_{w1} = T_1 - (k_c / \alpha_1)(T_1 - T_2),\ T_{w2} = T_2 + (k_c / \alpha_2)(T_1 - T_2), \quad (9)$$

где $\alpha_1 = \rho_1 C_p u_{\tau 1} / T_1^+$, $\alpha_2 = \rho_2 C_p u_{\tau 2} / T_2^+$ – коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего и холодного потоков; $k_c = (1/\alpha_1 + 1/\alpha_2 + h/\lambda)^{-1}$ – коэффициент теплопередачи стенки. В ряде работ газодинамическая задача о формировании пленочного заграждения описывается в предположении о нетеплопроводной стенке [8]. Такая модель реализуется при $\lambda \to 0$. Из (9) следует, что при этом условии температура поверхности стенки равна температуре газа в области, прилегающей к поверхности: $T_{w1} = T_1$, $T_{w2} = T_2$. Другой предельный случай реализуется при $\lambda \to \infty$, в частности, при $\alpha_1 = \alpha_2$: $T_{w1} = T_{w2} = (T_1 + T_2)/2$. При решении сопряженной задачи коэффициент теплопередачи рассчитывается с учетом толщины пластины и коэффициента теплопроводности.

В квазидинамическом приближении решение уравнения теплопроводности сводится к решению уравнения Лапласа, записанному в обобщенных криволинейных координатах и разрешенному относительно температуры в узле (j, k):

$$T_{j,k} = \frac{(\Delta\xi\Delta\eta)^2}{2\left(a\Delta\eta^2 + c\Delta\xi^2\right)} \times \left(a\frac{T_{j+1,k} + T_{j-1,k}}{\Delta\xi^2} + c\frac{T_{j,k+1} + T_{j,k-1}}{\Delta\eta^2} + \right.$$

$$\left. +0.5b\frac{T_{j+1,k+1} + T_{j-1,k-1} - T_{j-1,k+1} - T_{j+1,k-1}}{\Delta\xi\Delta\eta} + d\frac{T_{j+1,k} - T_{j-1,k}}{2\Delta\xi} + e\frac{T_{j,k+1} - T_{j,k-1}}{2\Delta\eta}\right),$$

$$a = \xi_x^2 + \xi_y^2,\ b = \xi_x\eta_x + \xi_y\eta_y,\ c = \eta_x^2 + \eta_y^2,\ d = \xi_{xx} + \xi_{yy},\ e = \eta_{xx} + \eta_{yy},$$

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = \left[Jy_\eta\right]_\xi \xi_x + \left[Jy_\eta\right]_\eta \eta_x - \left[Jx_\eta\right]_\xi \xi_y - \left[Jx_\eta\right]_\eta \eta_y,$$

$$\eta_{xx} + \eta_{yy} = -\left[Jy_\xi\right]_\xi \xi_x - \left[Jy_\xi\right]_\eta \eta_x + \left[Jx_\xi\right]_\xi \xi_y + \left[Jx_\xi\right]_\eta \eta_y.$$

На каждом временном шаге определялась температура газа в узлах газодинамической расчетной области, задавались граничные условия для температуры пластины на границах твердотельных блоков. Во внутренних узлах твердотельных блоков температура может быть определена из решения уравнения Лапласа, записанного в обобщенных криволинейных координатах методом Зейделя с контролем сходимости решения.

Монотонность решения, полученного методом Мак-Кормака, достигалась применением алгоритма нелинейной коррекции [22] к вектору газодинамических функций $U = (\rho, u, v, E)^T$ после перехода на следующий временной слой (при $t = t^{n+1}$):

$$U_j = \tilde{U}_j + k\left(\delta\Phi_{j+1/2} - \delta\Phi_{j-1/2}\right) \qquad (10)$$

где $\delta\Phi_{j+1/2} = \delta\tilde{U}_{j+1/2}$, если $\left(\delta\tilde{U}_{j-1/2}\cdot\delta\tilde{U}_{j+1/2}\right) < 0$, или $\left(\delta\tilde{U}_{j+1/2}\cdot\delta\tilde{U}_{j+3/2}\right) < 0$, и $\delta\Phi_{j+1/2} = 0$ в любом другом случае. Здесь $\delta\tilde{U}_{j+1/2} = \tilde{U}_{j+1} - \tilde{U}_j$, $\tilde{U}_j$ – значение функции после перехода на $(n+1)$ временной слой по схеме Мак-Кормака без применения схемы коррекции, коэффициент $k = 0.125$. Коррекция выполнялась последовательно по всем строкам вдоль координатных линий ξ, а затем по всем столбцам вдоль координатных линий η в расчетной области.

2. Результаты расчетов. В начальный момент времени во внутренних узлах газовой расчетной области задавались температура, плотность и составляющие скорости газа. В узлах твердотельных областей II, IV (рис. 1) – значения температуры пластины.

Рассматривалось течение воздуха в областях по обе стороны от пластины, соединенных наклонным каналом (рис. 1а). Длина расчетной области L = 0.16 м, высота h_1 = 0.1 м, h_2 = 0.08 м. Расстояние вдоль пластины от входного сечения до боковой стенки наклонной щели $|F_2E_2|$ =0.07 м. В начальный момент времени задавались температуры и плотности неподвижного газа в узлах газодинамической сетки: T_{20} = 299 К, ρ_{10} = 1.6 кг/м^3, T_{10} = 600 К, ρ_{20} = 0.76 кг/м^3, а также температура в узлах твердотельной сетки $T = T_{20}$. Давление газа на входе и выходе областей I и V составляло, соответственно: $p_{вх} = 1.1p_{20}$, $p_{вых} = 0.9p_{20}$, $p_{вх} = 1.1p_{10}$, $p_{вых} = 0.9p_{10}$, где $p_{20} = 128$ кПа и $p_{10} = 120.5$ кПа – начальные давления газа в областях I и V. Расчеты проводились для воздуха при Pr_t = 0.9. На верхней границе области V и на нижней границе области I для всех газодинамических функций, задавались однородные граничные условия 2 рода (рис. 1б). Толщина пластины h и ширина наклонной щели d составляли $h = d = 0.003$ м, коэффициент теплопроводности составлял λ = 200 Вт/(м·К).

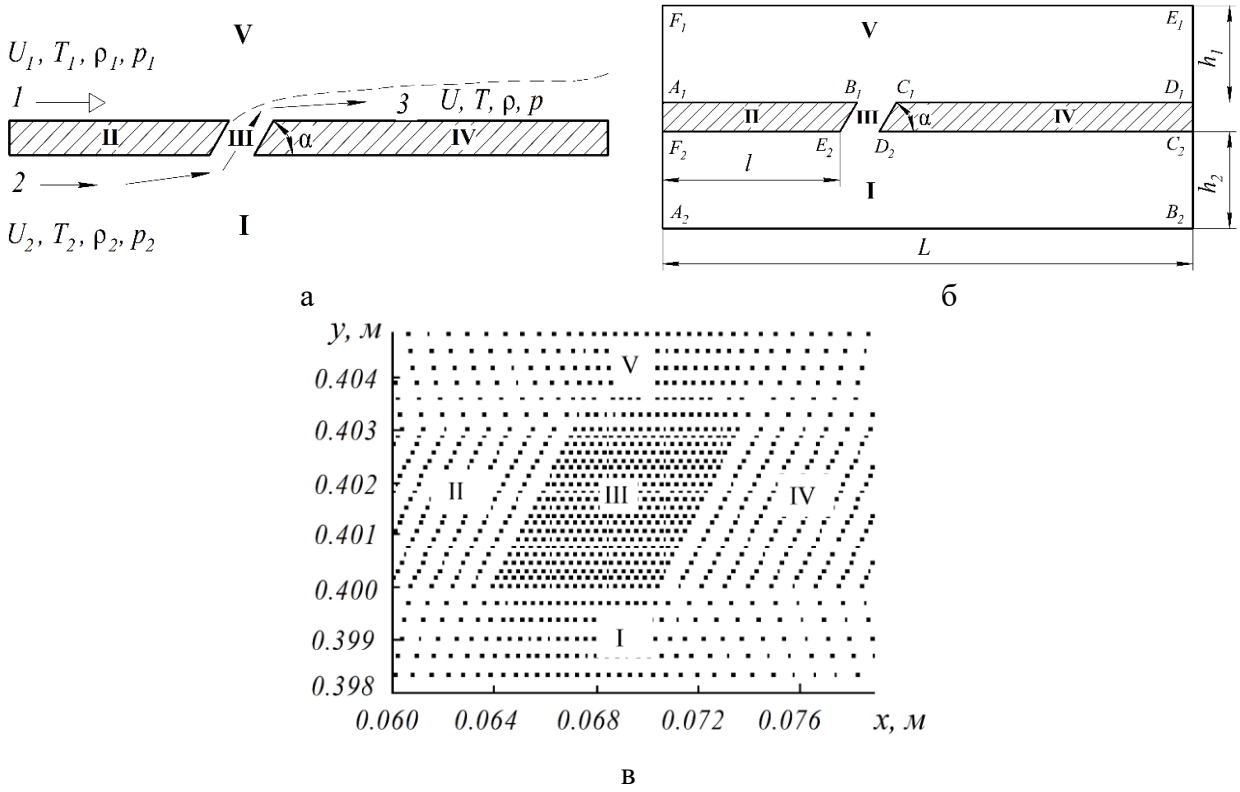


Рис. 1. Схема расчетной области (а), расположение сеточных блоков (б) и фрагмент конечно-разностной сетки в окрестности канала (в): 1 – горячий поток; 2 – холодный поток; 3 – зона формирования пленки

Для оценки работоспособности метода проводились расчеты течения газа в канале с инжектируемой в поток струей под заданным углом. Расчетная область покрывалась равномерной вдоль осей сеткой с числом узлов $I \times J$ = 200×200. Задавались начальные плотности, скорости, температура газа. На боковых стенках канала для составляющих скорости ставились условия прилипания и однородные граничные условия 2 рода для остальных газодинамических функций. На нижней стенке канала при 0.15 м < x < 0.173 м задавались нормальная и касательная составляющие скорости струи. На входной границе канала для всех газодинамических функций задавались однородные граничные условия 2 рода. На выходной границе задавалась продольная составляющая скорости и однородные граничные условия 2 рода для остальных функций. На рис. 2 приведено поле скоростей потока в случае, когда ширина щели, образующей с нижней стенкой угол $\alpha = 35^0$, равна d = 0.013 м. В этом случае сечение щели располагается при 0.15 м < x < 0.173 м. Расчеты показывают, что ниже области вдува (x > 0.173 м) формируется вихрь (рис. 2).

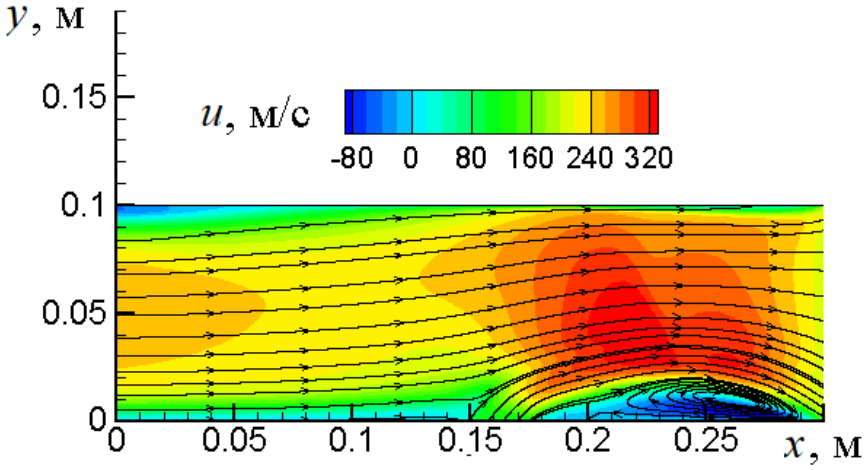


Рис. 2. Поле скоростей

На рис. 3 приведено пространственное распределение величины, равной отношению подсеточной динамической вязкости к молекулярной. Наибольшая величина подсеточной вязкости ($\mu_t / \mu \approx 50$) достигается на границах области вдува и в области, где располагается вихревая структура.

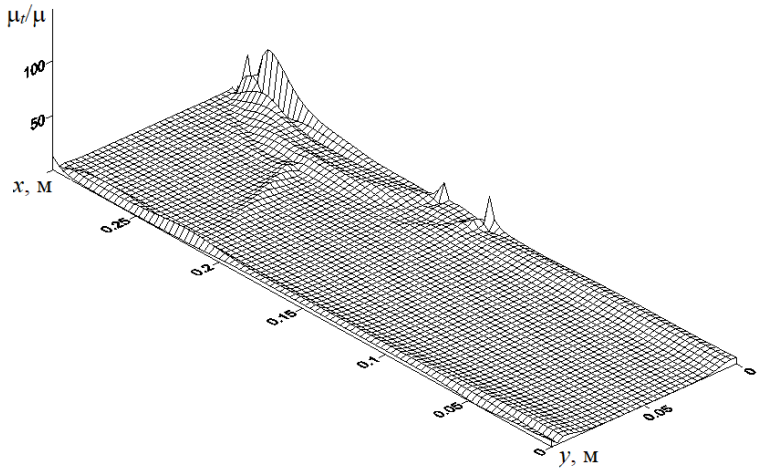
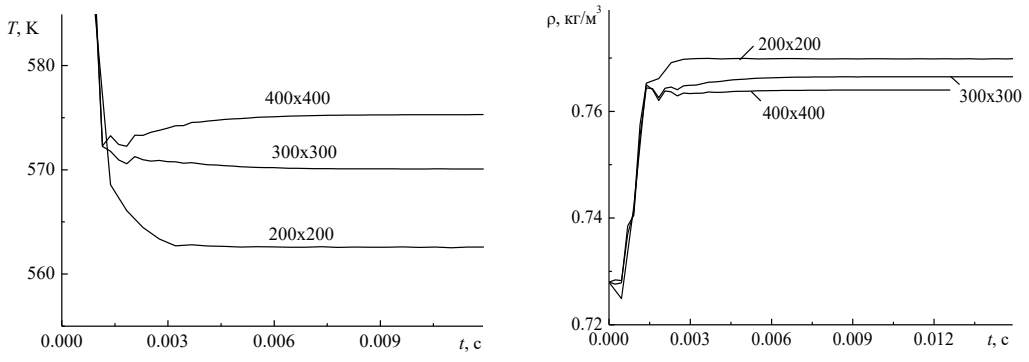


Рис. 3. Пространственное распределение подсеточной вязкости в расчетной области

На рис. 4а, б приведены результаты расчетов процесса установления температуры (а) и плотности газа (б) в точке ($x = L/2$, $y = h_2 + d + 0.5h_1$) на сетках с числом узлов 200×200, 300×300, 400×400. Сопоставление результатов расчетов на вложенной последовательности сеток демонстрирует сходимость конечно-разностного решения.



а б

Рис. 4. Процесс установления температуры (а) и плотности газа (б) в точке ($x = L/2$, $y = h_2 + d + 0.5h_1$) при измельчении конечно-разностной сетки

Заключение. В работе на основе численного решения системы уравнений Навье-Стокса проведены расчеты, выполненные при значении параметра вдува $m=(\rho_2|U_2|)/(\rho_1|U_1|)\approx 0.65$ и отрывном режиме течения струи. Исследована сеточная сходимость конечно-разностной модели пленочного охлаждения пластины. Выявлено, что ниже области вдува происходит формирование вихревой структуры. Определено, что наибольшая величина подсеточной вязкости достигается на границах области вдува и в области, где формируется вихрь.

Благодарности. Работа выполнялась в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Список источников

1. Локай В.И. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. – М.: Машиностроение, 1993. –287 с.
2. Марчуков Е.Ю. Эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности в ускоряющемся потоке при вдуве воздуха через веерные отверстия / Е. Ю. Марчуков, А.В. Стародумов, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, А.М. Ермаков, В.В. Такмовцев, П.А. Попов // Теплоэнергетика, 2022. – Т. 69. – № 4. – С. 70-80.
3. Han J. C. Advanced cooling in gas turbines 2016 Max Jakob Memorial Award Paper. Journal of heat transfer, 2018, vol. 140, no. 11.
4. Fathi M., Nejat A. Conjugate heat transfer investigation of impingement cooling for ribbed internal passage of a turbine vane. International Journal of Thermal Sciences, 2022, vol. 178.
5. Krewinkel R. A review of gas turbine effusion cooling studies. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, vol. 66, pp. 706-722.
6. Kim M. Shin D., Kim J., Lee B., Lee J. Experimental investigation of effusion and transpiration air cooling for single turbine blade. Applied Thermal Engineering, 2021, vol. 182.
7. Zhang J., Zhang S., Wang C., Tan X. Recent advances in film cooling enhancement: A review. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, vol. 33, no. 4, pp. 1119-1136.
8. Krishna V.G., Anand K.M. Parammasivam Thermal barrier coated surface modifications for gas turbine film cooling: a review. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, vol. 146, no. 2, pp. 545-580.
9. Волков К.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. − 368 с.
10. Юрокина Ю.В. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца в плоском слое смешения / Ю.В. Юрокина // Математическое моделирование, 1999. − Т. 11. − № 4. − С. 83-99.
11. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений / А. В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур. − СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2012. − 88 с.
12. Ковеня В.М. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики / В.М. Ковеня, Г.А. Тарнавский, С.Г. Черный. – Новосибирск: Наука. Сибирское Отделение, 1990. − 242 с.
13. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / К. Флетчер. − М.: Мир, 1991. − Т. 2. −502 с.
14. Steger J.L. Implicit finite-difference simulation of flow about arbitrary two-dimensional geometries. AIAA Journal, 1978, vol. 16, no. 7, pp. 679-686.
15. Ажаронок В.В. Динамика рабочей среды диффузионно-охлаждаемого электроразрядного CO_2−лазера при

периодическом тепловыделении в окрестности оси разрядно-резонаторной трубки / В.В. Ажаронок, А.Л. Тукмаков // Инженерно-физический журнал, 2014. − Т. 87. − № 6. − С. 1409-1418.
16. Тукмаков А.Л. Численное исследование влияния параметров дисперсных частиц на осаждение твердой фазы электрически заряженной полидисперсной газовзвеси / А.Л. Тукмаков, Д.А. Тукмаков // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика, 2022. − Т. 22. − № 1. − С. 90-102.
17. Тукмаков Д.А. Численное моделирование распространения ударной волны из газа в электрически заряженную и нейтральную газовзвеси в плоском канале / Д.А. Тукмаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020. − Т. 340. − № 2. − С. 9-18.
18. Тукмаков Д.А. Численное моделирование взаимодействия газовзвеси с ударной волной континуальными математическими моделями с идеальной и диссипативными несущими средами / Д.А. Тукмаков // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика, 2022. − Т. 11. − № 4. − С. 67-87.
19. Ефремов В.Р. Использование пристеночных функций для моделирования турбулентного теплового пограничного слоя / В.Р. Ефремов, В.В. Курулин, А.С. Козелков, А.А. Куркин, Д.А. Уткин // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2019. – Т. 59. − № 6. – С. 1037-1046.
20. Луцкий А.Е. Простейшая реализация метода пристеночных функций / А.Е. Луцкий, А.В. Северин // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2013. − № 38.
21. Мухачев Г.А. Термодинамика и теплопередача. / Г.А. Мухачев, В.К. Щукин. – М.: Высшая школа, 1991. − 479 с.
22. Музафаров И.Ф. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа / И.Ф. Музафаров, С.В. Утюжников // Математическое моделирование, 1993. – № 3. – С. 74-83.

Тукмаков Алексей Львович. *Доктор физико-математических наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета. Основные направления исследований: механика жидкости и газа. SPIN: 9496-7540, AuthorID: 6385, tukmakov@imm.knc.ru, г. Казань, ул. К.Маркса 10.*

Щукин Андрей Викторович. *Доктор технических наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета. Основные направления исследований: теплофизика. SPIN: 9930-7392, AuthorID: 27448, a.v.shchukin@rambler.ru, г.Казань, ул. К.Маркса 10.*

Харьков Виталий Викторич. *Кандидат технических наук, доцент Казанского национального исследовательского технического университета. Основные направления исследований: процессы химических технологий. SPIN: 7055-7282, AuthorID: 811526, v.v.kharkov@gmail.com, г.Казань, ул. К.Маркса 10.*

Тукмакова Надежда Алексеевна. *Кандидат технических наук, доцент Казанского национального исследовательского технического университета. Основные направления исследований: механика жидкости и газа. SPIN: 3245-6962, AuthorID: 908006, nadejdatukmakova@yandex.ru, г.Казань, ул. К.Маркса 10.*

Ахунов Адель Айратович. *Аспирант Казанского национального исследовательского технического университета. Основные направления исследований: механика жидкости и газа. SPIN: 1040-8375, AuthorID: 857165, white-bars95@yandex.ru, г.Казань, ул. К.Маркса 10.*

Тукмаков Дмитрий Алексеевич. *Кандидат физ.- мат. наук, научный сотрудник Федерального исследовательского центра Казанского научного центра РАН. Основные направления исследований: механика жидкости и газа, AuthorID: 739648, SPIN: 3556-8576, tukmakovda@imm.knc.ru, г.Казань, ул. Лобачевского д.2/3.*

UDC 519.6: 533.1: 620.1
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.006

Non-stationary two-dimensional numerical model of convective-film cooling of a plate based on explicit finite difference predictor-corrector scheme

Alexey L. Tukmakov[1,2], Andrey V. Schukin[1], Vitaliy V. Kharkiv[1], Nadezhda A. Tukmakova[1], Adel A. Akhunov[1], Dmitry A. Tukmakov[2]
[1]Kazan National Research Technical University, Russia, Kazan, *tukmakov@imm.knc.ru*
[2]Federal Research Center Kazan Scientific Center RAS, Russia, Kazan.

Abstract. The paper presents a non-stationary model of the flow of a viscous compressible heat-conducting gas, which makes it possible to describe the thermal and velocity fields created by the main high-temperature flow flowing from the outside of the plate, the internal cooling flow and the jet that creates a cooling film on the protected surface. The gas dynamics is described based on the numerical solution of the Navier-Stokes system of equations by the explicit McCormack method with splitting of the original operator in spatial directions and a nonlinear correction scheme. The block finite-difference grid was constructed by the Thompson method with clustering of nodes in the near-wall region. The algebraic Smagorinsky model is used as a subgrid turbulence model. The Seidel iterative scheme for the stationary heat conduction equation in generalized curvilinear coordinates is written.

Keywords: navier-Stokes equations, explicit McCormack scheme, heat equation, near-wall functions, convective-film cooling

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state task of the FRC KazSC RAS

References

1. Lokai V.I., Bodunov M.N., Zhuikov V.V., Shchukin A.V. Effektivnost' plenochnogo ohlazhdeniya ploskoj poverhnosti v uskoryayushchemsya potoke pri vduve vozduha cherez veernye otverstiya [Heat transfer in cooled parts of gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie [Moscow: Mechanical Engineering], 1993, 287 p.
2. Marchukov E.Y., Starodumov A.V., Ilyinkov A.V., Shchukin A.V., Ermakov A.M., Takmovtsev V.V., Popov I.A. Effektivnost' plenochnogo ohlazhdeniya ploskoj poverhnosti v uskoryayushchemsya potoke pri vduve vozduha cherez veernye otverstiya [The efficiency of film cooling of a flat surface in an accelerating flow with air blowing through fan holes]. Teploenergetika [Thermal power engineering], 2022, no. 4, pp. 70-80.
3. Han J.C. Advanced cooling in gas turbines 2016 Max Jakob memorial award paper. Journal of heat transfer, 2018, v. 140, no. 11.
4. Fathi M., Nejat A. Conjugate heat transfer investigation of impingement cooling for ribbed internal passage of a turbine vane. International Journal of thermal sciences, 2022, vol. 178.
5. Krewinkel R. A review of gas turbine effusion cooling studies. International Journal of heat and mass transfer, 2013, v. 66, pp. 706-722.
6. Kim M. Shin D., Kim J., Lee B., Lee J. Experimental investigation of effusion and transpiration air cooling for single turbine blade. Applied thermal engineering, 2021, v. 182.
7. Zhang J., Zhang S., Wang C., Tan X. Recent advances in film cooling enhancement: A review. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, v. 33, no. 4, pp. 1119-1136.
8. Krishna V.G., Anand K.M. Parammasivam thermal barrier coated surface modifications for gas turbine film cooling: a review. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2021, v. 146, no. 2, pp. 545-580.
9. Volkov K.N., Emelyanov V.N. Modelirovanie krupnyh vihrej v raschetah turbulentnyh techenij [Modeling of large eddies in calculations of turbulent flows]. Moscow: FIZMATLIT, 2008, 368 p.
10. Yurokina Y.V. Neustojchivost' Kel'vina-Gel'mgol'ca v ploskom sloe smesheniya [Kelvin-Helmholtz instability in a flat mixing layer]. Matematicheskoye modelirovaniye [Mathematical Modeling], 1999, vol. 11, no. 4, pp. 83-99.
11. Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L. Modelirovanie turbulentnosti v raschetah slozhnyh techenij [Modeling of turbulence in calculations of complex flows]. Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta [Publishing house of the Polytechnic University], 2012, 88 p.
12. Kovenya V.M., Tarnavskii G.A., Cherny S.G. Primenenie metoda rasshchepleniya v zadachah aerodinamiki. [Application of the splitting method in problems of aerodynamics]. Novosibirsk: Nauka.Sibirskoye otdeleniye [Novosibirsk: Science. Siberian branch], 1990, 242 p.
13. Fletcher K. Vychislitel'nyye metody v dinamike zhidkostey [Computational methods in fluid dynamics]. Moscow: Mir, 1991, v. 2, 502 p.
14. Steger J.L. Implicit finite-difference simulation of flow about arbitrary two-dimensional geometries, AIAA Journal, 1978, v. 16, no. 7, pp. 679-686.

15. Azharonok V.V., Tukmakov A.L. Dinamika rabochey sredy diffuzionno- okhlazhdayemogo elektrorazryadnogo SO2−lazera pri periodicheskom teplovydelenii v okrestnosti osi razryadno-rezonatornoy trubki [Dynamics of the working medium of a diffusion-cooled electric-discharge CO2 laser with periodic heat release in the axial region of its cylindrical resonator]. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal [Journal of engineering physics and thermophysics], 2014, v. 87, no 6, pp. 1469-1479.
16. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. Chislennoe issledovanie vliyaniya parametrov dispersnyh chastic na osazhdenie tverdoj fazy elektricheski zaryazhennoj polidispersnoj gazovzvesi [Numerical study of the influence of the parameters of dispersed particles on the deposition of the solid phase of an electrically charged polydisperse gas suspension]. Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika [Proceedings of the Saratov University. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics], 2022, v. 22, no. 1, pp. 90-102.
17. Tukmakov D.A. Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya udarnoy volny iz gaza v elektricheski zaryazhennuyu i neytral'nuyu gazovzvesi v ploskom kanale [Numerical modeling of shock wave propagation from gas into electrically charged and neutral gas suspensions in a flat channel]. Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2020, no. 2, pp. 9-18.
18. Tukmakov D.A. CHislennoe modelirovanie vzaimodejstviya gazovzvesi s udarnoj volnoj kontinu-al'nymi matematicheskimi modelyami s ideal'noj i dissipativnymi nesushchimi sredami [Numerical modeling of the interaction of a gas suspension with a shock wave by continuum mathematical models with ideal and dissipative carrier media]. Vestnik YUUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika [Bulletin of SUSU. Series: Computational mathematics and informatics], 2022, v. 11, no. 4, pp. 67-87.
19. Efremov V.R., Kurulin V.V., Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Utkin D.A. Ispol'zovanie pristenochnyh funkcij dlya modelirovaniya turbulentnogo teplovogo pogranichnogo sloya [Use of near-wall functions for modeling a turbulent thermal boundary layer]. Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki [Journal of computational mathematics and mathematical physics], 2019, v. 59, no. 6, pp. 1037-1046.
20. Lutsky A.E., Severin A.V. Prostejshaya realizaciya metoda pristenochnyh funkcij [The simplest implementation of the near-wall functions method]. Preprinty IPM im. M.V. Keldysha RAN [Preprints of IPM named after M.V. Keldysh RAS], 2013, no. 38.
21. Mukhachev G.A., Shchukin V.K. Termodinamika i teploperedacha [Thermodynamics and heat transfer]. Matematicheskoye modelirovaniye [M.: Higher school], 1991, 479 p.
22. Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. Primenenie kompaktnyh raznostnyh skhem k issledovaniyu ne-stacionarnyh techenij szhimaemogo gaza [Application of compact difference schemes to the study of non-stationary flows of a compressible gas]. Matematicheskoye modelirovaniye [Mathematical modeling], 1993, no. 3, pp. 74-83.

Tukmakov Aleksey Lvovich. *Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Kazan National Research Technical University. Main areas of research: fluid and gas mechanics, SPIN: 9496-7540, AuthorID: 6385, tukmakov@imm.knc.ru, Kazan, st K. Marx 10.*

Schukin Andrey Viktorovich. *Doctor of Technical Sciences, Professor of the Kazan National Research Technical University. Main areas of research: thermal physics. SPIN: 9930-7392, AuthorID: 27448, a.v.shchukin@rambler.ru, Kazan, st. K.Marx 10.*

Kharkiv Vitaliy Viktorich. *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Kazan National Research Technical University. Main areas of research:chemical technology processes. SPIN: 7055-7282, AuthorID: 811526, v.v.kharkov@gmail.com, Kazan, St. K.Marx 10.*

Tukmakova Nadezhda Alekseevna. *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Kazan National Research Technical University. Main areas of research: fluid and gas mechanics fluid and gas mechanics, SPIN: 3245-6962, AuthorID: 908006, Kazan, nadejdatukmakova@yandex.ru, St. K.Marx 10.*

Akhunov Adel Airatovich. *Postgraduate student of the Kazan National Research Technical University. Main areas of research: fluid and gas mechanics. SPIN: 1040-8375, AuthorID: 857165, white-bars95@yandex.ru, Kazan, st. K.Marksa 10.*

Tukmakov Dmitry Alekseevich. *Candidate of Physics and Mathematics Sci., Researcher at the Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Main areas of research: fluid and gas mechanics. AuthorID: 739648, SPIN: 3556-8576, tukmakovda@imm.knc.ru, Kazan, st. Lobachevsky h.2/31.*

Статья поступила в редакцию 06.02.2023; одобрена после рецензирования 24.03.2023; принята к публикации 12.05.2023.
The article was submitted 02/06/2023; approved after reviewing 03/24/2023; accepted for publication 05/12/2023.

УДК 004.942
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.007

Имитационная модель параметрически возбуждаемого модуляционного микромеханического гироскопа

Боголюбов Владимир Михайлович, Бахтиева Ляля Узбековна,
Цыганов Олег Владимирович
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Россия, Казань, *bvm200@yandex.ru*

Аннотация. Построена математическая модель микромеханического гироскопа (ММГ) гибридного типа, в которой для устранения «нулевого смещения» использован хорошо отработанный в роторных вибрационных гироскопах принцип модуляции первичной информации в механическом контуре и ее съема во вращающейся системе координат. Кроме того, предусмотрен режим параметрического возбуждения чувствительного элемента, позволяющий расширить измерительные возможности прибора без вмешательства в его механический контур и повысить точность работы ММГ. Симуляция модели проведена в среде Matlab-Simulink, предоставляющей возможность решать дифференциальные уравнения модели в интерактивном режиме при различных входных параметрах. На основании полученных результатов сформулированы условия реализации параметрического возбуждения ММГ путем модуляции его угловой скорости вращения (динамической жесткости). Показана возможность существенного повышения точности измерения угловой скорости за счет изменения уровня параметрической «накачки» прибора, а также способность прибора к определению третьей компоненты угловой скорости, совпадающей по направлению с вектором кинетического момента гироскопа. Построенная имитационная модель позволяет спроектировать датчик абсолютной угловой скорости, способный с необходимой точностью решать задачи инерциальной навигации.

Ключевые слова: математическая модель, гироскоп, микромеханическая система

Цитирование: Боголюбов В.М. Имитационная модель параметрически возбуждаемого модуляционного микромеханического гироскопа / В.М. Боголюбов, Л.У. Бахтиева, О.В. Цыганов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 68-74. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.007.

Введение. Предлагаемая статья является продолжением серии работ [1-4], посвященных разработке методов повышения точности и расширения функциональных возможностей микромеханических гироскопов (ММГ). Широкое использование ММГ в современных приборах ориентации, стабилизации и навигации [5-13] объясняется многими факторами: небольшими габаритами, массой и энергопотреблением, невысокой стоимостью. Однако малая масса однокомпонентного ММГ создает проблему сверхвысокой чувствительности его системы съема колебаний, что ограничивает точность измерения угловой скорости и препятствует использованию прибора в качестве инерциального датчика первичной информации. Кроме того, чувствительность ММГ к неточности изготовления упругого подвеса и отсутствие возможности его доводки приводят к значительному «нулевому смещению», компенсация которого является одной из важных проблем рассматриваемого класса приборов.

Ниже представлены результаты численной реализации математической модели ММГ гибридного типа [5], в которой для устранения «нулевого смещения» использован хорошо зарекомендовавший себя в роторных вибрационных гироскопах принцип модуляции первичной информации в механическом контуре со съемом измерений во вращающейся вместе с валом приводного двигателя системе координат [2]. Кроме того, предусмотрен режим параметрического возбуждения чувствительного элемента путем модуляции динамической жесткости его упругого подвеса. Показано, что такой подход позволяет существенно повысить точность прибора без вмешательства в его механический контур.

1. Модель параметрически возбуждаемого модуляционного ММГ. На рисунке 1 представлена кинематическая схема модуляционного ММГ гибридного типа, где 1 – приводной двигатель (ПД), 2 – вал двигателя (ВД), 3 – чувствительный элемент (ЧЭ), изготовленный по планарной технологии, 4 – датчик угла (ДУ), 5 – упругий подвес (УП), 6 – основание прибора. Отличительной особенностью модуляционного ММГ является измерение информации о движении основания и ее обработка в системе координат, вращающейся вместе с валом ПД. Это отличает его от, например, динамически настраиваемого гироскопа, измеряющего угловые скорости поворота основания относительно системы координат, связанной с корпусом. Кроме того, регистрация углового поворота основания модуляционного ММГ осуществляется не измерением угла этого поворота, а измерением амплитуды и фазы колебаний его ротора. Информация об угловом движении основания содержится в соответствующих параметрах сигнала переменного тока, поэтому медленный уход главной оси прибора («смещение нуля»), вызванный несовершенством его изготовления, не оказывает влияния на точность измерений.

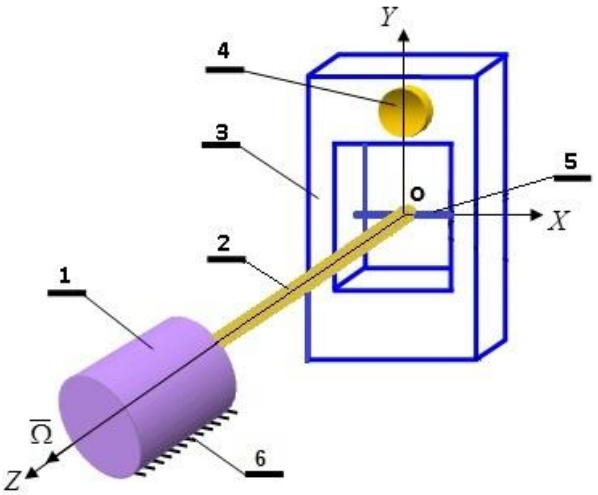


Рис. 1. Кинематическая схема модуляционного ММГ гибридного типа

Параметрическое возбуждение модуляционного ММГ как колебательной системы на упругом подвесе целесообразно осуществлять путем модуляции динамической жесткости УП, являющейся его энергоемким параметром [6]. Модуляция динамической жесткости осуществляется изменением в небольших пределах частоты питающего напряжения вентильного электродвигателя по закону:

$$\Omega_m(t) = \Omega + \Delta\Omega \cos \omega_m t, \tag{1}$$

где Ω – номинальное значение частоты вращения ВД, соответствующее настроенному режиму работы гироскопа, $\Delta\Omega$ – девиация частоты вращения ВД, ω_m – частота модуляции.

Текущее значение фазы колебаний ВД относительно номинального значения определяется выражением

$$\varphi_m(t) = \int \Omega_m\,(t)dt = \Omega t + \mathrm{m} \sin \omega_m t, \tag{2}$$

$\mathrm{m} = \Delta\Omega/\omega_m$– индекс частотной модуляции.

С учетом узкополосности амплитудно-частотной характеристики ММГ и выражения (2) для $m \leq 0.1$ имеют место соотношения [14]:

$$\sin \varphi_m\,(t) = \sin \Omega t + {}^{m}/_{2}\,(\sin(\Omega + \omega_m)t + \sin(\Omega - \omega_m)t), \tag{3}$$
$$\cos \varphi_m\,(t) = \cos \Omega t - {}^{m}/_{2}\,(\cos(\Omega - \omega_m)t - \cos(\Omega + \omega_m)t).$$

Система координат $OX_{об}Y_{об}Z_{об}$ жестко связана с объектом, а ее начало совпадает с его центром масс (рисунок 2). Проекции угловой скорости $\overline{\dot{\Phi}}$ ее вращательного движения относи-

тельно начала координат O обозначим соответственно через $\dot{\Phi}_x, \dot{\Phi}_y, \dot{\Phi}_z$. Система координат $OX_{\text{в}}Y_{\text{в}}Z_{\text{в}}$, связанная с валом ПД, вращается с угловой скоростью Ω вокруг оси $OZ_{\text{об}}$. Система координат $OX_{\text{р}}Y_{\text{р}}Z_{\text{р}}$, связанная с ротором ЧЭ, наряду с вращением вместе с валом, поворачивается вокруг торсионного подвеса УП на угол θ с угловой скоростью $\dot{\theta}$.

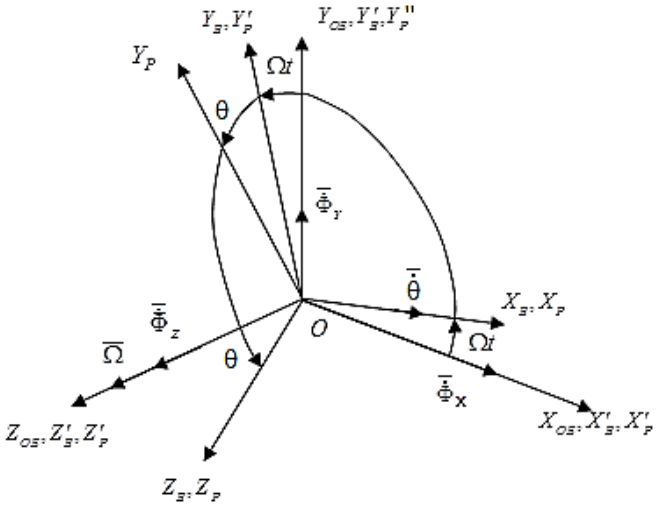


Рис. 2. Системы координат

На основании введенных систем координат и с учетом выражений (1) - (3) определим параметры движения гироскопа. Проекции угловых скоростей движения основания на оси системы $OX_{\text{в}}Y_{\text{в}}Z_{\text{в}}$ после поворота вала на угол Ωt примут вид:

$$\omega'_x = \dot{\Phi}_x(\cos\Omega t - m(\cos(\Omega-\omega_m)t - \cos(\Omega+\omega_m)t)/2) + \dot{\Phi}_y(\sin\Omega t + m(\sin(\Omega+\omega_m)t - \sin(\Omega-\omega_m)t)/2),$$

$$\omega'_y = \dot{\Phi}_y(\cos\Omega t - m(\cos(\Omega-\omega_m)t - \cos(\Omega+\omega_m)t)/2) + \dot{\Phi}_x(\sin\Omega t + m(\sin(\Omega+\omega_m)t - \sin(\Omega-\omega_m)t)/2),$$

$$\omega'_z = \Omega + \dot{\Phi}_z + m\cos\omega_m t.$$

Проекции угловых скоростей на оси системы $OX_{\text{р}}Y_{\text{р}}Z_{\text{р}}$ после поворота на угол θ можно записать в виде:

$$\omega_{px} = \omega'_x\cos\theta - \omega'_z\sin\theta,\ \omega_{py} = \omega'_y + \dot{\theta},\ \omega_{pz} = \omega'_z\cos\theta + \omega'_x\sin\theta.$$

Для вывода дифференциальных уравнений движения гироскопической системы воспользуемся методом Лагранжа [15], выбирая в качестве обобщенной координаты угол поворота $\theta(t)$, определяющий положение ЧЭ, а в качестве обобщенных сил – момент демпфирования и момент упругости торсиона. После линеаризации уравнений с помощью матрицы Якоби получим математическую модель двухстепенного модуляционного параметрически возбуждаемого ММГ в виде:

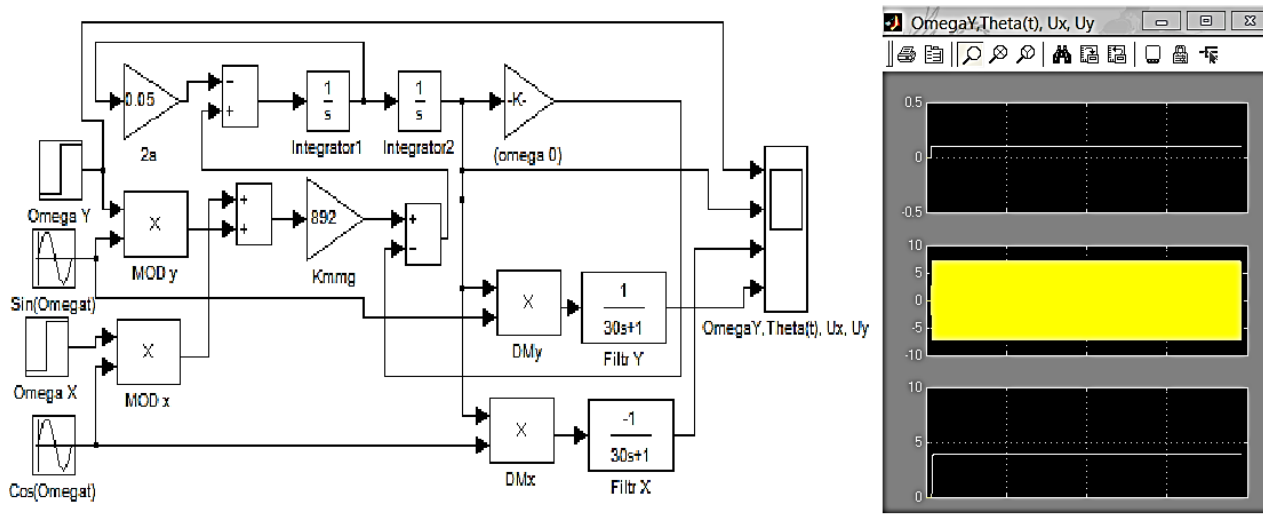
$$\ddot{\theta} + 2a\dot{\theta} + {\omega_0}^2\left(1 + \frac{2k\dot{\Phi}_z}{\omega_0} + 4km\cos(\omega_m t + \varphi_0)\right)\theta = (1+k)\Omega\sqrt{\dot{\Phi}_x^2 + \dot{\Phi}_y^2}\sin(\Omega t + \psi), \quad (4)$$

где $\dot{\Phi}_x, \dot{\Phi}_y, \dot{\Phi}_z$ – проекции угловой скорости движения основания, a – коэффициент затухания колебаний ЧЭ, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k+(C-A)\Omega^2}{B}}$ – частота собственных колебаний ЧЭ, A, B, C – соответственно экваториальные и полярный моменты инерции ЧЭ, $\Omega = \sqrt{\frac{k}{A+B-C}}$ – резонансное значение угловой скорости вращения ЧЭ, $k = \frac{C-A}{B} \approx 1$ – коэффициент центробежно-маятниковой жесткости, m – коэффициент модуляции, ω_m – частота параметрического возбуждения, φ_0 – фазовый угол, $\psi = \text{arctg}(\dot{\Phi}_x/\dot{\Phi}_y)$. Начальные условия для уравнения (4) зададим в виде:

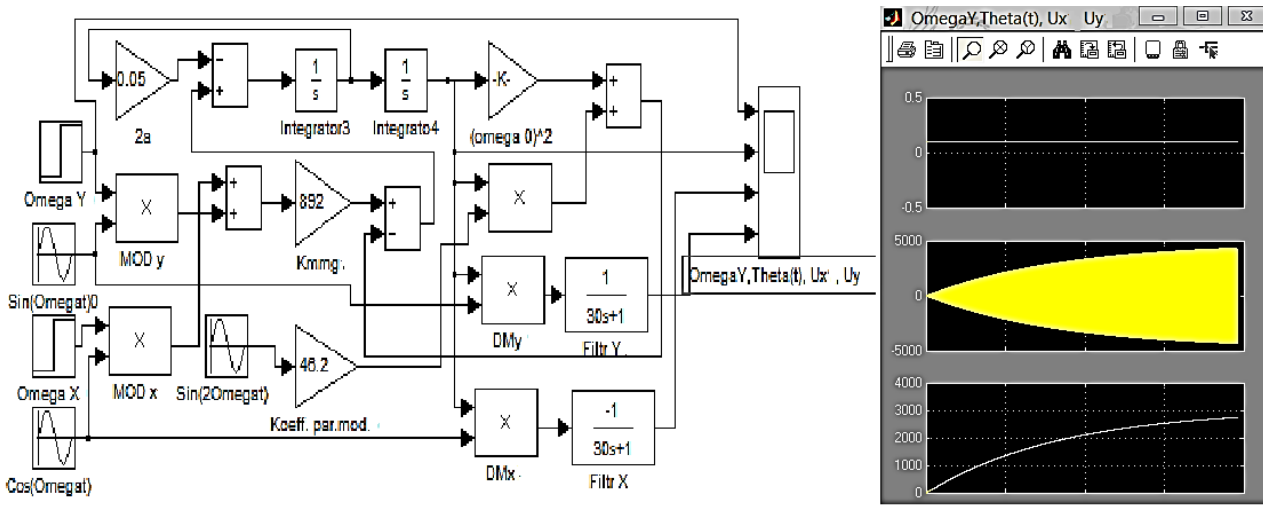
$$\theta(0) = \dot{\theta}(0) = 0. \qquad (5)$$

Особенностью полученной математической модели является наличие периодически изменяющегося энергоемкого позиционного параметра $4km\cos(\omega_m t + \varphi_0))\,\theta$, а также слагаемого $2k\dot{\Phi}_z/\omega_0$, обусловленного проекцией угловой скорости вращения основания $\dot{\Phi}_z$ на ось вращения ЧЭ. Ниже покажем, что указанное обстоятельство позволяет реализовать наиболее благоприятное условие параметрического возбуждения механического контура гироскопа на частоте $\omega_m = 2\Omega$.

2. Численная реализация модели. Задача (4) - (5) решалась в среде высокоуровневого программирования Matlab-Simulink, предоставляющей возможность решать дифференциальные уравнения модели в интерактивном режиме при различных входных параметрах [16]. На рисунке 3 приведены схемы модели и результаты моделирования в отсутствие параметрического возбуждения (3а) и в случае параметрической «накачки» от генератора синусоидального напряжения с частотой, равной удвоенной величине частоты резонансной настройки ММГ (3б).



3а



3б

Рис. 3. Схемы модели и результаты моделирования

Входное воздействие в виде скачка проекций угловых скоростей основания $\dot{\Phi}_x$ и $\dot{\Phi}_y$ (omega X, omega Y) подается на входы модуляторов *MODx*, *MODy*, вторые входы которых подключаются к генераторам, формирующим сдвинутые по фазе на 90^0 синусоидальные сигналы. Разделение по соответствующим измерительным осям реакции на эти воздействия осу-

ществляется демодуляторами *DMx, DMy*, выходные сигналы которых регистрируются осциллографом. Осциллограф отображает входной сигнал угловой скорости по одной из измеряемых компонент (Omega Y), задаваемый генератором Step, реакцию на него в виде модулированного колебания θ, а также выходные сигналы демодуляторов U_x и U_y.

Сравнительная оценка осциллограмм реакции моделируемого ММГ на измеряемую угловую скорость основания показала существенное повышение чувствительности (добротности) прибора (более, чем на два порядка) в случае его параметрического возбуждения по сравнению с традиционным режимом его эксплуатации.

Численные исследования показали, что параметрическое возбуждение ММГ резко увеличивает крутизну фазочастотной характеристики колебательной системы, что позволяет при наличии проекции угловой скорости $\dot{\Phi}_z$ на ось вращения ВД, приводящей к расстройке прибора, определять ее величину и направление по измеренному фазовому сдвигу колебаний ротора относительно резонансного значения [1], причем ее пороговое значение определяется величиной коэффициента параметрической модуляции m.

Заключение. В статье представлена новая имитационная модель двухстепенного ММГ гибридного типа, в которой для устранения «нулевого смещения» использован принцип модуляции первичной информации в механическом контуре и ее съема во вращающейся системе координат.

Сформулированы условия реализации параметрического возбуждения ММГ путем модуляции его угловой скорости вращения (динамической жесткости).

На основании результатов симуляции модели в среде Matlab-Simulink показана возможность существенного повышения точности измерения угловой скорости за счет изменения уровня параметрической «накачки» прибора, а также способность прибора к определению третьей компоненты угловой скорости, совпадающей по направлению с вектором кинетического момента гироскопа.

Отмечено, что реализация рассмотренного нетрадиционного режима работы ММГ возможна без вмешательства в механический контур прибора.

Построенная имитационная модель позволяет спроектировать датчик абсолютной угловой скорости, способный с необходимой точностью решать задачи инерциальной навигации.

Список источников

1. Bakhtieva L., Bogolyubov V. Parametrically excited microelectromechanical system in the problems of orientation of moving objects. Journal of Physics: Conference Series, 2019, no. 1158, pp. 1-7, DOI:10.1088/1742-6596/1158/2/022018.
2. Bakhtieva L., Bogolyubov V. Modulation of damping in the rotor vibratory gyroscopes. Russian Aeronautics, 2019, no. 61, pp. 599-604, DOI: 10.3103/S1068799818040141.
3. Bogolyubov V., Bakhtieva L. Astatic gyrocompass based on a hybrid micromechanical gyroscope. IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS), 2021, pp. 1-5, DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9580982.
4. Bakhtieva L., Bogolyubov V., Tumakov M. Simulation of a multifunctional micromechanical gyroscope. Program Systems: Theory and Applications, 2022, vol. 13, no. 3(54), pp. 17-27, DOI: 10.25209/2079-3316-2022-13-3-17-27.
5. Коновалов С.Ф. Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры / С.Ф. Коновалов, Ю.А. Пономарев, Д.В. Майоров [и др.] // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – № 10. – С. 1-23.
6. Матвеев В.В. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС датчиках / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 2017. – № 24. – С. 264-266.
7. Лукьянов Д.П. Прикладная теория гироскопов: учебник для вузов / Д.П. Лукьянов, В.Я. Распопов, Ю.В. Филатов // Издательство: Электроприбор, 2015. – 315 С.
8. Liang Q., Litvinenko Yu.A., Stepanov O.A. Method of processing the measurements from two units of micromechanical gyroscopes for solving the orientation problem. Gyroscopy and Navigation, 2018, no. 9, pp. 233-242.

9. Filatov Y.V., Boronakhin A.M., Dao V.B. Studying the static errors of MEMS accelerometer triad in quasi-harmonic oscillation mode. Gyroscopy and Navigation, 2017, no. 8, pp. 121-128.
10. Lysenko I.E., Sevostyanov D.Y., Kidyaev N.F., Kovalev A.V. Research of dynamic characteristics of a three-axis micromechanical gyroscope-accelerometer. Journal of Physics: Conference Series, 2021, no. 2086, pp. 1-4.
11. Shen Li, Lixiang Chen Research on the reliability test of a micromechanical gyroscope with full symmetry structure. Journal of Physics: Conference Series, 2020, no. 1650, pp. 1-5.
12. Yan Li, Qiulin Tan, JingWen, Linke Song, Fuling Yang. Study of nonlinear vibration of resonant gyroscope based on uncertainty analysis method. Microelectronic engineering, 2022, no. 263, 111845.
13. Ninalalov I., Merkuryev I., Kubryak O., Astakhov S. Methods for improving the accuracy of an autonomous orientation and navigation system based on micromechanical gyroscopes and optoelectronic sensors. 29th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems (ICINS), IEEE, 2022, pp. 1-2.
14. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1964. – 772 С.
15. Канаков О.И. Методы Лагранжа и Гамильтона в исследовании колебательных систем: Учебно-методическое пособие / О.И. Канаков, М.И. Мотова. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. – 39 с.
16. Герасимов А.И. Моделирование в среде MATLAB-Simulink: метод. указания к лаб. работам / А.И. Герасимов, В.В. Регеда, О.Н. Регеда. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. – 104 с.

Боголюбов Владимир Михайлович. *Доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических систем Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). Основное направление исследований: радиоэлектроника, системы управления, инерциальная навигация. AuthorID: 962931, bvm200@yandex.ru, Казань, Кремлевская, 2а-56.*

Бахтиева Ляля Узбековна. *Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта Казанского федерального университета. Основное направление исследований: математическое моделирование физических процессов. AuthorID: 16749, lbakhtie@yandex.ru, Казань, Кремлевская, 2а-56.*

Цыганов Олег Владимирович. *Соискатель ученой степени кандидата технических наук, АО ГосМКБ «Вымпел». Основное направление исследований: радиоэлектроника, системы управления, инерциальная навигация. modelistrocky@mail.ru.*

UDC 004.942
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.007

Simulation model of a parametrically excited modulation micromechanical gyroscope

Vladimir M. Bogolyubov, Lyalya U. Bakhtieva, Oleg V. Tsyganov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNITU-KAI), Russia, Kazan, *bvm200@yandex.ru*

Abstract. A mathematical model of a micromechanical gyroscope (MMG) of a hybrid type is constructed, in which, in order to eliminate the "zero displacement", the principle of modulation of primary information in a mechanical circuit and its removal in a rotating coordinate system, well-established in rotary vibrating gyroscopes, is used. In addition, a mode of parametric excitation of the sensitive element has provided, which allows expanding the measuring capabilities of the device without interfering with its mechanical circuit and increasing the accuracy of the MMG. The simulation of the model has carried out in the Matlab-Simulink environment, which makes it possible to solve the differential equations of the model in an interactive mode with various input parameters. Based on the results obtained, the conditions for the implementation of parametric excitation of the MMG by modulating its angular velocity of rotation (dynamic rigidity) have formulated. The possibility of a significant increase in the accuracy of measuring the angular velocity by changing the level of parametric "pumping" of the device, as well as the ability of the device to determine the third component of the angular velocity, which coincides in direction with the gyroscope angular momentum vector, has shown. The constructed simulation model makes it possible to design an absolute angular velocity sensor capable of solving inertial navigation problems with the required accuracy.

Keywords: mathematical model, gyroscope, micromechanical system

References

1. Bakhtieva L., Bogolyubov V. Parametrically excited microelectromechanical system in the problems of orientation of moving objects. Journal of Physics: Conference Series, 2019, no. 1158, pp. 1-7, DOI:10.1088/1742-6596/1158/2/022018.
2. Bakhtieva L., Bogolyubov V. Modulation of damping in the rotor vibratory gyroscopes. Russian Aeronautics, 2019, no. 61, pp. 599-604, DOI: 10.3103/S1068799818040141.
3. Bogolyubov V., Bakhtieva L. Astatic gyrocompass based on a hybrid micromechanical gyroscope. IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS), 2021, pp. 1-5, DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9580982.
4. Bakhtieva L., Bogolyubov V., Tumakov M. Simulation of a multifunctional micromechanical gyroscope. Program Systems: Theory and Applications, 2022, vol. 13, no. 3(54), pp. 17-27, DOI: 10.25209/2079-3316-2022-13-3-17-27.
5. Konovalov S., Ponomarev Ju., Majorov D. Gibridnie microelectromechanicheskie giroskopi i akselerometri [Hybrid microelectromechanical gyroscopes and accelerometers]. Nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Baumana [Scientific Publ. of Moscow State Technical University N.E. Bauman], 2011, no. 10, pp. 1-23.
6. Matveev V., Raspopov V. Pribori i sistemi orientcii, stabilizacii I navigacii na MEMS datcikah [Instruments and systems for orientation, stabilization and navigation based on MEMS sensors]. XXIV Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam [XXIV St. Petersburg international conference on integrated navigation systems], 2017, no. 24, pp. 264-266.
7. Luk'yanov D.P., Raspopov V.YA., Filatov YU.V. Prikladnaya teoriya giroskopov: uchebnik dlya vuzov [Applied theory of gyroscopes: a textbook for universities]. Izdatel'stvo: Elektropribor [Publisher: Elektropribor], 2015, 315 p.
8. Liang Q., Litvinenko Yu. A., Stepanov O.A. Method of processing the measurements from two units of micromechanical gyroscopes for solving the orientation problem. Gyroscopy and Navigation, 2018, no. 9, pp. 233-242.
9. Filatov Y.V., Boronakhin A.M., Dao V.B. Studying the static errors of MEMS accelerometer triad in quasi-harmonic oscillation mode. Gyroscopy and Navigation, 2017, no. 8, pp. 121-128.
10. Lysenko I.E., Sevostyanov D.Y., Kidyaev N.F., Kovalev A.V. Research of dynamic characteristics of a three-axis micromechanical gyroscope-accelerometer. Journal of Physics: Conference Series, 2021, no. 2086, pp. 1-4.
11. Shen Li, Lixiang Chen Research on the reliability test of a micromechanical gyroscope with full symmetry structure. Journal of Physics: Conference Series, 2020, no. 1650, pp. 1-5.
12. Yan Li, Qiulin Tan, Jing Wen, Linke Song, Fuling Yang. Study of nonlinear vibration of resonant gyroscope based on uncertainty analysis method. Microelectronic engineering, 2022, no. 263, 111845.
13. Ninalalov I., Merkuryev I., Kubryak O., Astakhov S. Methods for improving the accuracy of an autonomous orientation and navigation system based on micromechanical gyroscopes and optoelectronic sensors. 29th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems (ICINS), IEEE, 2022, pp. 1-2.
14. Ango A. Matematika dlya elektro-i radioinzhenerov [Mathematics for electrical and radio engineers]. M.: Nauka [M.: Scince], 1964, 772 p.
15. Kanakov O.I., Motova M.I. Metody Lagranzha i Gamil'tona v issledovanii kolebatel'nykh sistem: Uchebno-metodicheskoye posobiye [Methods of Lagrange and Hamilton in the study of oscillatory systems: Educational and methodical manual]. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet [N. Novgorod: Nizhny Novgorod State University], 2016, 39 p.
16. Gerasimov A.I., Regeda V.V., Regeda O.N. Modelirovaniye v srede MATLAB-Simulink: metod. ukazaniya k laboratornym rabotam [Modeling in the MATLAB-Simulink environment: method. instructions for laboratory work]. Penza: Izd-vo PGU [Penza: PSU Publ.], 2017, 104 p.

Bogolyubov Vladimir Mikhailovich. *Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering Systems of the Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev (KNRTU-KAI). Main area of research: radio electronics, control systems, inertial navigation. AuthorID: 962931, bvm200@yandex.ru, Kazan, Kremlin, 2a-56.*

Bakhtieva Lyalya Uzbekovna. *Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Artificial Intelligence of Kazan Federal University, position. The main direction of research: mathematical modeling of physical processes. AuthorID: 16749, lbakhtie@yandex.ru, Kazan, Kremlin, 2a-56.*

Tsyganov Oleg Vladimirovich. *Applicant for the degree of candidate of technical sciences, JSC GosMKB Vympel. Main area of research: radio electronics, control systems, inertial navigation. modelistrocky@mail.ru.*

Статья поступила в редакцию 17.04.2023; одобрена после рецензирования 09.06.2023; принята к публикации 16.06.2023.

The article was submitted 04/17/2023; approved after reviewing 06/09/2023; accepted for publication 06/16/2023.

УДК 519.6
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.008

О применимости математической модели Нобла к исследованию потенциала действия клеток миокарда

Нгуен Тхи Тху, Бахтиева Ляля Узбековна
Казанский федеральный университет, Россия, Казань, *lbakhtie@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты компьютерной реализации базовой модели потенциала действия нервных волокон Ходжкина-Хаксли и предложенной Ноблом модифицированной модели электрической активности клеток сердца (волокон Пуркинье). Для решения дифференциальных уравнений моделей в среде высокоуровневого программирования Matlab разработаны пользовательские интерфейсы, позволяющие работать с моделями в интерактивном режиме. Симуляция моделей проводилась для различных значений параметров. Анализ полученных результатов и их сравнение с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других авторов подтвердили вывод о том, что модель Нобла (в отличие от модели Ходжкина-Хаксли) достаточно адекватно описывает электрические процессы, происходящие в клетках миокарда, однако для использования этой модели в практических целях необходимо ее дополнить некоторыми параметрами, учитывающими, например, влияние ионов кальция. Авторами настоящей статьи предложена модификация модели Нобла, включающая внешний стимулирующий ток, проведены численные эксперименты. Приведены графические результаты, сделаны практически важные выводы.

Ключевые слова: математическая модель, сердечная деятельность, потенциал действия

Цитирование: Нгуен Т.Т. О применимости математической модели Нобла к исследованию потенциала действия клеток миокарда / Т.Т. Нгуен, Л.У. Бахтиева // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 75-82. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.008.

Введение. Большинство современных математических моделей сердечной деятельности [2-18] основаны на базовой модели Ходжкина-Хаксли [1], дифференциальные уравнения которой определяют потенциал действия аксона кальмара в зависимости от ионных токов, проходящих через клеточную мембрану. В 1962 году Денис Нобл представил одну из первых математических моделей электрической активности сердца [2], в которой уравнения оригинальной модели [1] были адаптированы к клеткам сердечной системы, а именно, к волокнам Пуркинье. Однако, как указал сам автор [2] и показали дальнейшие исследования, модель [2] нуждалась в доработке. В работе [3] сделана попытка учесть ионные токи кальция, но при этом были отброшены некоторые другие параметры, и модель также оказалась несовершенной. В более поздних работах Нобла [4-6] и некоторых других авторов [7-16] наблюдается тенденция к существенному увеличению количества параметров модели, что, на наш взгляд, не всегда оправдано.

В предлагаемой статье представлены результаты численной реализации моделей [1], [2] и проведен анализ полученных графических данных. Показано, что модель [2] (в отличие от модели [1]) достаточно адекватно описывает электрические процессы, происходящие в клетках миокарда. Предложена модификация модели [2], включающая один дополнительный параметр, а именно, внешний стимулирующий ток. Проведены численные эксперименты, сформулированы выводы и некоторые практические рекомендации.

1. Симуляция модели Ходжкина-Хаксли. Модель [1] описывает потенциал действия аксона (нейрита) гигантского кальмара. В рамках этой модели мембрана клетки рассматривается как плоский конденсатор, эквивалентная электрическая схема которого [1] приведена на рисунке 1. Емкостной ток через клеточную мембрану описан как сумма изменений мембранного напряжения V_m и ионных токов, обусловленных, в первую очередь, натриевыми (Na), калиевыми (K) и другими токами ($Leak$), в основном, хлорид-ионами. Ионные токи определяются их проводимостями (g) и равновесными потенциалами (E), для которых справедлива формула Нернста

$$E_X = \frac{RT}{zF} ln\left(\frac{[X]_o}{[X]_i}\right),$$

R –газовая постоянная, T – абсолютная температура, F – число Фарадея, $[X]_o, [X]_i$ – наружная и внутренняя концентрация ионов, $z = 1$ для Na^+ и K^+. Значения ионных токов зависят также от того, как открываются и закрываются ворота канала (воротные переменные m, n, h). Таким образом, дифференциальные уравнения модели [1] являются результатом нелинейных взаимодействий между мембранным напряжением V_m и переменными строби-рования m, h, n для ионов Na^+, K^+.

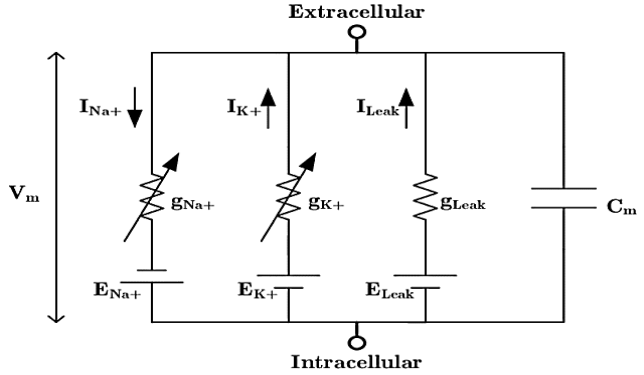


Рис. 1. Электрическая схема клеточной мембраны Ходжкина-Хаксли

Основное уравнение модели [1] имеет вид:

$$C_m \frac{dV_m}{dt} = -G_{Na} m^3 h(V_m - V_{Na}) - G_k n^4 (V_m - V_{Na}) - G_L(V_m - V_L) + I_{st}, \quad (1)$$

переменные n, m, h связаны с напряжением V_m уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \alpha_n(V_m)(1-n) - \beta_n(V_m)n, \\ \frac{dm}{dt} &= \alpha_m(V_m)(1-m) - \beta_m(V_m)m, \\ \frac{dh}{dt} &= \alpha_h(V_m)(1-h) - \beta_h(V_m)h, \end{aligned} \quad (2)$$

где m и h – ворота активации и инактивации соответственно, n – ворота активации. Параметры системы (2) определяются зависимостями:

$$\alpha_n(V_m) = 0.01\frac{10-V_m}{exp\left(\frac{10-V_m}{10}\right)-1}, \quad \beta_n(V_m) = 0.125exp\left(\frac{-V_m}{80}\right),$$

$$\alpha_m(V_m) = 0.1\frac{25-V_m}{exp\left(\frac{25-V_m}{10}\right)-1}, \quad \beta_m(V_m) = 4exp\left(\frac{-V_m}{18}\right),$$

$$\alpha_h(V_m) = 0.07exp\left(\frac{-V_m}{20}\right), \quad \beta_h(V_m) = \frac{1}{exp\left(\frac{30-V_m}{10}\right)+1},$$

где C_m – мембранная ёмкость, I_{st} – стимулирующий (внешний) ток, t – время, G_K –максимальная проводимость калия в клетке, возникающая при $n = 1$, G_{Na} –максимальная проводимость натрия в клетке, возникающая при $m = 1$ и $h = 1$, $V_{Na} = E_{Na} - E_r$, $V_K = E_K - E_r$, $V_L = E_L - E_r$, E_r – значение потенциала покоя (для большинства нейритов это величина порядка от – 60 до $-70\ mV$), E_{Na}, E_K, E_L – равновесные потенциалы для ионов натрия, калия и токов утечки. Коэффициенты модели получены на основании экспериментальных данных.

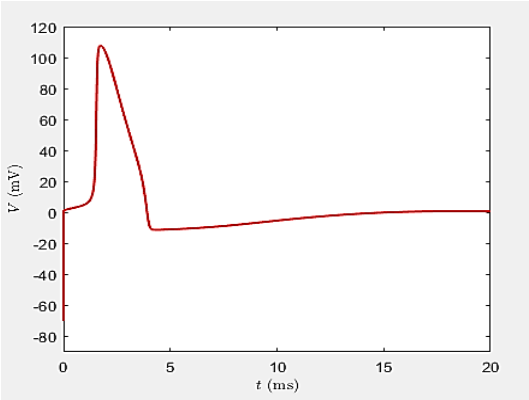
Для решения системы уравнений (1) – (2) в среде высокоуровневого программирования Matlab был разработан пользовательский интерфейс, позволяющий работать с моделью в интерактивном режиме. Симуляция модели проводилась для различных значений параметров. На рисунке 2а) представлен результат симуляции при значениях, которые соответствуют нормальному функционированию нейрита (таблице 1).

Здесь потенциал покоя $E_r = -70\,mV$, $E_{Na} = 55\,mV$, $E_K = 72\,mV$, $E_L = -49{,}387\,mV$, $C_m = 1\,\mu F/cm^2$. Результат соответствует данным работы [1] при тех же параметрах.

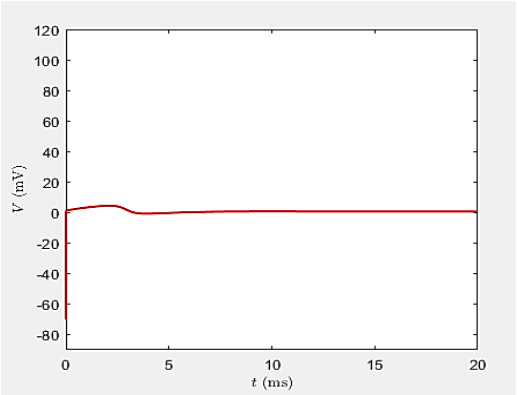
Таблица 1. Значения параметров симуляции [1]

V_{ions}	$V_{Na} = 115$	$V_K = -12$	$V_L = 10{,}6$
g_{ions}	$g_{Na} = 120$	$g_K = 36$	$g_L = 0.3$

Рисунок 2b) получен для потенциала покоя $E_r = -90\,mV$, который характерен для клеток сердца. Как видим, график потенциала действия здесь не соответствует реальному процессу.



2a)



2b)

Рис. 2. Симулированный потенциал действия по модели Ходжкина-Хаксли

Анализ полученных результатов показывает, что модель [1] хорошо описывает процессы, происходящие в нервных клетках, однако для клеток сердца она оказывается неприемлемой. В этом случае более адекватной оказывается модель [2].

2. Симуляция модели Нобла. В работе [2] клетка рассматривается как аналог электрической цепи, где мембрана представлена в виде ёмкости, а каналы – в виде электрических проводимостей (рисунок 3). Эквивалентная электрическая схема такой модели приведена на рисунке 4.

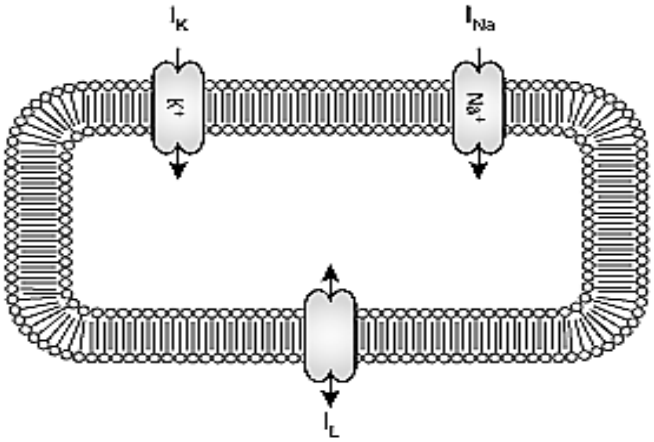


Рис. 3. Схематическая диаграмма клетки в модели Нобла

Существенное качественное отличие схемы [2] от схемы [1] заключается в предположении, что калиевый ток протекает через два нелинейных сопротивления. Параметр I_{K1} представляет входящий ток, а I_{K2} – исходящий ток. Еще одно (спорное, на наш взгляд) предположение Нобла – отсутствие в модели внешнего стимулирующего тока I_{st} .

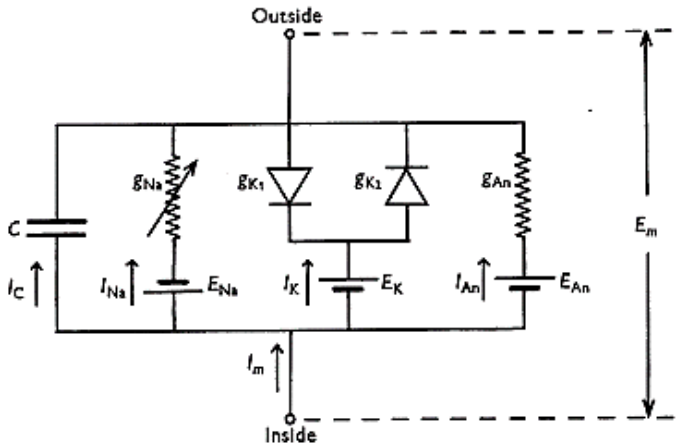


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема мембраны из волокна Пуркинье

Общий подход в [2] основан на численной реконструкции потенциала действия волокон Пуркинье с использованием формализма типа Ходжкина-Хаксли. Скорость изменения мембранного потенциала V_m определяется уравнением

$$C_m \frac{dV_m}{dt} = -(I_{Na} + I_K + I_L), \tag{3}$$

где мембранный ток натрия определяется формулой

$$I_{Na} = I_{Na}(V_m, t) = (400m^3h + 0.14)(V_m - E_{Na}). \tag{4}$$

Все коэффициенты модели получены на основе большого количества экспериментов, проведенных с волокнами Пуркинье. В частности, коэффициент 400 в формуле (4) и слагаемое 0.14 приводят к значительному увеличению натриевых потоков по сравнению с моделью для нервных волокон [1], так как потенциал покоя клеток сердца (начальное условие для уравнения (3)) значительно ниже (–90 mV), чем потенциал покоя нервных волокон ((–60 mV), и для возникновения потенциала действия требуется гораздо больший заряд ионов натрия.

Мембранные токи калия определяются выражениями:

$$I_{K1} = I_{K1}(V_m) = \left(1.2e^{-\frac{V_m+90}{50}} + 0.015e^{\frac{V_m+90}{60}}\right)(V_m - E_K),$$

$$I_{K2} = I_{K2}(V_m, t) = 1.2n^4(V_m - E_K), \quad I_K = I_{K1} + I_{K2}, \tag{5}$$

а ток утечки:

$$I_L = g_L(V_m - E_L) \tag{6}$$

Воротные переменные m, h, n по прежнему связаны с напряжением V_m уравнениями системы (2), но параметры системы определяются зависимостями:

$$\alpha_m = \frac{-0.1(V_m+48)}{e^{-\frac{V_m+48}{15}}-1}, \quad \beta_m = \frac{0.12(V_m+8)}{e^{\frac{V_m+8}{5}}-1},$$

$$\alpha_h = 0.17e^{-\frac{V_m+90}{20}}, \quad \beta_h = \frac{1}{e^{-\frac{V_m+42}{10}}+1}, \tag{7}$$

$$\alpha_n = \frac{-0.0001(V_m+50)}{e^{-\frac{V_m+50}{10}}-1}, \quad \beta_n = 0.002e^{-\frac{V_m+90}{80}}.$$

На рисунке 5 представлены результаты симуляции при значениях параметров, приведенных в [2] для $V_r = -90\ mV$, $C_m = 12\ \ \mu F/cm^2$ (таблица 2). Примем эти значения за эталонные для нормального функционирования сердечных волокон Пуркинье (рисунок 5а). Как видно из приведенного рисунка, удобный графический интерфейс позволяет без труда экспериментировать с параметрами модели и быстро получать результат (график потенциала действия в зависимости от времени.

Таблица 2. Значения параметров симуляции [2]

V_{ions}	$E_{Na} = 35$	$E_K = -100$	$E_L = -60$
g_{ions}	$g_{Na} = 4$	$g_K = 36$	$g_L = 0.3$

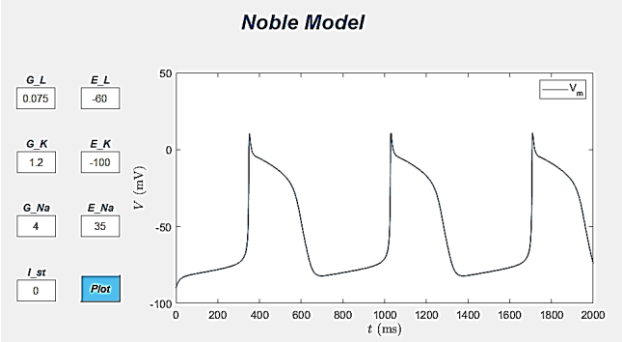
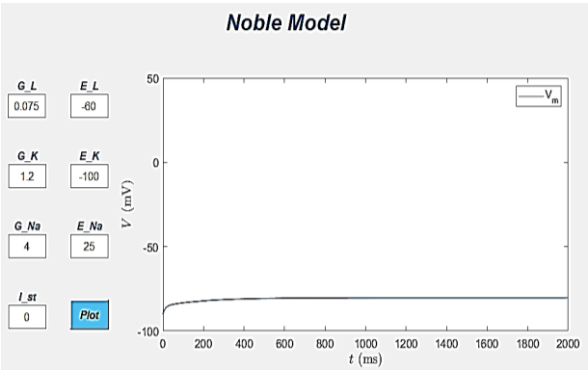
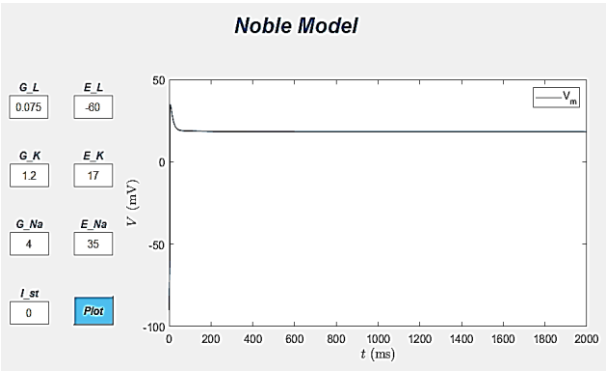


Рис. 5. Симулированный потенциал действия по модели Нобла

На рисунках 6a) и 6b) приведены результаты экспериментов с моделью: в первом случае (6a) концентрация натрия внутри клетки превышает концентрацию натрия вне клетки и потенциал действия не возникает, во втором случае (6b) концентрации калия вне клетки выше, чем внутри клетки, потенциал действия приходит к стационарному положительному значению, не возвращаясь к потенциалу покоя.



6a)

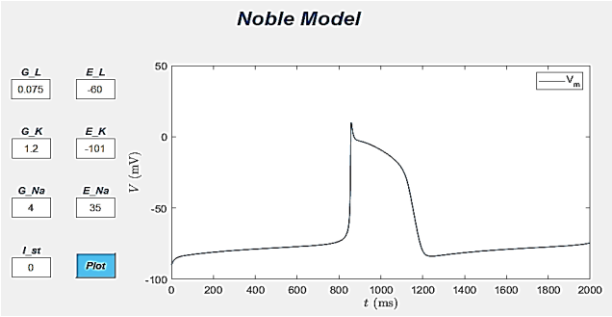


6b)

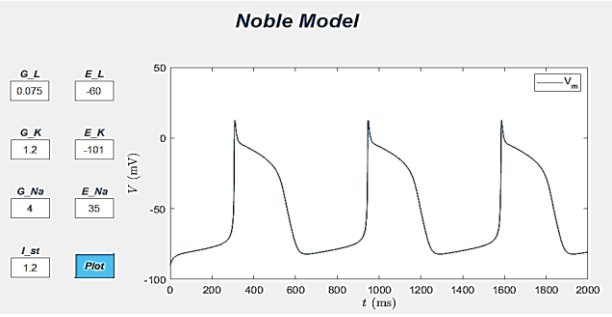
Рис. 6. Эксперименты с моделью Нобла

3. Симуляция модели Нобла с дополнительным параметром. На рисунке 7 представлены результаты двух компьютерных экспериментов, показывающих влияние внешнего стимулирующего тока на потенциал действия клеток сердца. При этом в уравнение (3) модели [2] добавлено слагаемое I_{st} , отброшенное Ноблом из уравнения (1) модели Ходжкина-Хаксли, поскольку, по его мнению, «клетки сердца не нуждаются в электрической стимуляции». Анализ полученных результатов показал, что изменение величины внешнего тока существенно влияет на потенциал действия сердечных клеток. В первом случае (рисунок 7a) концентрация калия внутри клетки выше нормы, что привело к увеличению периода (уменьшению частоты) сердцебиений. Во втором случае (рисунок 7b) в модель добавили стимулирующий ток, что привело к возвращению сердцебиения в норму, причем величина $I_{st} = 1.2\ \mu A/cm^2$ подбиралась так, чтобы рисунок 7b) совпал с эталонным рисунком 5.

Таким образом, включение в модель Нобла дополнительного параметра позволяет регулировать значение потенциала действия сердечных клеток, а значит и процесс сердцебиения (например, с помощью кардиостимулятора), причем модель позволяет оценить величину необходимого стимулирующего тока.



7a)



7b)

Рис. 7. Исследование влияния стимулирующего тока

Заключение. В статье представлены результаты компьютерной реализации математических моделей потенциала действия [1] и [2]. Показано, что уравнения, сформулированные в модели [1] для описания электрической активности нерва кальмара, не подходят для исследования потенциала действия клеток сердца. На основании компьютерных экспериментов сделан вывод: либо натриевые каналы в сердце количественно отличаются от таковых в нейронах, либо должны существовать другие каналы, несущие ток внутрь. Оба предположения оказались верны, что было показано Ноблом при описании пейсмекерных потенциалов волокон Пуркинье сердца.

На основе модели [2] авторы настоящей статьи разработали эффективный инструмент для анализа влияния различных факторов на интенсивность потенциала действия кардиомиоцитов. Проведенные компьютерные эксперименты показали, что модель Нобла тоже нуждается в доработке. Основной ее недостаток заключается в том, что она включает только один внутренний ток, управляемый напряжением. Кальциевые токи еще не были обнаружены, и единственный способ заставить модель работать – это значительно расширить диапазон напряжений натриевого тока за счет уменьшения зависимости процесса активации натрия от напряжения. По сути, натриевый ток служит функции как натриевых, так и кальциевых каналов. Кроме того, модель Нобла не позволяет оценить влияние внешних токов на потенциал действия клеток сердца.

Для исследования характера зависимости потенциала действия от стимулирующего тока в модель Нобла авторами статьи был введен дополнительный параметр. Оказалось, что новая модель может не только адекватно описывать процессы, происходящие в кардиомиоците, но и давать количественную оценку стимулирующего тока, необходимого для нормализации потенциала действия.

Так как характер сокращения кардиомиоцита напрямую связан с изменением потенциала действия, полученные результаты позволяют судить о качественной картине изменения сердцебиения человека в зависимости от значений параметров модели. Это может оказаться полезным при исследовании аномалий сердечной деятельности и назначении медицинских рекомендаций. Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися данными других ученых [17].

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета ("ПРИОРИТЕТ-2030").

Список источников

1. Hodgkin A., Huxley A. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. Journal of Physiology, 1952, vol. 117, no. 4, pp. 500-544.
2. Noble D. A modification of the Hodgkin-Huxley equation applicable to Purkinje fibers action and pace-maker potentials. Journal of Physiology, 1962, vol. 160, pp. 317-352.

3. Beeler G., Reuter H. Reconstruction of the action potential of ventricular myocardial fibers. Journal of Physiology, 1977, vol. 268, pp. 177-210.
4. Noble D. From the Hodgkin–Huxley axon to the virtual heart. Journal of Physiology, 2007, 580.1, pp. 15-22.
5. Noble D. Computational models of the heart and their use in assessing the actions of drugs. Journal of Pharmacological Sciences, 2008, vol. 107, pp. 107-117.
6. Earm Y.E., Noble D. A model of the Single Atrial cell: relation between calcium current and calcium release. Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological sciences, 1990, 240(1297), pp. 83-96, DOI: 10.1098/rspb.1990.0028.
7. Vassalle M. Analysis of cardiac pacemaker potential using a 'voltage clamp' technique. American Journal of Physiology, 1966, vol. 210, pp. 1335-1341.
8. Vassalle M. The relationship among cardiac pacemakers. Overdrive suppression. Circulation research, 1977, vol. 41, pp. 269-277.
9. Mihalef V., Passerini T., Mansi T. Multi-scale models of the heart for patient-specific simulations. Artificial intelligence for computational modeling of the heart, 2020, pp. 3-42, DOI: 10.1016/B978-0-12-817594-1.00011-5.
10. Rama R.R., Skatulla S. Towards the real-time modeling of the heart. Advances in biomechanics and tissue regeneration, 2019, pp. 139-180.
11. Walmsley J., Mirams G., Bahoshy M., Bollensdorff C., Rodriguez B., Burrage K. Phenomenological modeling of cell-to-cell and beat-to-beat variability in isolated Guinea Pig ventricular myocytes. 2010 Annual International Conference of the IEEE engineering in medicine and biology, Buenos Aires, Argentina, 2010, pp. 1457-1460, DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5626858.
12. Western D., Taggart P., Hanson B. Real-time feedback of dynamic cardiac repolarization properties. 2010 Annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology, Buenos Aires, Argentina, 2010, pp. 114-117, DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5626087.
13. Wilders R. Computer modelling of the sinoatrial node. Med Bio Eng Comput, 2007, no. 45, pp. 189-207, DOI: 10.1007/s11517-006-0127-0.
14. Bondarenko V.E., Szigeti G.P., Bett G.C., Kim S.J., Rasmusson R.L. Computer model of action potential of mouse ventricular myocytes. American Journal of Physiology, 2004, DOI: 10.1152/ajpheart.00185.2003.
15. Pan Li, Glenn T. Lines, Maleckar M., Aslak Tveito. Mathematical models of cardiac pacemaking function. Front. Phys., Sec. Computational Physics, 2013, vol. 1, DOI: 10.3389/fphy.2013.00020.
16. Nickerson1 D.P., Hunter P.J. The Noble cardiac ventricular electrophysiology models in CellML. Progress in Biophysics and Molecular Biology, 2006, no. 90 (1-3), pp. 346-359, DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2005.05.007.
17. Nickerson D.P., Hunter P.J. The Noble cardiac ventricular electrophysiology models in CellML. Progress in biophysics and molecular biology, 90 (2006), pp. 346-359.
18. Nguyen T.T., Bakhtieva L.U. Numerical study of the Hodgkin-Huxley model. Proceedings of the international conference, Beijing, China, 2022, DOI: 10.34660/INF.2022.45.79.294.

Нгуен Тхи Тху. *Студентка магистратуры Казанского федерального университета. Основное направление исследований – математическое моделирование сердечной деятельности, shilnguyen1412@mail.ru.*

Бахтиева Ляля Узбековна. *Кандидат физико-математических наук. Доцент кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта Казанского федерального университета. Основное направление исследований – математическое моделирование физических процессов. AuthorID: 16749, lbakhtie@yandex.ru.*

UDC 519.6
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.008

On the applicability of the Noble mathematical model to the study of the action potential of myocardial cells

Thi Thu Nguen, Lyalya U. Bakhtieva

Kazan Federal University, Russia, Kazan, *lbakhtie@yandex.ru*

Abstract. The results of computer implementation of the basic model of the action potential of Hodgkin-Huxley nerve fibers and the modified model of the electrical activity of heart cells (Purkinje fibers) proposed by Noble are presented. To solve the differential equations of models in the Matlab high-level programming environment, user interfaces have been developed that allow you to work with models in an interactive mode. Simulation of the models has carried out for different values of the parameters. The analysis of the obtained results and their comparison with the available experimental and theoretical data of other authors confirmed the conclusion that the Noble model (unlike the Hodgkin-Huxley model) adequately describes the electrical processes occurring in

myocardial cells. However, to use this model for practical purposes, it is necessary to supplement it with some parameters that take into account, for example, the effect of calcium ions. The authors of this article have proposed a modification of the Noble model, including an external stimulating current, and carried out numerical experiments. Graphical results are presented, practically important conclusions are made.

Keywords: mathematical model, cardiac activity, action potential

Acknowledgements: This work has supported by the Strategic Academic Leadership Program of the Kazan (Volga Region) Federal University ("PRIORITET-2030").

References

1. Hodgkin A., Huxley A. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. Journal of Physiology, 1952, vol. 117, no. 4, pp. 500-544.
2. Noble D.A modification of the Hodgkin-Huxley equation applicable to Purkinje fibers action and pace-maker potentials. Journal of Physiology, 1962, vol. 160, pp. 317-352.
3. Beeler G., Reuter H. Reconstruction of the action potential of ventricular myocardial fibers. Journal of Physiology, 1977, vol. 268, pp. 177-210.
4. Noble D. From the Hodgkin–Huxley axon to the virtual heart. Journal of Physiology, 2007, 580.1, pp. 15-22.
5. Noble D. Computational models of the heart and their use in assessing the actions of drugs. Journal of Pharmacological Sciences, 2008, vol. 107, pp. 107-117.
6. Earm Y.E., Noble D. A model of the Single Atrial cell: relation between calcium current and calcium release. Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological sciences, 1990, 240(1297), pp. 83-96, DOI: 10.1098/rspb.1990.0028.
7. Vassalle M. Analysis of cardiac pacemaker potential using a ‘voltage clamp’ technique. American Journal of Physiology, 1966, vol. 210, pp. 1335-1341.
8. Vassalle M. The relationship among cardiac pacemakers. Overdrive suppression. Circulation research, 1977, vol. 41, pp. 269-277.
9. Mihalef V., Passerini T., Mansi T. Multi-scale models of the heart for patient-specific simulations. Artificial intelligence for computational modeling of the heart, 2020, pp. 3-42, DOI: 10.1016/B978-0-12-817594-1.00011-5.
10. Rama R.R., Skatulla S. Towards the real-time modeling of the heart. Advances in biomechanics and tissue regeneration, 2019, pp. 139-180.
11. Walmsley J., Mirams G., Bahoshy M., Bollensdorff C., Rodriguez B., Burrage K. Phenomenological modeling of cell-to-cell and beat-to-beat variability in isolated Guinea Pig ventricular myocytes. 2010 Annual International Conference of the IEEE engineering in medicine and biology, Buenos Aires, Argentina, 2010, pp. 1457-1460, DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5626858.
12. Western D., Taggart P., Hanson B. Real-time feedback of dynamic cardiac repolarization properties. 2010 Annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology, Buenos Aires, Argentina, 2010, pp. 114-117, DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5626087.
13. Wilders R. Computer modelling of the sinoatrial node. Med Bio Eng Comput, 2007, no. 45, pp. 189-207, DOI: 10.1007/s11517-006-0127-0.
14. Bondarenko V.E., Szigeti G.P., Bett G.C., Kim S.J., Rasmusson R.L. Computer model of action potential of mouse ventricular myocytes. American Journal of Physiology, 2004, DOI: 10.1152/ajpheart.00185.2003.
15. Pan Li, Glenn T. Lines, Maleckar M., Aslak Tveito. Mathematical models of cardiac pacemaking function. Front. Phys., Sec. Computational Physics, 2013, vol. 1, DOI: 10.3389/fphy.2013.00020.
16. Nickerson1 D.P., Hunter P.J. The Noble cardiac ventricular electrophysiology models in CellML. Progress in Biophysics and Molecular Biology, 2006, no. 90 (1-3), pp. 346-359, DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2005.05.007.
17. Nickerson D.P., Hunter P.J. The Noble cardiac ventricular electrophysiology models in CellML. Progress in biophysics and molecular biology 90 (2006), pp. 346-359.
18. Nguyen T.T., Bakhtieva L.U. Numerical study of the Hodgkin-Huxley model. Proceedings of the international conference, Beijing, China, 2022, DOI: 10.34660/INF.2022.45.79.294.

Nguyen Thi Thu. *Master's student at Kazan Federal University. The main direction of research is mathematical modeling of cardiac activity, shilnguyen1412@mail.ru.*

Bakhtieva Lyalya Uzbekovna. *Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Artificial Intelligence, Kazan Federal University. The main direction of research is mathematical modeling of physical processes. AuthorID: 16749, lbakhtie@yandex.ru.*

Статья поступила в редакцию 15.03.2023; одобрена после рецензирования 16.06.2023; принята к публикации 16.06.2023.

The article was submitted 03/15/2023; approved after reviewing 06/16/2023; accepted for publication 06/16/2023.

Математические технологии

УДК 519.6
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.009

Восстановление вектора скорости ветра по данным лидарного зондирования методом сплайн-аппроксимации

Баранов Николай Алексеевич
Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН,
Россия, Москва, *baranov@ians.aero*

Аннотация. В работе рассматривается задача восстановления скорости горизонтального ветра по данным лидарного сканирования, которые обеспечивают измерения радиальной составляющей. Предложен подход, при котором компоненты скорости ветра вычисляются не в отдельной точке, а в заданном наборе узлов, расположенных вдоль заданного направления. Предлагаемый алгоритм использует идею покоординатного вычисления компонент вектора. Каждая компонента вычисляется методом сплайн-аппроксимации специальным образом выделенного подмножества измерений. Представлены результаты численных расчетов.

Ключевые слова: восстановление вектора скорости ветра, сплайн-аппроксимация, лидарное сканирование

Цитирование: Баранов Н.А. Восстановление вектора скорости ветра по данным лидарного зондирования методом сплайн-аппроксимации / Н.А. Баранов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 83-97. – DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.009.

Введение. Наземные лидарные системы дистанционного измерения скорости ветра находят все большее применение. В частности, они применяются в аэропортах для обнаружения сдвига ветра, а также мониторинга вихревых следов за самолетами [1]. Особенностью измерений ветровой обстановки лидарными системами является то, что они обеспечивают измерение проекции скорости ветра на направление сканирования. Пространственная картина ветрового поля получается за счет кругового сканирования с некоторым постоянным углом места, так называемый режим сканирования PPI – Plan Position Indicator. При сканировании с малым углом места можно считать, что вклад вертикальной составляющей ветра в измерения пренебрежимо мал и измеряется только горизонтальная составляющая скорости.

Поскольку непосредственно измеряется только радиальная составляющая скорости ветра (проекция на направление измерения) возникает задача восстановления двумерного вектора скорости по данным измерений в нескольких направлениях.

В работе [2] представлен краткий обзор методов, применяемых для решения задачи восстановления вектора скорости горизонтального ветра по данным лидарного сканирования в режиме PPI. В частности, рассмотрены вариационные методы восстановления и метод оптимальной интерполяции.

В методе оптимальной интерполяции [3] компоненты скорости ветра определяются путем минимизации функционала вида

$$J = \left(\mathbf{w} - \mathbf{w}_b\right)^T \mathbf{B}^{-1} \left(\mathbf{w} - \mathbf{w}_b\right) + \left(\mathbf{w}_O - \mathbf{H} \cdot \mathbf{w}\right)^T \mathbf{R}^{-1} \left(\mathbf{w}_O - \mathbf{H} \cdot \mathbf{w}\right),$$

где $\mathbf{w}$ - вектор искомых параметров скорости ветра; $\mathbf{w}_b$ - вектор априорной информации о скорости ветра в анализируемом пространстве; $\mathbf{w}_O$ - вектор измерений скорости ветра; $\mathbf{B}$ и $\mathbf{R}$ - соответственно ковариационные матрицы скорости ветра и ошибки измерений; $\mathbf{H}$ – матрица наблюдений. В методах вариационного типа в функционал качества добавляются еще функции штрафа, учитывающие ограничения на дивергенцию или завихренность векторного поля [4 - 6].

Общая проблема применения этих методов состоит в том, что они используют дополнительные гипотезы о структуре ветрового поля, например, принимается допущение об изотропности [7], а также требуют дополнительных исходных данных о ковариационных матрицах ветрового поля и ошибках измерений, получение которых в общем случае неплоского рельефа местности и различных метеоусловий представляет собой трудно разрешимую задачу.

Для восстановления вектора скорости ветра по данным лидарного сканирования также активно используется метод наименьших квадратов (МНК) с весовыми коэффициентами [8 – 10], согласно которому вычисление горизонтальных компонент *u, v* скорости ветра в точке $\mathbf{r}_0$ с координатами (φ_0, r_0) по измерениям V_j в точках $\mathbf{r}_j = (\varphi_j, r_j)$ из некоторой ее окрестности основано на минимизации функционала вида

$$I\left(u(\mathbf{r}_0), v(\mathbf{r}_0)\right) = \sum_{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_0| \le \Delta r} w_j \left(V_j - u\cos\varphi_j - v\sin\varphi_j\right)^2, \qquad (1)$$

где w_j - специальным образом подобранные весовые коэффициенты. Привлекательность использования метода наименьших квадратов для восстановления вектора горизонтальной скорости ветра состоит в том, что он не требует практически никакой дополнительной информации кроме данных о среднеквадратической ошибке измерений, которые используются для вычисления весовых коэффициентов.

Проблема применения МНК связана с тем, что из-за наличия пропусков в данных измерений оценки компонент скорости ветра могут быть смещенными, что приводит к выбросам в решении. Эту проблему иллюстрирует пример, показанный на рис. 1. Рассматривается постоянное поле ветра с компонентами скорости $u_0 = 5$ м/с, $v_0 = 6$ м/с. Вектор, соответствующий истинному направлению и скорости ветра, показан на рис. 1 зеленым цветом.

Измерения представляют собой значение радиальной составляющей скорости в точках r_i, равномерно расположенных вдоль направлений измерений φ_j:

$$w_{ij} = u_0 \cdot \cos\varphi_j + v_0 \cdot \sin\varphi_j + \xi_{ij},$$

где ξ_{ij} - ошибка измерений, которая является нормально распределенной случайной величиной с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратическим отклонением 0.25м/с. Предполагается, что некоторые измерения являются недостоверными – они показаны на рис. 1 выколотыми точками. Для вычисления скорости в точке $\varphi_0 = 0°$, $r_0 = 2200$ м отбираются измерения в точках, удаленных от точки (φ_0, r_0) не более, чем на $\Delta r = 200$ м. Соответствующая окрестность точки $\mathbf{r}_0$ показана пунктирной линией.

Можно видеть (рис. 1), что в окрестность $|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_0| \le \Delta r$ попадает некоторое множество недостоверных измерений, причем в этой области недостоверные измерения расположены неравномерно, концентрируясь вблизи нижней границы.

Результатом решения задачи восстановления методом наименьших квадратов является вектор скорости ветра, показанный на рис. 1 красным цветом. При этом погрешность определения скорости составила ≈2м/с, что составляет 25% от истинного значения, а погрешность определения направления ≈20°.

Представленный пример показывает, что МНК довольно чувствителен к пропускам данных.

Также источником значительных погрешностей восстановления скорости ветра является пространственная неоднородность ветрового поля, порождаемая локальными орографическими условиями и турбулентностью атмосферы. Кроме того, вычисления вектора скорости ветра в близких точках выполняются независимо, что не позволяет учесть пространственную корреляцию ветрового поля.

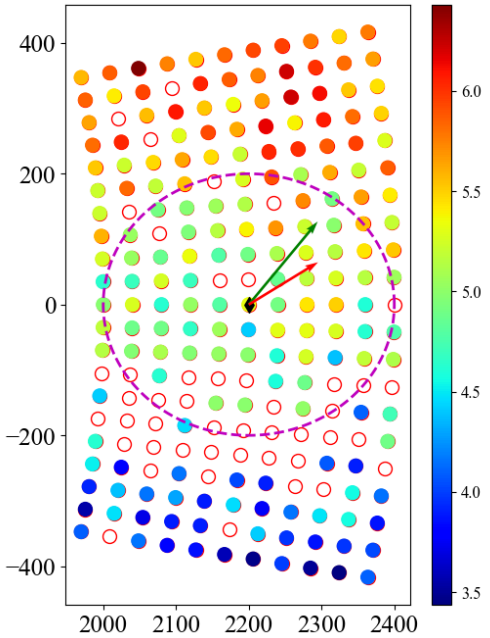


Рис. 1. Пример восстановления вектора скорости ветра методом наименьших квадратов при наличии недостоверных данных

В данной работе рассматривается возможность применения альтернативного подхода к восстановлению двумерного вектора горизонтальной скорости ветра по данным лидарного сканирования в режиме PPI, при котором компоненты скорости ветра вычисляются не в отдельной точке, а в заданном наборе узлов $(r_1,...,r_n)$ вдоль заданного направления φ_0. Предлагаемый алгоритм использует идею покоординатного вычисления компонент вектора: вначале вычисляется компонента скорости вдоль направления φ_0, а затем – ортогональная ей составляющая скорости ветра. Каждая компонента вычисляется путем сплайн-аппроксимации специальным образом сформированного набора данных измерений.

1. Постановка задачи. Будем предполагать, что измерения выполняются вдоль направлений

$$\varphi_j = \varphi_0 + j\,\Delta\varphi, \quad j = -n,...,n,$$

в контрольных точках, расположенных с постоянным шагом:

$$r_i = r_0 + i\,\Delta r, \quad i = 0,...,m.$$

В результате имеется множество измерений V_{ij} проекций скорости ветра на направления измерений φ_j на дальностях r_i. Для каждого измерения также определен признак его достоверности S_{ij}:

$S_{ij} = 1$, если измерений V_{ij} достоверно,

$S_{ij} = 0$, в противном случае.

В качестве показателя достоверности может использоваться, например, соотношение сигнал-шум SNR_{ij}, соответствующее измерению V_{ij} [1, 11]. Если значение SNR_{ij} превышает некоторое заданное пороговое значение $SNR_{\lim}$:

$$SNR_{ij} \geq SNR_{\lim},$$

то измерение считается достоверным $S_{ij} = 1$. В противном случае измерение недостоверно и $S_{ij} = 0$.

Расчет выполняется в повернутой декартовой системе координат, ось абсцисс которой совпадает с направлением φ_0. Вектор скорости ветра имеет компоненты (u, v), где u - компонента скорости ветра вдоль направления φ_0, v - компонента, ортогональная направлению φ_0.

Измерения V_{ij} выражаются через компоненты скорости ветра (u_{ij}, v_{ij}) в этой точке зависимостью вида

$$V_{ij} = u_{ij} \cdot \cos(j\,\Delta\varphi) + v_{ij} \cdot \sin(j\,\Delta\varphi) + \delta_{ij},$$

где δ_{ij} - погрешность измерений. Предполагается, что ошибки измерений независимы.

Предполагается, что поле ветра является плоскопараллельным, т.е. компоненты скорости являются некоторыми одномерными функциями дальности вдоль направления φ_0, определенными на интервале $[r_0, r_m]$, и не зависят от азимутальной координаты. Гипотеза о плоскопараллельности поля ветра означает, что скорость ветра в точке r_i вдоль направления φ_j равна скорости в точке $r_i \cdot \cos(j\,\Delta\varphi)$ вдоль направления φ_0:

$$u(r_i, \varphi_j) = u(r_i \cdot \cos(j\,\Delta\varphi)_i, \varphi_0),$$

$$v(r_i, \varphi_j) = v(r_i \cdot \cos(j\,\Delta\varphi)_i, \varphi_0).$$

Другими словами, согласно гипотезы о плоскопараллельности поля ветра компоненты скорости ветра являются функциями только координаты x (в декартовой системе координат, ось абсцисс которой совпадает с направлением φ_0) и не зависят от ординаты (рис. 2). Соответственно значение радиальной скорости V_{ij} в точке r_i вдоль направления φ_j является проекцией скорости ветра в точке $r_i \cdot \cos(j\,\Delta\varphi)$ вдоль направления φ_0 на направление φ_j.

Заметим, что при восстановлении скорости ветра для другого направления $\varphi_{01} \neq \varphi_0$ по данным измерений радиальной скорости с учетом этой гипотезы будет приниматься допущение, что компоненты скорости ветра являются функциями только координаты x в декартовой системе координат, ось абсцисс которой совпадает с направлением φ_{01}, а не φ_0.

Требуется найти оценки $(\hat{u}_0(r), \hat{v}_0(r))$ скорости ветра вдоль направления φ_0, которые минимизируют функционал качества вида

$$J(\{\hat{u}_{i0}, \hat{v}_{i0}\}) = \sum_{i=0}^{m} \sum_{j=-n}^{n} S_{ij} \left(V_{ij} - \hat{u}_0(r_i \cdot \cos(j\,\Delta\varphi)) \cdot \cos(j\,\Delta\varphi) - \hat{v}_0(r_i \cdot \cos(j\,\Delta\varphi)) \cdot \sin(j\,\Delta\varphi)\right)^2 +$$
$$\lambda \int_{r_0}^{r_m} \left\{ \left(\frac{d\hat{u}_0}{dr}\right)^2 + \left(\frac{d\hat{v}_0}{dr}\right)^2 \right\} dr. \qquad (2)$$

Здесь $\lambda \geq 0$ - параметр сглаживания, контролирующий соотношение между точностью аппроксимации данных и гладкостью аппроксимирующей функции.

Заметим также, что хотя точки измерений вдоль каждого направления расположены равномерно с одинаковым шагом, аппроксимация компонент скорости ветра осуществляется на неравномерной сетке узлов $\{r_i \cdot \cos(j\Delta\varphi)\}$. Кроме того, часть узлов сетки может быть исключена из рассмотрения в силу недостоверности измерений, что определяется весовым коэффициентом S_{ij}.

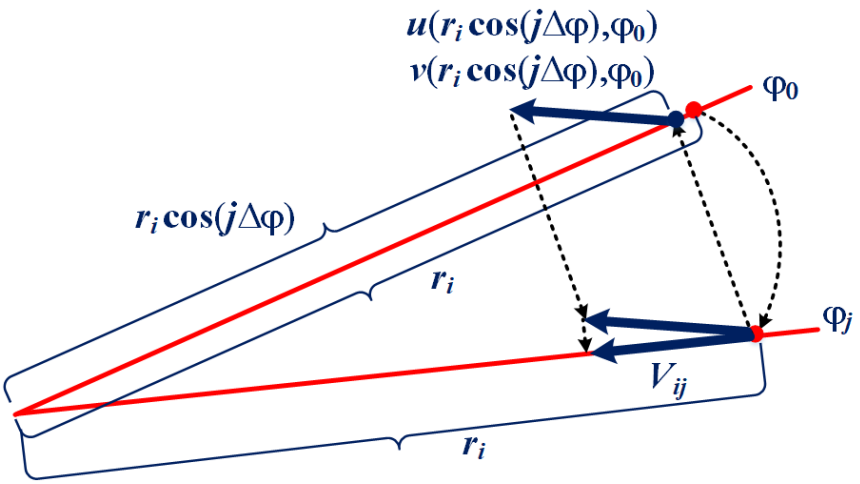


Рис. 2. Геометрическая иллюстрация гипотезы плоскопараллельного поля ветра

2. Алгоритм вычислений. Для решения задачи определения компонент скорости ветра вдоль направления φ_0 будем использовать модифицированный функционал (2), учитывая только измерения, находящиеся в малой δ-окрестности направлений φ_0, $\varphi_0 \pm n\Delta\varphi$, т.е. измерения вдоль направлений, отличающихся от направлений φ_0, $\varphi_0 \pm n\Delta\varphi$ не более, чем на δ (рис. 3):

$$\left|\varphi_j - \varphi_0\right| \leq \delta,$$

$$\left|\varphi_j - \varphi_0 - n \cdot \Delta\varphi\right| \leq \delta,$$

$$\left|\varphi_j - \varphi_0 + n \cdot \Delta\varphi\right| \leq \delta.$$

При таком ограничении функционал (1) будет иметь вид

$$J\left(\{\hat{u}_{i0}, \hat{v}_{i0}\}\right) = \sum_{i=0}^{m} \sum_{\substack{j:|j\Delta\varphi|\leq\delta,\\ (n-|j|)\Delta\varphi\leq\delta}} S_{ij}\left(V_{ij} - \hat{u}_0\left(r_i \cdot \cos(j\Delta\varphi)\right)\cdot\cos(j\Delta\varphi) - \hat{v}_0\left(r_i \cdot \cos(j\Delta\varphi)\right)\cdot\sin(j\Delta\varphi)\right)^2 +$$

$$\lambda \int_{r_0}^{r_m} \left\{\left(\frac{d\hat{u}_0}{dr}\right)^2 + \left(\frac{d\hat{v}_0}{dr}\right)^2\right\} dr \qquad (3)$$

Выполним декомпозицию задачи, пользуясь тем, что проекция боковой составляющей скорости ветра на направление φ_0 равна нулю. Запишем функционал (3) в виде

$$J\left(\{\hat{u}_{i0}, \hat{v}_{i0}\}\right) \approx J_1\left(\{\hat{u}_{i0}\}\right) + J_2\left(\{\hat{u}_{i0}, \hat{v}_{i0}\}\right),$$

где

$$J_1\left(\{\hat{u}_{i0}\}\right) = \sum_{i=0}^{m} \sum_{j:|j\Delta\varphi|\leq\delta} S_{ij}\left(V_{ij} - \hat{u}_0\left(r_i \cdot \cos(j\Delta\varphi)\right)\cdot\cos(j\Delta\varphi)\right)^2 + \lambda \int_{r_0}^{r_m} \left(\frac{d\hat{u}_0}{dr}\right)^2 dr,$$

$$J_2\left(\{\hat{u}_{i0},\hat{v}_{i0}\}\right)=\sum_{i=0}^{m}\sum_{j:(n-|j|)\Delta\varphi\le\delta}S_{ij}\left(V_{ij}-\hat{u}_0\left(r_i\cdot\cos(j\Delta\varphi)\right)\cdot\cos(j\Delta\varphi)-\hat{v}_0\left(r_i\cdot\cos(j\Delta\varphi)\right)\cdot\sin(j\Delta\varphi)\right)^2$$

$$+\lambda\int_{r_0}^{r_m}\left(\frac{d\hat{v}_0}{dr}\right)^2dr.$$

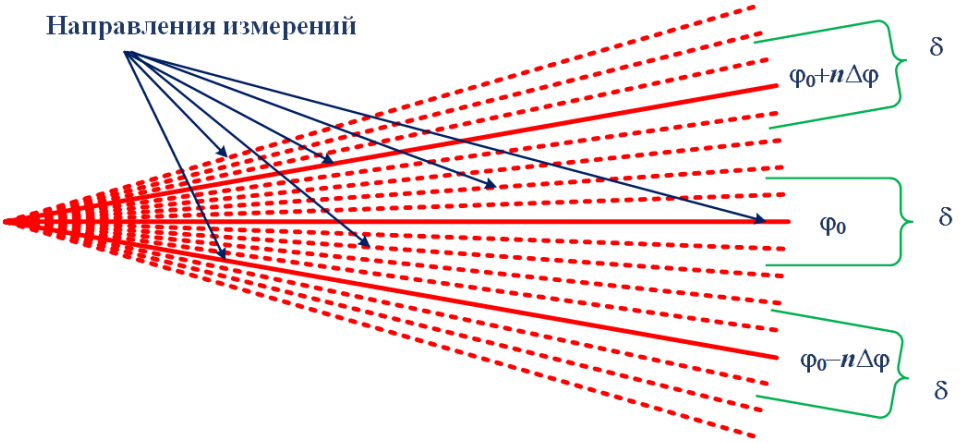


Рис. 3. Геометрическая иллюстрация отбора направлений измерений для формирования модифицированного функционала

В силу того, что параметр δ мал, функционал $J_1\left(\{\hat{u}_{i0}\}\right)$ представим в виде

$$J_1'\left(\{\hat{u}_{i0}\}\right)\approx\sum_{i=0}^{m}\sum_{j:|j\Delta\varphi|\le\delta}S_{ij}\left(V_{ij}-\hat{u}_0(r_i)\right)^2+\lambda\int_{r_0}^{r_m}\left(\frac{d\hat{u}_0}{dr}\right)^2dr. \qquad (4)$$

Особенностью функционала (4) является то, что в узлах r_i заданы несколько значений аппроксимируемой функции $\hat{u}_0(r)$: $\{V_{ij}\}_{j:|j\Delta\varphi|\le\delta}$ с учетом признака достоверности измерений S_{ij}.

Поэтому задачу минимизации функционала (3) запишем в виде

$$\min\left\{\sum_{i=0}^{m}\max_{j:|j\Delta\varphi|\le\delta}S_{ij}\cdot\left(\tilde{V}_i-\hat{u}_0(r_i)\right)^2+\lambda\int_{r_0}^{r_m}\left(\frac{d\hat{u}_0}{dr}\right)^2dr\right\}, \qquad (5)$$

$$\min\sum_{j:|j\Delta\varphi|\le\delta}S_{ij}\left(V_{ij}-\tilde{V}_i\right)^2,\ i=0,\dots,m. \qquad (6)$$

Коэффициент $\max\limits_{j:|j\Delta\varphi|\le\delta}S_{ij}$ учитывает возможность, что на дистанции r_i могут отсутствовать достоверные измерения. Формулировка задачи построения функции $\hat{u}_0(r)$, аппроксимирующей измерения V_{ij} на интервале $[r_0,r_m]$ в диапазоне направлений измерений $|\varphi_j-\varphi_0|\le\delta$ в виде (5), (6) позволяет выполнить ее декомпозицию на две подзадачи:

– определение аппроксимируемых значений $\tilde{V}_i$ в узлах r_i методом наименьших квадратов (6);
– построение аппроксимирующей функции $\hat{u}_0(r)$ по заданным значениям $\tilde{V}_i$ в узлах r_i как решение задачи (5).

Для узлов r_i, для которых имеется хотя бы одно достоверное значение

$$\sum_{j:|j\Delta\varphi|\le\delta}S_{ij}>0,$$

задача вида (6) имеет очевидное решение вида

$$\tilde{V}_i = \frac{\sum\limits_{j:|j\Delta\varphi|\le\delta} S_{ij}V_{ij}}{\sum\limits_{j:|j\Delta\varphi|\le\delta} S_{ij}},\ i = 0,...,m.$$

Решение задачи (5) будем искать в классе кубических сплайнов, удовлетворяющих естественным граничным условиям [12]

$$\hat{u}_0''(r_0) = \hat{u}_0''(r_m) = 0.$$

В этом случае на каждом интервале $[r_i, r_{i+1}]$ функция $\hat{u}_0(r)$ имеет вид

$$\hat{u}_0(r) = \hat{u}_{0i}(r) = z_i(1-t) + z_{i+1}t - \frac{h_i^2}{6}t(1-t)\left[(2-t)n_i + (1+t)n_{i+1}\right],$$

где

$$h_i = r_{i+1} - r_i,\ t = \frac{r - r_i}{h_i}.$$

Коэффициенты n_i вычисляются путем решения системы уравнений [13, 14]

$$a_0n_0 + b_0n_1 + c_0n_2 = g_0,$$

$$b_0n_0 + a_1n_1 + b_1n_2 + c_1n_3 = g_1,$$

$$c_{i-2}n_{i-2} + b_{i-1}n_{i-1} + a_in_i + b_in_{i+1} + c_in_{i+2} = g_i,\ i = 2,...,m-2,$$

$$c_{m-3}n_{m-3} + b_{m-2}n_{m-2} + a_{m-1}n_{m-1} + b_{m-1}n_m = g_{m-1},$$

$$c_{m-2}n_{m-2} + b_{m-1}n_{m-1} + a_mn_m = g_m,$$

где

$$a_i = \frac{1}{3}(h_{i-1} + h_i) + \frac{1}{h_{i-1}^2}\rho_{i-1} + \left(\frac{1}{h_{i-1}} + \frac{1}{h_i}\right)^2\rho_i + \frac{1}{h_i^2}\rho_{i+1},\ i = 1,...,m-1,$$

$$b_i = \frac{1}{6}h_i - \frac{1}{h_i}\left(\left(\frac{1}{h_{i-1}} + \frac{1}{h_i}\right)\rho_i + \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{i+1}}\right)\rho_{i+1}\right),\ i = 2,...,m-2,$$

$$c_i = \frac{1}{h_ih_{i+1}}\rho_{i+1},\ i = 1,...,m-3,$$

$$g_i = \frac{\tilde{V}_{i+1} - \tilde{V}_i}{h_i} - \frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_{i-1}}{h_{i-1}},\ i = 1,...,m-1,$$

$$a_0 = 1, b_0 = 1, c_0 = 0, g_0 = 0,$$

$$a_m = 1, b_{m-1} = 1, c_{m-2} = 0, g_m = 0.$$

Здесь $\rho_i > 0$ - весовые коэффициенты. Представленная система уравнений для нахождения коэффициентов n_i имеет симметричную, положительно определенную матрицу с диагональным преобладанием. Известно [12, 13], что решение такой системы может быть осуществлено методом исключения Гаусса без выбора главных элементов, т. е. в данном случае хорошо апробированным методом пятиточечной прогонки [13 – 15]. Хорошая обусловленность матрицы системы уравнений и наличие высокоэффективных процедур решения этой системы и определили выбор метода построения аппроксимирующей функции с использованием кубических сплайнов. Размерность матрицы варьируется в зависимости от дистанции, на которой

осуществляется восстановление вектора скорости. Так, например, для дальности 2000м размерность матрицы составит 200×200.

При известных значениях коэффициентов n_i коэффициенты z_i вычисляются по формулам

$$z_i = \tilde{V}_i - \rho_i D_i,\ i = 1,...,m,$$

где

$$D_0 = \frac{1}{h_0}\left(n_1 - n_0\right),\ D_m = -\frac{1}{h_{m-1}}\left(n_m - n_{m-1}\right),$$

$$D_i = \frac{1}{h_i}\left(n_{i+1} - n_i\right) - \frac{1}{h_{i-1}}\left(n_i - n_{i-1}\right),\ i = 1,...,m-1.$$

Таким образом, функция $\hat{u}_0\left(r\right)$ будет однозначным образом определена.

После этого осуществляется восстановление боковой составляющей скорости ветра $\hat{v}_0\left(r\right)$. Для ее вычисления преобразуем функционал $J_2\left(\left\{\hat{u}_{i0}, \hat{v}_{i0}\right\}\right)$, учитывая малость параметра δ, к виду

$$J_2'\left(\left\{\hat{v}_{i0}\right\}\right) = \sum_{i=0}^{m} \sum_{j:\left(n-|j|\right)\Delta\varphi \le \delta} S_{ij} \sin^2\left(j\,\Delta\varphi\right)\left(\frac{V_{ij} - \hat{u}_0\left(r_i \cdot \cos\left(n\,\Delta\varphi\right)\right)\cdot\cos\left(j\,\Delta\varphi\right)}{\sin\left(j\,\Delta\varphi\right)} - \hat{v}_0\left(r_i \cdot \cos\left(n\,\Delta\varphi\right)\right)\right)^2 +$$

$$\lambda_v \int_{r_0\cdot\cos\left(n\,\Delta\varphi\right)}^{r_m\cdot\cos\left(n\,\Delta\varphi\right)} \left(\frac{d\hat{v}_0}{dr}\right)^2 dr.$$

Аналогично тому, как это было сделано при вычислении продольной составляющей скорости ветра, выполним декомпозицию задачи нахождения боковой составляющей скорости ветра на подзадачи:

$$\min\left(\sum_{i=0}^{m} \max_{j:\left(n-|j|\right)\Delta\varphi \le \delta} S_{ij} \cdot \left(\tilde{W}_i - \hat{v}_0\left(r_i \cdot \cos\left(n\,\Delta\varphi\right)\right)\right)^2 + \lambda_v \int_{r_0\cdot\cos\left(n\,\Delta\varphi\right)}^{r_m\cdot\cos\left(n\,\Delta\varphi\right)} \left(\frac{d\hat{v}_0}{dr}\right)^2 dr\right), \tag{7}$$

$$\min \sum_{j:\left(n-|j|\right)\Delta\varphi \le \delta} S_{ij} \sin^2\left(j\,\Delta\varphi\right)\left(\frac{V_{ij} - \hat{u}_0\left(r_i \cdot \cos\left(n\,\Delta\varphi\right)\right)\cdot\cos\left(j\,\Delta\varphi\right)}{\sin\left(j\,\Delta\varphi\right)} - \tilde{W}_i\right)^2,\ i = 0,...,m. \tag{8}$$

Задача (8) имеет решение вида

$$\tilde{W}_i = \frac{\sum_{j:\left(n-|j|\right)\Delta\varphi \le \delta} S_{ij} \sin\left(j\,\Delta\varphi\right)\left\{V_{ij} - \hat{u}_0\left(r_i \cdot \cos\left(n\,\Delta\varphi\right)\right)\cdot\cos\left(j\,\Delta\varphi\right)\right\}}{\sum_{j:\left(n-|j|\right)\Delta\varphi \le \delta} S_{ij} \sin^2\left(j\,\Delta\varphi\right)},$$

а задача (7) решается аналогично задаче (4) для продольной составляющей.

3. Результаты. Прежде чем переходить к апробации представленного алгоритма на данных реальных измерений, проведем его тестирование на модельном примере. Рассмотрим ветровое поле, изменение компонент которого в пространстве описывается зависимостями вида

$$u\left(x, y\right) = u_0 + \Delta_u \cdot x,$$

$$v\left(x, y\right) = v_0 + \Delta_v \cdot x,$$

где $u_0 = 5$ м/с, $v_0 = 6$ м/с, $\Delta_u = -0.004$, $\Delta_v = 0.004$. Будем предполагать, что ошибки измерений являются независимыми, нормально распределенными случайными величинами с математическим ожиданием 0 и среднеквадратической ошибкой 0.25м/с.

На рис. 4 представлены результаты расчета модуля скорости ветра для направления $\varphi_0 = 0°$ при различных значениях параметра λ, регулирующего степень близости аппроксимирующей функции к заданным значениям в узлах. Можно видеть, что при значениях параметра $\lambda \sim 10^2 ... 10^3$ ошибка восстановления скорости составляется 10…15%, что является довольно высоким показателем. При значениях $\lambda \sim 10^5$ метод теряет чувствительность к вариации восстанавливаемой функции на области определения, фактически вырождаясь в линейную регрессию. Поэтому для дальнейших расчетов было принято значение $\lambda = 10^4$.

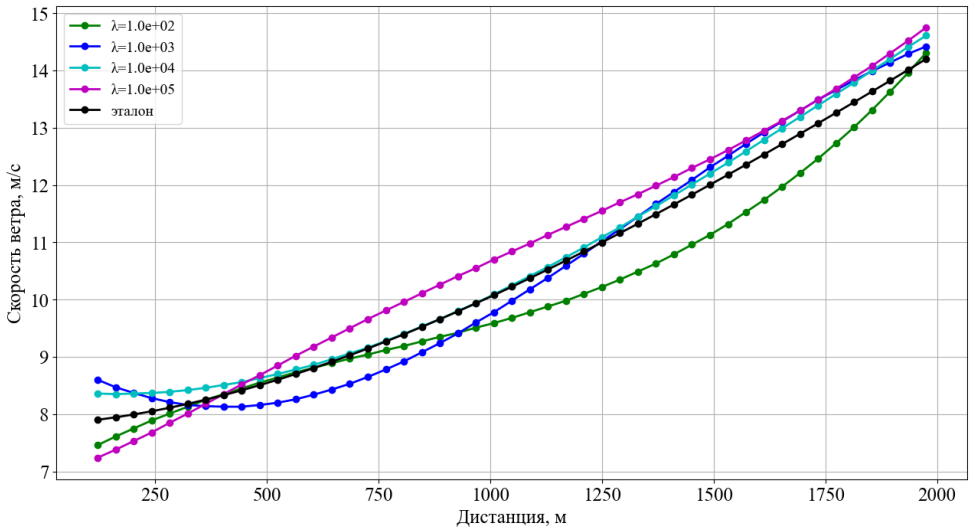


Рис. 4. Влияние параметра сглаживания λ на восстановление модуля скорости ветра

Также на этом модельном примере было рассмотрено влияние размера сектора данных, используемых для восстановления скорости вдоль заданного направления $\varphi_0 = 5°$, т.е. значения параметра $n\Delta\varphi$. Соответствующие результаты представлены на рис. 5. Можно видеть, что при малом размере сектора методу не хватает чувствительности (график зеленого цвета) в силу сглаживающих свойств аппроксимирующего сплайна, поскольку величина проекции боковой составляющей скорости ветра на направление $n\Delta\varphi = 5°$ оказывается мала. При большом размере сектора $n\Delta\varphi = 30°$ на качество восстановления начинает влиять пространственная изменчивость ветрового поля. Таким образом, целесообразно размер сектора данных выбирать в диапазоне $10° ... 20°$.

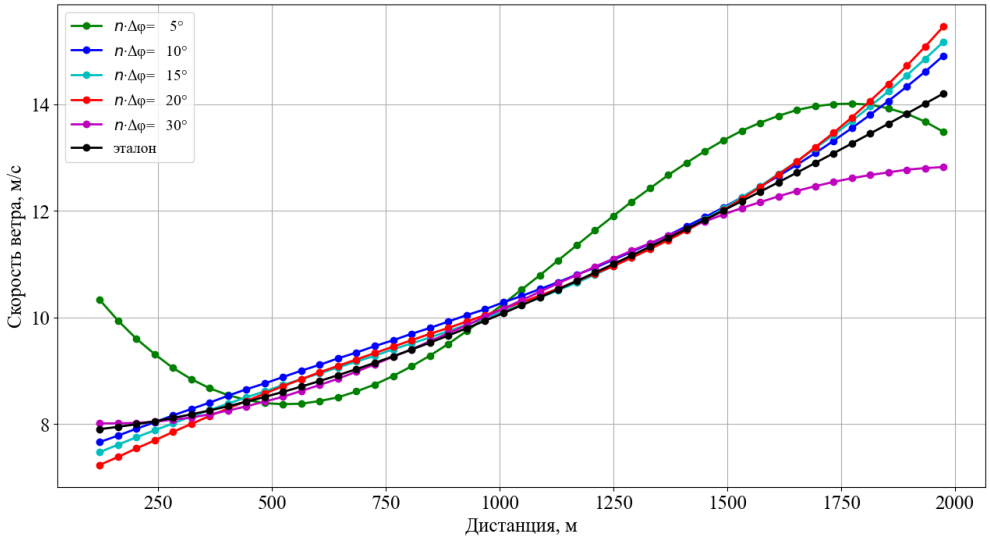


Рис. 5. Влияние размера $n\Delta\varphi$ сектора данных на восстановление модуля скорости ветра

Апробацию представленного алгоритма расчета выполним на примере данных реальных измерений ветровых полей с помощью импульсного ветрового лидара Windex-5000 [16]. Лидар обеспечивает измерение радиальной составляющей скорости ветра с пространственным шагом $\Delta r \approx 41$ м. Измерения выполнялись с угловым разрешением $\Delta\varphi = 1°$. Вид поля измеренных радиальных скоростей представлен на рис. 6. На рисунке показаны достоверные данные измерений.

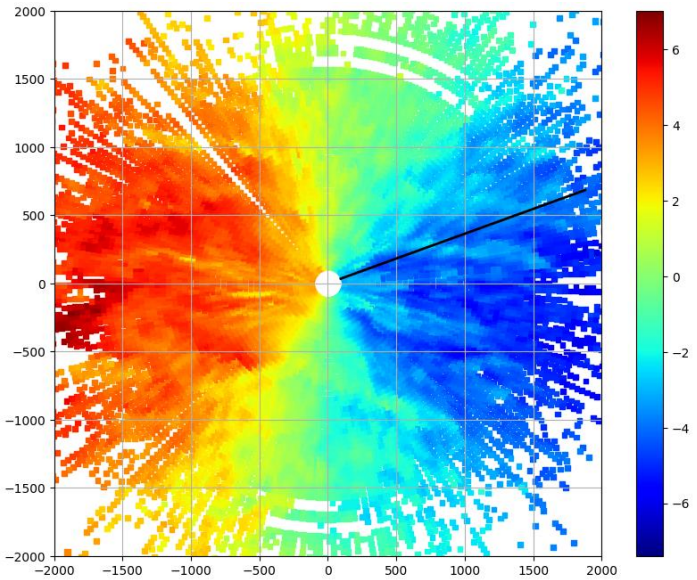


Рис. 6. Данные измерений ветрового поля

На рис. 7, 8 показаны результаты восстановления вектора скорости ветра для нескольких направлений измерений $\varphi_0 \in \{70°, 80°, 90°, 100°, 110°\}$. Результаты представлены в виде значений модуля вектора скорости (рис. 7) и направления скорости ветра (рис. 8). Начальное направление $\varphi_0 = 70°$ показано на рис. 2 линией черного цвета, что позволяет судить об изменчивости данных сканирования в анализируемой области. Для восстановления поля скоростей рассматривался сектор размером 20°, т.е. n=10. Величина δ была принята равной 2°. Дистанция восстановления вектора скорости ветра составила 2000м.

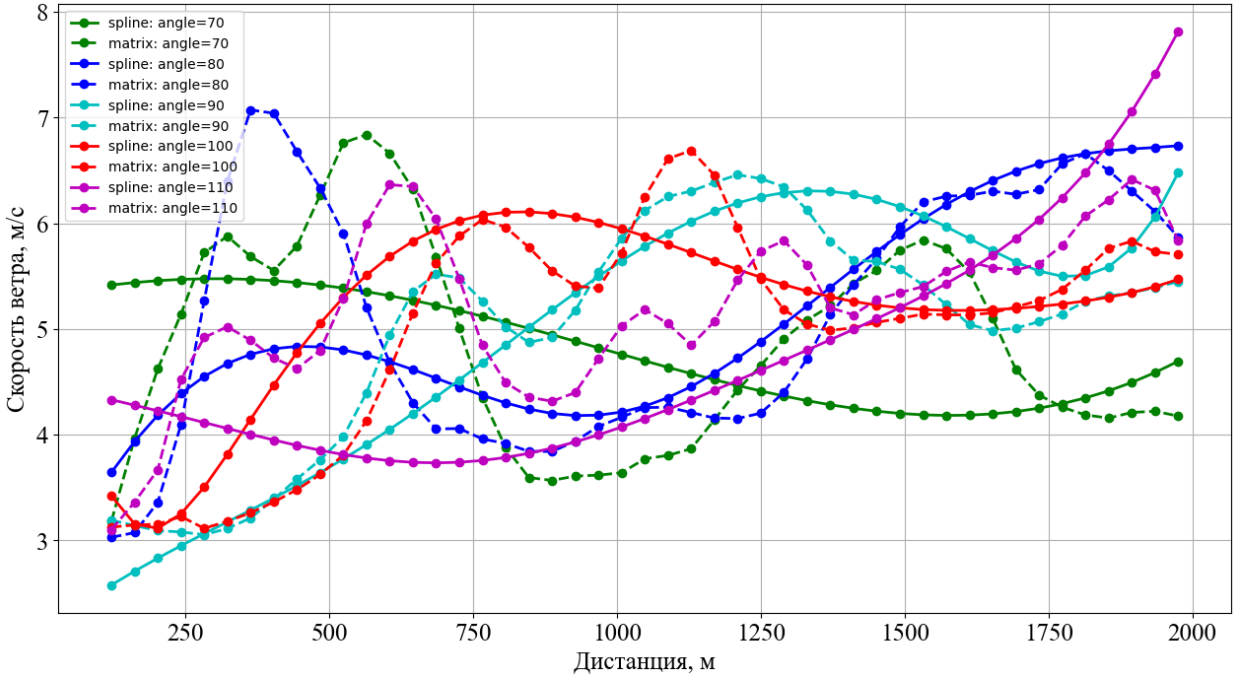


Рис. 7. Результаты восстановления скорости ветра в диапазоне направлений 70…110°

Для сравнения на этих же рисунках пунктирными линиями показаны результаты, полученные методом наименьших квадратов (1). На рис. 9, 10 аналогичные результаты представлены для направлений измерений $\varphi_0 \in \{20°, 30°, 40°, 50°, 60°\}$.

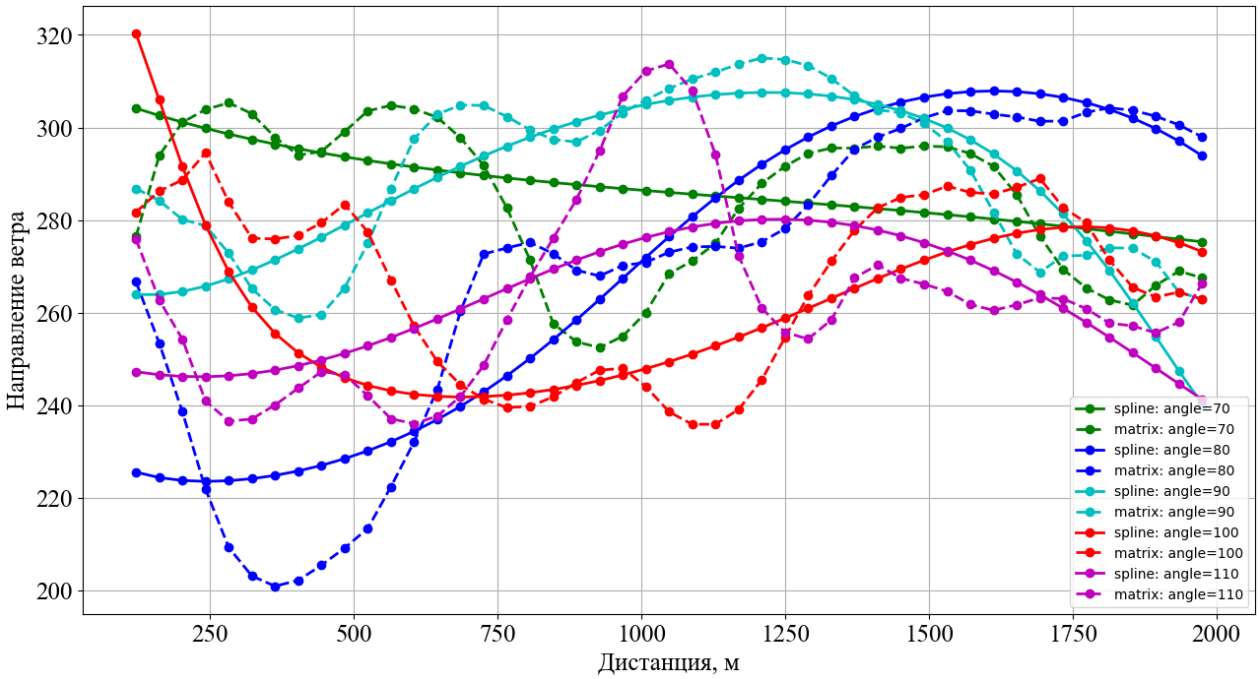


Рис. 8. Результаты восстановления направления ветра в диапазоне направлений 70…110°

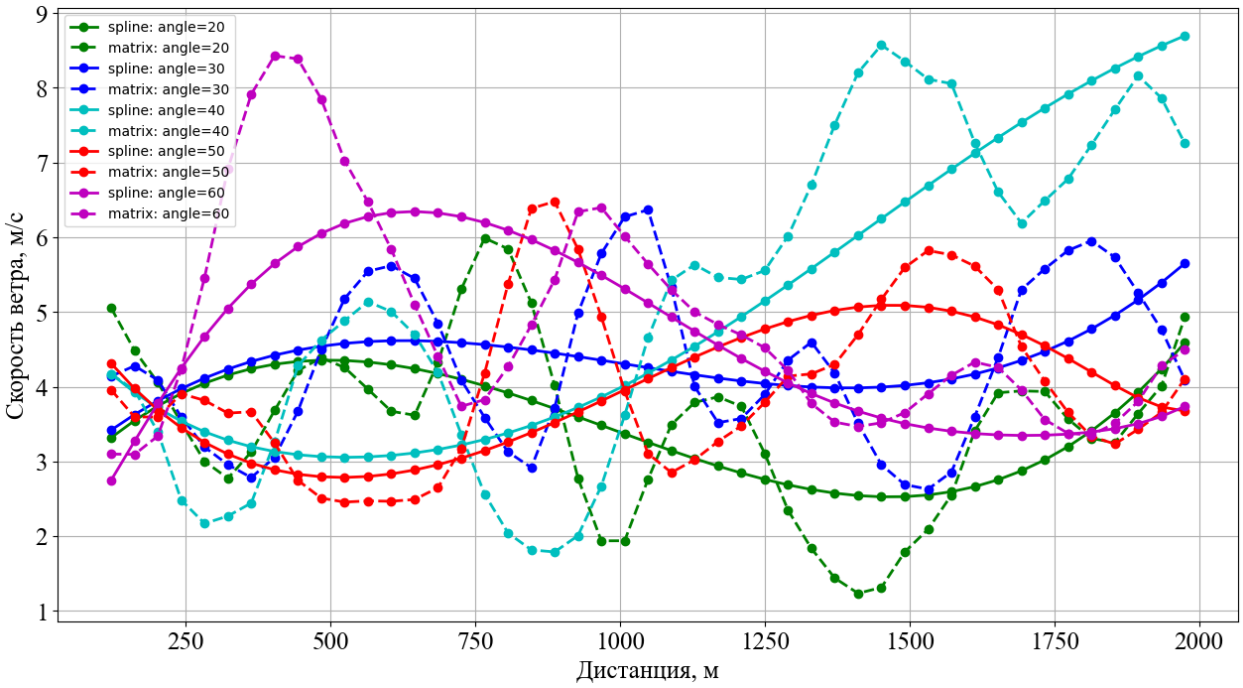


Рис. 9. Результаты восстановления скорости ветра в диапазоне направлений 20…60°

Можно видеть, что применение описанного в данной работе алгоритма обеспечивает более гладкое восстановление характеристик скорости ветра по сравнению с методом наименьших квадратов. При применении предложенного алгоритма отсутствует резкие перепады параметров скорости ветра на короткой дистанции.

Вместе с тем ввиду того, что исходное поле измеренных значений радиальной скорости является крайне неоднородным (рис. 7), результаты восстановления вектора скорости

для близких направлений могут существенно отличаться, как видно из представленных результатов, что обусловлено локальными пространственными и временными флуктуациями ветрового поля.

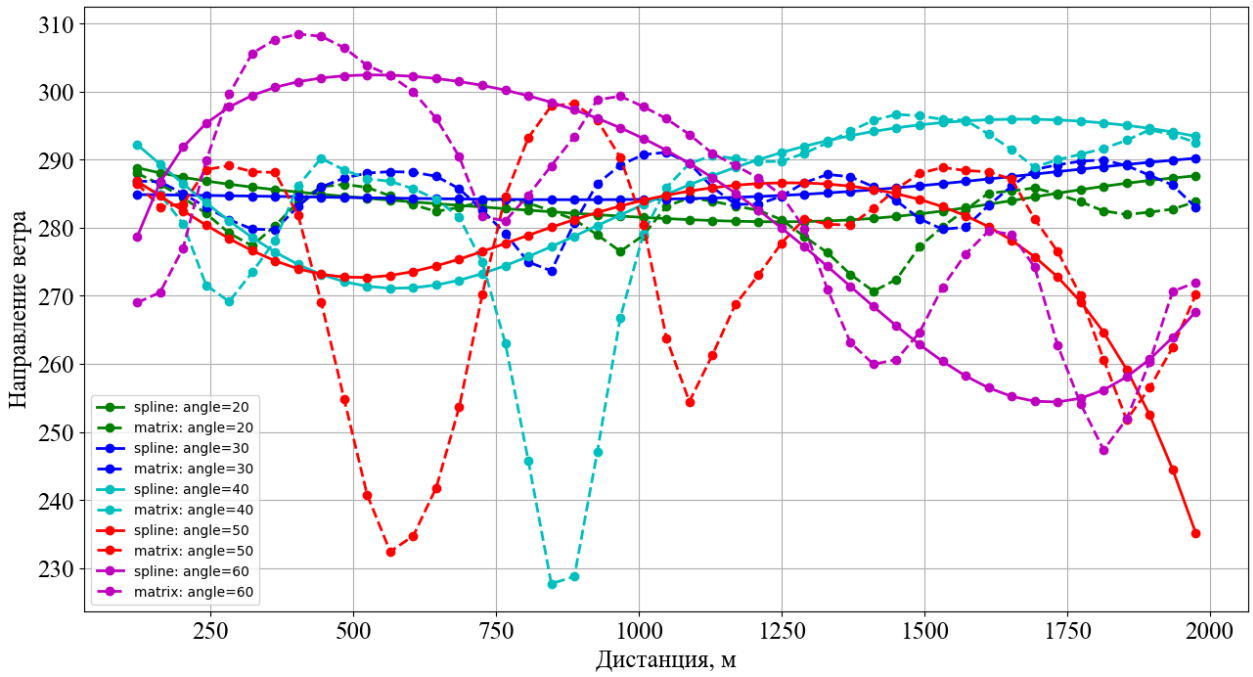


Рис. 10. Результаты восстановления направления ветра в диапазоне направлений 20…60°

При этом следует отметить, что на результаты восстановления существенным образом влияет размер сектора данных, используемых для решения задачи. Этот факт иллюстрируют рис. 11, 12, на которых представлены результаты расчета скорости и направления ветра при различных размерах сектора используемых данных: 10° (круглые маркеры), 20° (ромбовидные маркеры), 30° (треугольные маркеры).

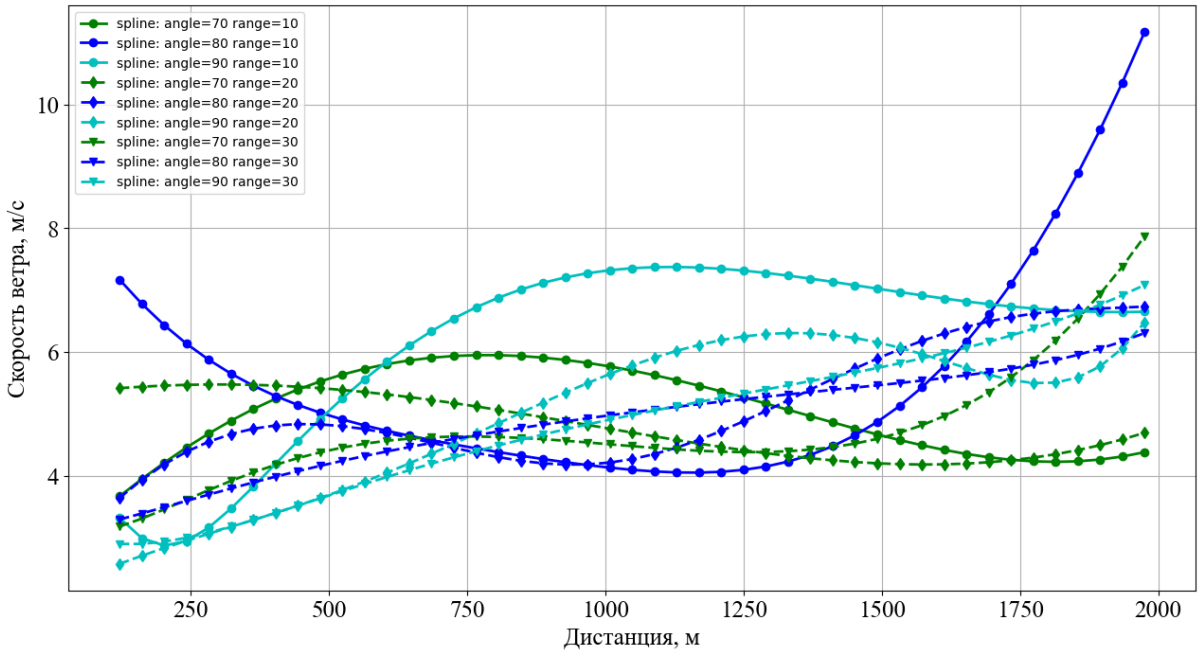


Рис. 11. Влияние размера сектора измерений на результаты восстановления скорости ветра

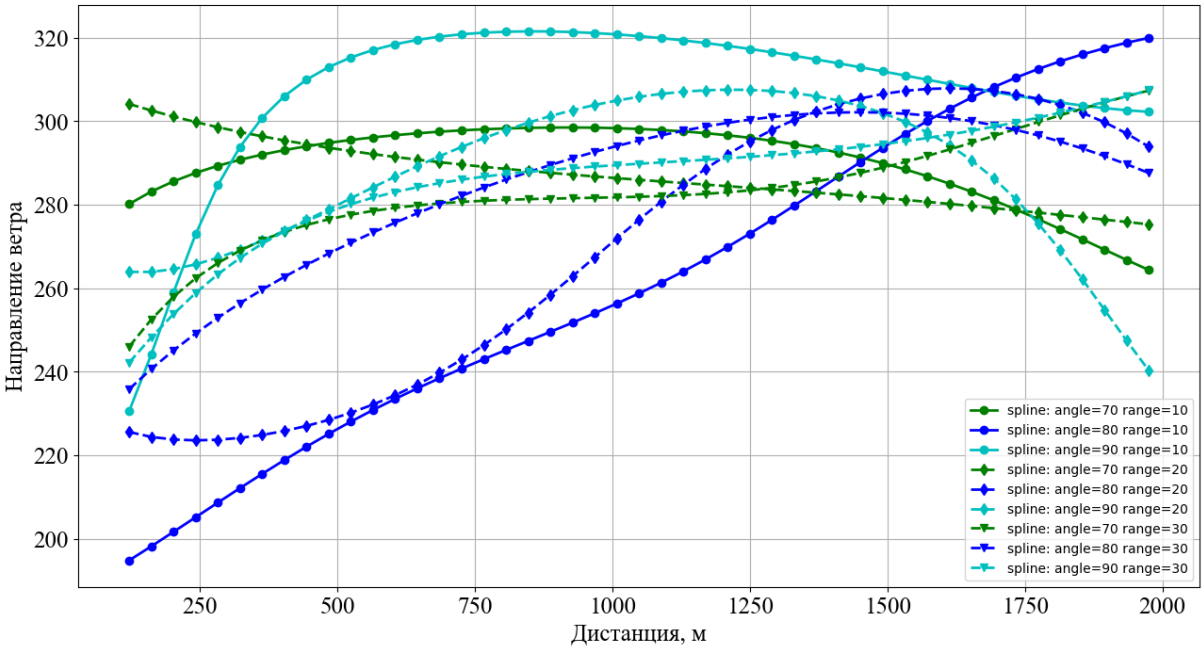


Рис. 12. Влияние размера сектора измерений на результаты восстановления направления ветра

При малом размере сектора данных алгоритм менее чувствителен к пространственной изменчивости ветрового поля в направлении, ортогональном направлению восстановления. Однако поскольку малы проекции боковой составляющей это может сказываться на точности ее восстановления и, как следствие, на вычисление модуля вектора скорости и его направления. С другой стороны, увеличение сектора данных повышает разрешающую способность метода, снижает его чувствительность к случайным флуктуациям данных измерений, но при этом и повышает его чувствительность к пространственной изменчивости ветрового поля, особенно на больших дистанциях измерений.

Заключение. В работе представлен алгоритм покоординатного восстановления компонент скорости ветра по данным лидарного сканирования методом сплайн-аппроксимации. Представленные результаты численных расчетов показывают, что разработанный алгоритм позволяет восстанавливать структуру векторного ветрового поля и является более робастным к случайным флуктуациям измерений по сравнению с классическим методом наименьших квадратов вычисления вектора скорости ветра по измеренным значениям его радиальной составляющей.

Список источников

1. ISO 28902-2:2017. Air quality – Environmental meteorology – Part 2: Ground-based remote sensing of wind by heterodyne pulsed Doppler lidar.
2. Liu, Z., Barlow J.F., Chan P.-W., Fung J.C.H., Li Y., Ren C., Mak H.W.L., Ng E. A review of progress and applications of pulsed doppler Wind LiDARs. Remote Sens., 2019, 11, 2522.
3. Choukulkar A., Calhoun R., Billings B., Doyle J.D. A modified optimal interpolation technique for vector retrieval for coherent doppler LIDAR. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 2012, v. 9, pp. 1132-1136.
4. Cherukuru N.W., Calhoun R., Krishnamurthy R., Benny S., Reuder J., Flügge M. 2D VAR single Doppler lidar vector retrieval and its application in offshore wind energy. Energy Procedia, 2017, v. 137, pp. 497-504.
5. Qiu C.J., Shao A.M., Liu S. Xu Q. A two-step variational method for three-dimensional wind retrieval from single Doppler radar. Meteorol. Atmos. Phys., 2006, v. 91, pp. 1-8.
6. Xu Q., Gong J. Background error covariance functions for Doppler radial-wind analysis. Q.J.R. Meteorol. Soc., 2003, v. 129, pp. 1703-1720.
7. Menke R., Vasiljević N., Wagner J., Oncley S. P., Mann J. Multi-lidar wind resource mapping in complex terrain, Wind Energ. Sci., 2020, 5, 1059-1073.

8. Baranov N. Algorithms of 3D wind field reconstructing by lidar remote sensing data, numerical computations: Theory and Algorithms. NUMTA 2019. Lecture notes in Computer Science, 2020, v. 11974. Springer, Cham.
9. Newsom R.K., Brewer W.A., Wilczak J.M., Wolfe D.E., Oncley S.P., Lundquist J.K. Validating precision estimates in horizontal wind measurements from a Doppler lidar, Atmos. Meas. Tech., 2017, 10, 1229-1240.
10. Bodini N., Zardi D., Lundquist J.K.: Three-dimensional structure of wind turbine wakes as measured by scanning lidar, Atmos. Meas. Tech., 2017, 10, 2881-2896.
11. Banakh V.A., Smalikho I.N. Lidar studies of wind turbulence in the stable atmospheric boundary layer. Remote sens. 2018, 10, 1219.
12. Завьялов Ю.С. Методы сплайн-функций. / Ю.С. Завьялов, Б.И. Квасов, В.Л. Мирошниченко. – М.: Наука, 1980.
13. Квасов Б.И. Численные методы анализа и линейной алгебры / Б.И. Квасов. – Новосибирск, Новосиб. гос. ун-т, 2012.
14. Квасов Б.И. Методы изогеометрической аппроксимации сплайнами / Б.И. Квасов. – М.: Физматлит, 2006.
15. Самарский А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978.
16. Kim A.A., Orlov A.V., Luginya V.S., Baranov N.A. About the methodology and tools for meteo LIDAR metrological support, Proc. SPIE, 2020, vol. 11560, 26th International symposium on atmospheric and ocean optics, ftmospheric physics, 1156022.

Баранов Николай Алексеевич. *Доктор технических наук, главный научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, AuthorID; 14242, SPIN: 5876-2490, ORCID: 0000-0002-6419-2051, baranov@ians.aero, 119333, Москва, ул. Вавилова, 40.*

UDC 519.6
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.009

Recovering of the wind speed vector from lidar sensing data using the spline approximation

Nikolay A. Baranov

Dorodnicyn Computing Centre, FRC CSC RAS, Russia, Moscow, *baranov@ians.aero*

Abstract. The paper considers the problem of recovering the horizontal wind speed from lidar scanning data, which provide measurements of the radial component. An approach is proposed in which the wind speed components are calculated not at a single point, but at a given set of nodes located along a given direction. The proposed algorithm uses the idea of coordinate-wise calculation of vector components. Each component is calculated by the spline approximation of a specially selected subset of measurements. The results of numerical calculations are presented.

Keywords: wind speed recovering, spline approximation, lidar scanning

References

1. ISO 28902-2:2017. Air quality – Environmental meteorology – Part 2: Ground-based remote sensing of wind by heterodyne pulsed Doppler lidar.
2. Liu, Z., Barlow J.F., Chan P.-W., Fung J.C.H., Li Y., Ren C., Mak H.W.L., Ng E. A review of progress and applications of pulsed doppler Wind LiDARs. Remote Sens. 2019, 11, 2522.
3. Choukulkar A., Calhoun R., Billings B., Doyle J.D. A modified optimal interpolation technique for vector retrieval for coherent doppler LIDAR. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 2012, v. 9, pp. 1132-1136.
4. Cherukuru N.W., Calhoun R., Krishnamurthy R., Benny S., Reuder J., Flügge M. 2D VAR single Doppler lidar vector retrieval and its application in offshore wind energy. Energy Procedia, 2017, v. 137, pp. 497-504.
5. Qiu C.J., Shao A.M., Liu S. Xu Q. A two-step variational method for three-dimensional wind retrieval from single Doppler radar. Meteorol. Atmos. Phys. 2006, v. 91, pp. 1-8.

6. Xu Q., Gong J. Background error covariance functions for Doppler radial-wind analysis. Q.J.R. Meteorol. Soc. 2003, v. 129, pp. 1703-1720.
7. Menke R., Vasiljević N., Wagner J., Oncley S. P., Mann J. Multi-lidar wind resource mapping in complex terrain, Wind Energ. Sci., 2020, 5, 1059-1073.
8. Baranov N. Algorithms of 3D wind field reconstructing by lidar remote sensing data, numerical computations: Theory and Algorithms. NUMTA 2019. Lecture notes in Computer Science, 2020, v. 11974. Springer, Cham.
9. Newsom R.K., Brewer W.A., Wilczak J.M., Wolfe D.E., Oncley S.P., Lundquist J.K. Validating precision estimates in horizontal wind measurements from a Doppler lidar, Atmos. Meas. Tech., 2017, 10, 1229–1240.
10. Bodini N., Zardi D., Lundquist J.K.: Three-dimensional structure of wind turbine wakes as measured by scanning lidar, Atmos. Meas. Tech., 2017, 10, 2881–2896.
11. Banakh V.A., Smalikho I.N. Lidar studies of wind turbulence in the stable atmospheric boundary layer. Remote sens. 2018, 10, 1219.
12. Zavyalov Yu.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L. Metody splayn-funktsiy [Methods of spline functions]. M. Nauka [Moscow. Scince], 1981.
13. Kvasov B.I. Chislennyye metody analiza i lineynoy algebry [Numerical methods of analysis and linear algebra]. Novosibirsk, Novosib. gos. un-t [Novosibirsk-Novosib. State university], 2012.
14. Kvasov B.I. izogeometricheskoy approksimatsii splaynami [Methods of isogeometric approximation by splines]. M. Fizmatlit [Moscow.Fizmatlit], 2006.
15. Samarsky A.A., Nikolaev E.S. Metody resheniya setochnykh uravneniy [Methods for solving grid equations]. M. Nauka [Moscow. Scince], 1978.
16. Kim A.A., Orlov A.V., Luginya V.S., Baranov N.A. About the methodology and tools for meteo LIDAR metrological support, Proc. SPIE, 2020, vol. 11560, 26th International symposium on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics, 1156022.

Baranov Nikolay Alekseevich. *Doctor of Science, Dorodnicyn Computing Centre, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, AuthorID: 14242, SPIN: 5876-2490, ORCID: 0000-0002-6419-2051, baranov@ians.aero, 119333, 40, Vavilov str., Moscow, Russia.*

Статья поступила в редакцию 11.05.2023; одобрена после рецензирования 13.06.2023; принята к публикации 16.06.2023.
The article was submitted 05/11/2023; approved after reviewing 06/13/2023; accepted for publication 06/16/2023.

УДК 004.413.4
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.010

Анализ рисков при функционировании агрегатора управления спросом на электроэнергию

Колосок Ирина Николаевна, Коркина Елена Сергеевна

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *kolosok@isem.irk.ru*

Аннотация. В статье представлен граф-аналитический подход к проблеме минимизации рисков при функционировании агрегатора управления спросом на электроэнергию в условиях неблагоприятных внешних воздействий. Приведен пример составления диаграммы-бабочки, содержащей в себе проактивные (превентивные) и реактивные (восстановительные) меры защиты агрегатора. Предложен способ увеличения количества проактивных мер защиты с помощью перевода некоторых реактивных мер в разряд проактивных.

Ключевые слова: агрегатор спроса на электроэнергию, риски, непрерывность бизнеса, информационная безопасность

Цитирование: Колосок И.Н. Анализ рисков при функционировании агрегатора управления спросом на электроэнергию / И.Н. Колосок, Е.С. Коркина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2 (30). – С. 98-106. DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.010.

Введение. В основе управления спросом (УС) на электроэнергию (ЭЭ) заложена возможность сокращения потребителями энергосистемы количества энергопотребления в период пиковой нагрузки вместо того, чтобы энергосистема увеличивала объем доступной мощности [1], это выгоднее и эффективнее. Потенциал этого решения оценивается значительной долей сокращения потребления в пиковые периоды (до 15 % от общего объема потребления) [2]. Для осуществления механизма УС нужно скоординировать действия множества розничных потребителей, с этой целью создана специальная структура – агрегатор спроса на ЭЭ (Demand Response, DR-Агрегатор) [3].

В условиях неблагоприятных внешних воздействий (НВВ) – крупного технического сбоя, аварийного события, кибератаки – необходимо сохранить функционирование DR-Агрегатора, а для этого – минимизировать риски от последствий НВВ. Как показано в [4], «…анализ риска является частью системного подхода к принятию практических мер в решении задач уменьшения опасности для жизни человека, ущерба имуществу и окружающей среде, называемого в нашей стране обеспечением промышленной безопасности, а за рубежом – управлением риском». Управление рисками начинается с выявления и оценки возможных угроз. Затем осуществляется поиск альтернатив, то есть рассматриваются менее рискованные варианты [5]. Применительно к задаче минимизации рисков DR-Агрегатора в статье рассматриваются операционные (технико-технологические) и информационные риски.

Во втором разделе статьи рассматриваются основные риски в электроэнергетике, а также риски, являющиеся угрозой функционированию DR-Агрегатора. В третьем разделе обсуждается проблема «непрерывности бизнеса» (НБ) применительно к DR-Агрегатору. Раздел 4 содержит предложения авторов статьи по снижению рисков при функционировании DR-Агрегатора, разработанные на основе граф-аналитического Bow-Tie (диаграмма «Галстук-бабочка»).

2. Риски в электроэнергетике. Типовыми рисками в электроэнергетике являются: превышение расчетных нагрузок, аварийные отключения, неплатежи, срыв поставок топлива, снижение качества ЭЭ и другие (риски инвестирования, кредитования и т.д.) [6]. Риском может обернуться и «…отсутствие достоверной информации о потенциальном объеме спроса на электроэнергию …» [7]. В [8] перечислены множество рисков в электроэнергетике, являющихся последствиями переходного периода в отрасли: риск снижения потребления энергии

из-за создания потребителями собственной генерации; риск нарушения нормальных режимов при выводе объемов сбыта ЭЭ из состава сетевых компаний; риск снижения надежности и резкого роста затрат на поддержание оборудования в период жизненного цикла и многие другие виды рисков.

В [9] показано, что возрастание интереса к управлению операционными рисками, в частности, рисками бизнес-процессов, объясняется изменением траекторий жизненных циклов в производстве благодаря новым технологиям, поиску внутренних ресурсов для оптимизации производства, совершенствованию систем управления. Для эффективного управления рисками необходимо ясное представление, какие риски являются угрозой для конкретного вида бизнеса (здесь – DR-Агрегатора). Согласно типологии рисков [7], главными угрозами в бизнесе названы рыночные, кредитные, риски ликвидности, операционные риски, риски события. Здесь, не рассматривая финансовую сторону, отметим, что «…риск события – это возможные потери, обусловленные форс-мажорными условиями, изменениями в законодательстве, действиями управляющих структур и пр., а операционный риск – это убытки вследствие технических ошибок и отказов, проблем человеческого фактора, аварий, несанкционированного доступа к информационным системам и т.д.». При уточнении, что такое операционный риск во всем многообразии рисков, применяют классическое определение из Базеля II «…операционный риск – это потенциальные потери организации из-за неадекватных или ошибочных внутренних процессов и/или систем, действий персонала, а также внешние события» [9].

2.1. Риски в работе DR-Агрегатора. Целью DR-Агрегатора как механизма УС является координация взаимодействия потребителей, не являющихся участниками оптового рынка, с Системным Оператором, дающим команду на выполнение снижения энергопотребления по запросу оптового рынка [1, 3]. DR-Агрегатор объединяет разных потребителей: промышленных, сельско-хозяйственных, жилой сектор и др. Их взаимодействие скрепляется договорными обязательствами. Таким образом, механизм DR-Агрегатора может быть представлен в виде бизнес-процесса [10], в котором объединены: цель (запрос рынка Системному Оператору ЕЭС), управление (СО ЕЭС, руководящие и договорные нормативно-правовые документы, DR-Агрегатор как координатор), ресурсы (потребители ЭЭ как объекты управления и избытки ЭЭ у потребителей за счет снижения потребления в пиковые периоды), конечный продукт (получение рынком избытков ЭЭ). Применительно к задаче минимизации рисков DR-Агрегатора в статье рассматриваются риски событий (НВВ) и операционные риски (отклонения в работе IT-систем и систем контроля, человеческий фактор, низкий уровень и нарушение процессов производства, сбои в работе оборудования, его физический и моральный износ, заимствованные технологии, вычислительная техника (ВТ), программное обеспечение (ПО) и т.п.) (рис.1).

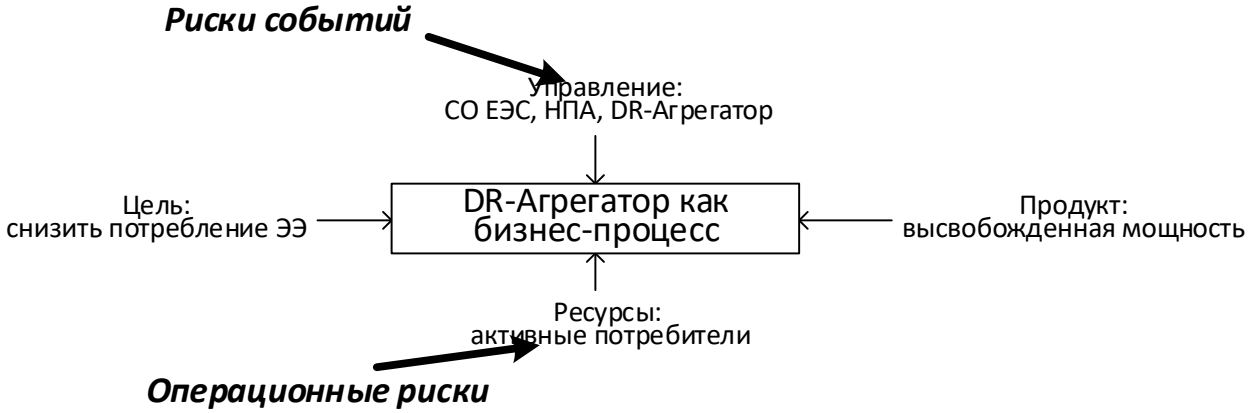


Рис. 1. Рассмотрение DR-Агрегатора как бизнес-процесса с учетом рисков

Для DR-Агрегатора и его участников существенными рисками из перечня [11] являются:

– в системе управления – риск неучета специфики местных условий и запаздывания принятия неотложных мер в аварийных ситуациях;
– в АСУ ТП – риск отставания отрасли по новейшим технологиям основного и вспомогательного оборудования и по информационному обеспечению (ПО полномасштабных АСУ ТП); риск снижения надежности и резкого роста затрат на поддержание оборудования из-за многочисленных остановов в АСУ ТП, например, вследствие ввода новых мощностей на основе зарубежных парогазовых установок, не подкрепленного отечественными запчастями; риск внедрения в аппаратуру незадокументированных функций из-за применения импортной электронно-компонентной базы;
– в разработке стандартов и регламентов – риск отставания в решении текущих проблем [11].

В [12] рассматривается связь между системой управления информационной безопасностью (ИБ) (плюс системой управления IT-инфраструктурой) и системой управления бизнесом. Обе системы управления используют анализ рисков, но в ИБ этот анализ проводится профилактически, а в бизнесе – во время чрезвычайной ситуации при аварийных процессах с точки зрения процесса обеспечения непрерывности бизнеса. «Кибер-риск – это первый шаг на пути понимания бизнесом важности кибербезопасности, как риска финансовых потерь» [13].

3. Непрерывность бизнеса. Как к бизнес-процессу к DR-Агрегатору применимо понятие «непрерывность бизнеса» (НБ) или BCM (Business Continuity Management), пришедшее на смену понятию «аварийное восстановление» (II-я половина 90х гг XX в.). НБ означает, что для сохранения функциональности недостаточно ограничиться созданием резерва оборудования (холодного, горячего или зеркального и т.п.), в НБ речь идет о бесперебойной работе всего предприятия (оборудование, технологические процессы, IT-системы, средства коммуникации и т.д.) [14]. В круг решаемых задач НБ входят только те инциденты, которые угрожают бизнесу. Так, критической является потеря доступа к IT-системам [15].

В России вопросы, связанные с обеспечением непрерывности бизнеса, рассматриваются, в основном, как проблемы информационной безопасности или часть задач IT-инфраструктуры [16]. Необходимость создания программы НБ возникает при намерении бизнеса повысить уровень управления IT-сервисами. При создании программы НБ удается оценить угрозы/чрезвычайные ситуации; оценить существующие уязвимости IT-инфраструктуры (управление рисками); минимизировать вероятность нештатных ситуаций и их воздействие на деятельность организации, проактивно идентифицировать возможные последствия нештатной ситуации.

При разработке стратегии НБ последовательно осуществляется ряд этапов, важным среди которых является анализ воздействия на бизнес (по сути – анализ рисков). Анализ воздействия на бизнес позволяет понять, какое влияние могут оказать различные виды негативных событий (нарушений, отказов или разрушений) на основные направления деятельности компании и ключевые бизнес-процессы. Принимая во внимание развитие информационных технологий и проникновение этих технологий в промышленность, в том числе, в электроэнергетику, мы рассматриваем участников DR-Агрегатора как кибер-физическую систему (КФС) [17], и нам важны обе подсистемы, составляющие любую КФС, – кибер- и физическая [18]. Поэтому мы должны рассматривать проблемы и кибербезопасности (кибер-риски), и производственной безопасности (операционные риски). В область кибер-рисков входит и цифровизация бизнеса, и зависимость областей безопасности друг от друга, например, физической безопасности от Интернета вещей. Риски, возникающие в IT-системах предприятий, являются относительно новыми, но неизменно присутствуют в их системах управления. Каким образом можно снизить эти риски? Например, в [19] предлагается разделить все риски бизнеса на 2 категории – те, которые зависимы от IT-систем, и те, которые от них не зависят.

4. Управление рисками DR-Агрегатора. Существуют различные подходы к анализу рисков. В [7] разработана графическая нотация процесса управления рисками, отображающая все его составляющие: источники рисков, риск-события, риск-ситуации, мероприятия по снижению рисков, мероприятия по устранению последствий реализации рисков и др. Для сохранности бизнеса создается система управления рисками (СУР), включающая в себя структурный, процессный и системный аспекты. Эти аспекты позволяют понять причины и обстоятельства, приводящие к риск-событиям. *Структурный* аспект иллюстрируется построением дерева отказов, на котором видны взаимосвязи элементов всей структуры объекта. *Процессный* аспект представлен бизнес-процессами. *Системный* аспект показывает взаимодействие объекта с окружающей средой. Координация этих аспектов позволяет выработать комплексный подход по управлению рисками, выполняющийся поэтапно во времени. На первом этапе проводятся *прелиминарные* (превентивные) мероприятия, выполняемые заранее для того, чтобы предотвратить риск-событие или снизить возможность его наступления, например, перестроить структуру системы (объекта). При осуществлении рисков проводятся *прецедентные* (восстановительные) мероприятия, к которым вынуждены прибегнуть с целью недопущения дальнейшего развития аварийных ситуаций, устранения последствий, восстановления работоспособности. Хорошо известными аналитическими методами при изучении аварийных ситуаций являются метод дерева отказов [20] и метод дерева событий [21]. Так, в [4] применен метод дерева отказов, определяющий структуру и последовательность вероятностных расчетов по оценке риска возникновения возможных аварий, метод анализа дерева событий, рассматривающий события, влекущие за собой аварию, и метод анализа причинно-следственных связей, предусматривающий построение расчетной диаграммы, которая связывает отказы и опасные события в причинно-следственные цепочки.

4.1. Проактивные защитные меры. Для иллюстрации проактивных защитных мер в статье рассматривается дерево угроз и уязвимостей DR-Агрегатора. В области ИБ и кибербезопасности ***деревья угроз и деревья атак*** строятся на основе дерева отказов**,** но от дерева отказов они отличаются наличием нижнего уровня – уровня защитных мер. С позиций ИБ риски функционирования DR-Агрегатора – это угрозы прерывания, искажения и потери информации, критически важной для управления функционированием всего бизнес-процесса и/или его отдельных звеньев (кибер- и физических подсистем его участников). На рис. 2 представлено ***дерево угроз*** с учетом всех компонентов DR-Агрегатора как бизнес-процесса. Структура дерева:

- верхний уровень (корень дерева, цель) – нарушение функционирования DR-Агрегатора (анализ рисков непрерывности бизнеса),
- второй уровень (основные компоненты) – представление DR-Агрегатора как КФС (подсистемы: управления спросом, техническая и информационно-коммуникационная),
- третий уровень – уровень возможных уязвимостей,
- четвертый уровень – проактивные меры защиты DR-Агрегатора.

В качестве проактивных мер (рис.2.) для подсистемы управления могут быть: четко работающий алгоритм назначения фиксированных или плавающих цен, свободный доступ потребителей к участию в управлении спросом, безукоризненно составленные договоры между потребителями и агрегатором. В технической подсистеме должен быть предусмотрен строгий порядок обновления оборудования, переход на импортозамещение, в части защиты от НВВ и ошибок персонала – метод логико-вероятностного анализа, позволяющий выразить логику безотказной работы компонентов технической подсистемы с помощью вероятностей работоспособности узлов подсистемы [18]. Для информационно-коммуникационной подсистемы проактивными мерами являются структура сетецентрического управления (СЦУ) и организация кибер-физического управления (КФУ) на нижнем уровне СЦУ, а также методы искусственного интеллекта (ИИ) и машинное обучение (МО).

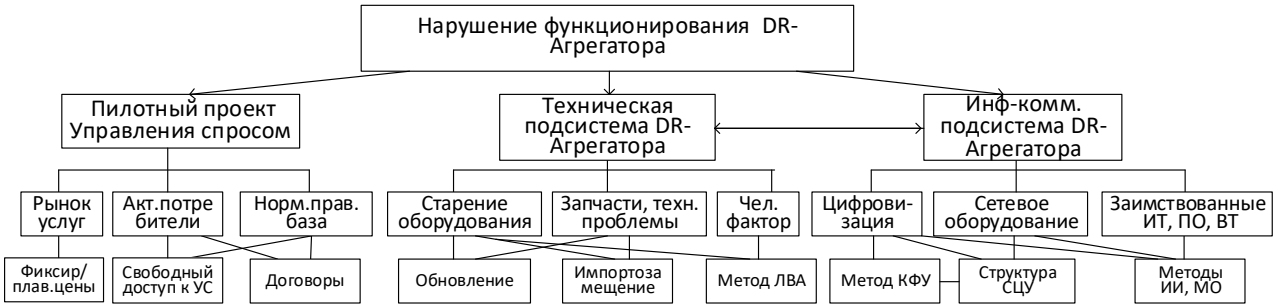


Рис. 2. Дерево угроз функционированию DR-Агрегатора

4.2. Реактивные меры защиты. Для анализа последствий от произошедших НВВ применяется метод *дерева событий* (ДС): типичное положение ДС – горизонтальное, в левой части ДС находится само событие, а справа от него располагаются реактивные меры защиты для восстановления DR-Агрегатора как бизнеса. Предположим, что в одном из кластеров DR-Агрегатора произошли два инцидента: у активного потребителя 1 – полное отключение электричества (сбой в физической подсистеме), у активного потребителя *n* – сработала зловредная закладка в операционной системе (сбой в информационной подсистеме) (рис.3).

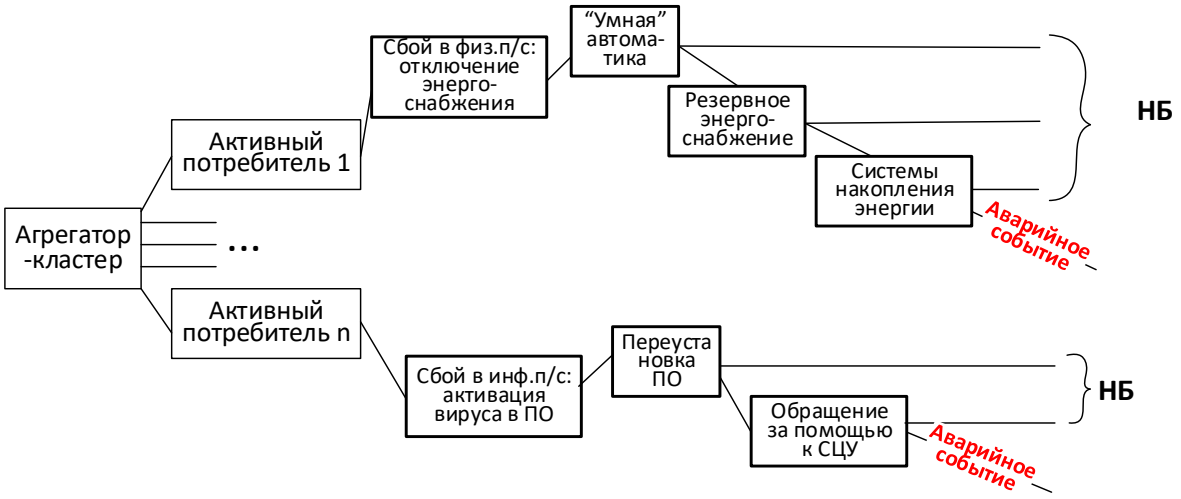


Рис. 3. Дерево событий DR-Агрегатора для восстановления НБ:
сбой в физической подсистеме активного потребителя *1*,
сбой в информационной подсистеме активного потребителя *n*.

Анализ мер по восстановлению этих потребителей с помощью ДС показывает, что если реактивные меры по восстановлению работоспособного состояния не привели к успеху, то возникает аварийное событие и реальная угроза бизнесу.

4.4. Снижение рисков при функционировании DR-Агрегатора. В [18] нами рассмотрен вопрос живучести DR-Агрегатора. В электроэнергетике под живучестью понимается свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей [22]. «Повышению живучести DR-Агрегатора могут способствовать такие факторы, как рационально сформированная структура, правильно организованная система сетецентрического управления (СЦУ) этой структурой и реализация киберфизического управления (КФУ) непосредственно на нижнем уровне иерархии СЦУ – на уровне потребителей ЭЭ (участников DR-Агрегатора)» [18] К выявлению слабых звеньев структуры в [12] применен логико-вероятностный анализ (ЛВА). Рациональная кластерная структура DR-Агрегатора и предложенные виды управления могут быть предупредительными (проактивными, или, как выше сказано, прелиминарными) мерами борьбы с операционными и кибер-рисками. Возможность разработать реактивные (или прецедентные) меры борьбы предлагается осуществить следующим образом.

Для решения этой задачи можно использовать подход Bow-Tie (диаграмма «Галстук-бабочка») [23]. Суть подхода заключается в анализе и отображении источников рисков. Главный узел (в центре) – это предмет обсуждения (проблема), здесь: непрерывность бизнеса DR-Агрегатора. Левое крыло включает в себя дерево угроз, при этом проактивные меры защиты переместились с нижнего уровня дерева угроз ближе к главному узлу – теперь это защитные барьеры. Правое крыло – это видоизмененное дерево событий с последствиями НВВ, обозначенного над главным узлом. Реактивные меры защиты также образуют защитные барьеры. Такую диаграмму удобно строить в процессе анализа рисков, а потом обновлять, достраивать и актуализировать в ходе всего жизненного цикла DR-Агрегатора как бизнес-процесса.

Практически, Bow-Tie объединяет оба дерева (угроз и событий) (рис.4).

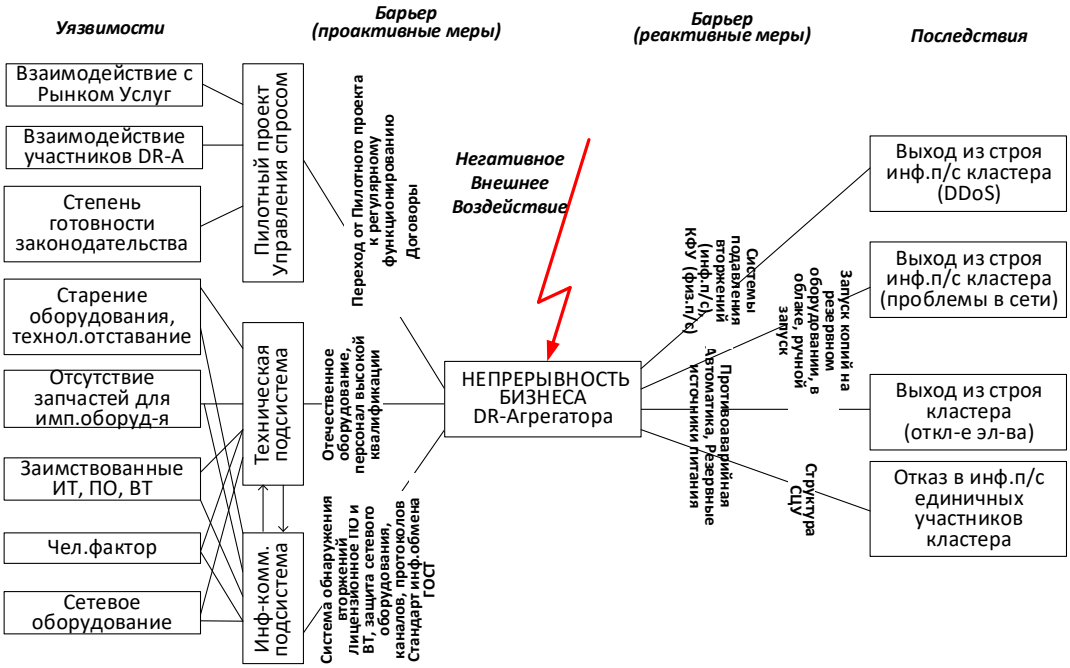


Рис. 4. Диаграмма «Галстук-бабочка» для непрерывности бизнеса DR-Агрегатора

В [24] показано, что в области ИБ реактивные механизмы защиты (реакция на происшедшую аварию) весьма распространены, и они признаются достаточно эффективными, но взаимодействие цифровых технологий и КФС становится всё сложнее, значит, растет необходимость в разработке новых проактивных мер или в переводе эффективных реактивных мер защиты в число проактивных мер.

Заключение. В статье DR-Агрегатор рассматривается как бизнес-процесс, поэтому требуется разработка методологии обеспечения непрерывности бизнеса (НБ). Специфика НБ заключается в том, что в круг задач НБ входят только инциденты, угрожающие бизнесу. В ходе работы с использованием диаграммы «Галстук-бабочка» сформулированы меры проактивной и реактивной защиты DR-Агрегатора в условиях негативных внешних воздействий. В рамках методологии обеспечения НБ при оценке рисков DR-Агрегатора можно определить его наиболее уязвимые компоненты и усилить упреждающие меры по их защите.

Благодарности. Исследование проводится в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований Российской Федерации на 2021-2030 годы (рег. № АААА-А21-121012190027-4).

Список источников

1. Концепция функционирования агрегаторов распределенных энергетических ресурсов в составе Единой энергетической системы России. Агрегаторы управления спросом на электроэнергию. – URL:

https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr_agregator_concept.pdf (дата обращения: 11.04.2023).
2. Moreton A. What is demand response? Available at: https://arena.gov.au/blog/what-is-demand-response/ (accessed: 04/11/2023).
3. Управление спросом в электроэнергетике России: открывающиеся возможности. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/publication/EnergyNet_2019.pdf (дата обращения: 10.02.2023).
4. Феоктистова О.Г. Актуальность оценки производственного риска на авиапредприятиях / О.Г. Феоктистова, И.К. Туркин, С.В. Баринов // Научный Вестник МГТУ ГА, 2017. – № 20(4). – С. 162-173.
5. Одинцова М.А. Методика управления рисками для малого и среднего бизнеса. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-upravleniya-riskami-dlya-malogo-i-srednego-biznesa (дата обращения: 02.05.2023).
6. Колесников А.М. Анализ рисков предприятий электроэнергетики / А.М. Колесников, А.В. Баранов // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. СПбГЭУ, 2013. – № 4 (18). – С. 154-158.
7. Сеньков А.В. Графическая нотация для представления процесса управления комплексными рисками / А.В. Сеньков // Современные наукоемкие технологии, 2016. – № 12-1. – С. 72-81. – URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36479 (дата обращения: 02/05/2023).
8. Жилкина Ю.В., Воденников Д.А. Риски в энергетике: анализ практики управления на рынке электроэнергии. – URL: http://cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b3_rus/materials/library/%D0%96%D0%B8%D0%BB%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B0_.pdf (дата обращения: 11.04.2023).
9. Уварова Г. Карту рисков бизнес-процессов можно сделать практичной. – URL: https://www.eg-online.ru/article/274036/ (дата обращения: 15.05.2023).
10. Колосок И.Н. Demand Response агрегатор как бизнес-процесс в условиях цифровизации энергетики / И.Н. Колосок, Е.С. Коркина // Релейная защита и автоматизация, 2021. – № 4. – С. 22-27.
11. Кудрявый В.В. Риски и угрозы российской электроэнергетики. Пути преодоления. – URL: https://www.ruscable.ru/article/The_risks_and_threats_of_the_Russian_power_industry/ (дата обращения: 02.03.2023).
12. Boehmer W. Analysis of strongly and weakly coupled management systems in information security. 2010, available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/5633657 (accessed: 03/02/2023).
13. Кибер-риски: как понимать и управлять. – URL: https://10guards.com/ru/articles/cyber-risks/ (дата обращения: 12.03.2023).
14. Роль информационной безопасности в обеспечении непрерывности бизнеса. – URL: http://www.interface.ru/home.asp?artId=40308 (дата обращения: 20.02.2023).
15. Качуров Е. Семь шагов к непрерывности бизнеса. 2015. – URL: https://habr.com/ ru/company/softline/blog/261053/ (дата обращения: 02.03.2023).
16. Мусатов К. Непрерывность бизнеса. Подходы и решения. – URL: https://www.jetinfo.ru/nepreryvnost-biznesa-podkhody-i/ (дата обращения: 15.05.2023).
17. Воропай Н.И. Проблемы уязвимости и живучести киберфизических электроэнергетических систем / Н.И. Воропай, И.Н. Колосок, Е.С. Коркина, А.Б. Осак // Энергетическая политика, 2018. – № 5. – С. 53-61.
18. Колосок И.Н. Применение логико-вероятностного анализа для повышения живучести Агрегатора управления спросом на электроэнергию / И.Н. Колосок, Е.С. Коркина // Энергетик, 2022. – № 12. – С. 9-12.
19. «Росэлектроника» представила киберзащищенную систему для цифровой электросети. – URL: https://www.cnews.ru/news/line/2019-07-09_roselektronika_predstavila_kiberzashchishchennuyu (дата обращения: 09.07.2019).
20. Гук Ю.Б. Расчет надежности электроэнергетических установок / Ю.Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
21. Надежность технических систем и техногенный риск. Дерево событий. – URL: http://www.obzh.ru/nad/6-9.html (дата обращения: 02.03.2023).
22. Руденко Ю.Н. Надежность систем энергетики / Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков. – Н-ск: Наука, 1989. – 328 с.
23. Анализ «галстук-бабочка». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_406016/79d895387ec905fc042eccdcc6fce3b320e9b18d/ (дата обращения: 27.01.2023).
24. Уткин Н. Интервью с экспертом: «Безопасность кибер-физических систем: требуются комплексный подход и проактивные механизмы». – URL: https://safe-surf.ru/specialists/article/5291/668770/ (дата обращения: 02.03.2023).

Колосок Ирина Николаевна. *Д.т.н., в.н.с., ИСЭМ СО РАН. Область научных интересов –математические модели, методы и алгоритмы для решения комплекса задач информационного обеспечения для мониторинга и диспетчерского управления интеллектуальной энергосистемой (ИЭС) на базе современных средств измерений*

и новых информационных технологий; кибербезопасность и киберфизическая устойчивость ИЭС и ее объектов. AuthorID: 48007871, ORCID: 0000-0002-2843-4455, kolosok@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Коркина Елена Сергеевна. *К.т.н., с.н.с. ИСЭМ СО РАН. Область научных интересов –кибербезопасность объектов электроэнергетики, синхронизированные векторные измерения, оценивание состояния электроэнергетических систем, кибер-физические системы. AuthorID: 24577537100, SPIN: 8084-7363, ORCID: 0000-0001-6488-5774, korkina@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.*

UDC 004.413.4
DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.010

Risk analysis of the Demand Response Aggregator

Irina N. Kolosok, Elena S. Korkina

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, *kolosok@isem.irk.ru*

Abstract. The paper presents a graph-analytical approach to the problem of minimizing risks in the Demand Response (DR) Aggregator's operation under adverse external influences. An example of drawing up a Bow-Tie diagram containing proactive and reactive protection measures of the DR-Aggregator is given. That approach is proposed to increase the number of proactive protection measures by transferring some reactive measures to the category of proactive.

Keywords: demand Response Aggregator, risks, business continuity, information security

Acknowledgements: This study was carried out within the framework of the state assignment project (No. FWEU-2021-0001) of the program of fundamental research of the Russian Federation for 2021-2030 (Reg. No. AAAA-F21-121012190027-4).

References

1. Koncepciya funkcionirovaniya agregatorov raspredelennyh energeticheskih resursov v sostave Edinoj energeticheskoj sistemy Rossii. Agregatory upravleniya sprosom na elektroenergiyu [The concept of functioning of aggregators of distributed energy resources as part of the Unified Energy System of Russia. Aggregators of electricity demand management]. Available at: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr_agregator_concept.pdf (accessed: 04/11/2023)
2. Moreton A. What is demand response? Available at: https://arena.gov.au/blog/what-is-demand-response/ (accessed: 04/11/2023)
3. Upravlenie sprosom v elektroenergetike Rossii: otkryvayushchiesya vozmozhnosti [Demand side management in the Russian electric power industry: emerging opportunities]. Available at: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/publication/EnergyNet_2019.pdf (accessed: 02/10/2023)
4. Feoktistova O.G., Turkin I.K., Barinov S.V. Aktual'nost' ocenki proizvodstvennogo riska na aviapredpriyatiyah [The relevance of the assessment of industrial risk in aviation enterprises]. Nauchnyj Vestnik MGTU GA [Scientific Bulletin of MSTU GA], 2017, no. 20 (4), pp. 162-173.
5. Odincova M.A. Metodika upravleniya riskami dlya malogo i srednego biznesa [Risk management methodology for small and medium-sized businesses]. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-upravleniya-riskami-dlya-malogo-i-srednego-biznesa (accessed: 02/05/2023).
6. Kolesnikov A.M., Baranov A.V. Analiz riskov predpriyatij elektroenergetiki [Risk analysis of electric power companies]. Teoriya i praktika servisa: ekonomika, social'naya sfera, tekhnologii, SPbGEU [Theory and practice of service: economics, social sphere, technology, SPbSUE], 2013, no. 4 (18), pp.154-158
7. Senkov A.V. Graficheskaya notaciya dlya predstavleniya processa upravleniya kompleksnymi riskami [Graphical notation for presenting the process of complex risk management]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern High Technologies], 2016, no. 12 (1), pp. 72-81, available at: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36479 (accessed: 02/05/2023).
8. Zhilkina Yu.V., Vodennikov D.A. Riski v energetike: analiz praktiki upravleniya na rynke elektroenergii [Risks in the energy sector: analysis of management practices in the electricity market]. Available at: http://cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b3_rus/materials/library/%D0%96%D0%B8%D0%BB%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B0_.pdf (accessed: 04/11/2023).
9. Uvarova G. The risk map of business processes can be made practical [The risk map of business processes can be made practical]. Available at: https://www.eg-online.ru/article/274036/ (accessed: 05/15/2023).

10. Kolosok I.N., Korkina E.S. Response agregator kak biznes-protsess v usloviyakh tsifrovizatsii energetiki [Demand Response Aggregator as a business process under the energy digitalization]. Relejnaya zashchita i avtomatizaciya [Relay protection and automation], 2021, no. 4, pp. 22-27.
11. Kudrjavyj V.V. Riski I ugrozy rossijskoj electroenergetiki. Puti preodolenija [Risks and threats of the Russian electric power industry. Ways to overcome]. Available at: https://www.ruscable.ru/article/ The_risks_ and_ threats_of_the_Russian_power_industry/ (accessed: 03/02/2023).
12. Boehmer W.Analysis of strongly and weakly coupled management systems in information security. 2010, available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/5633657 (accessed: 03/02/2023).
13. Kiber-riski: kak ponimat' i upravlyat' [Cyber risks: how to understand and manage]. Available at: https://10guards.com/ru/articles/cyber-risks/ (accessed: 03/12/2023)
14. Rol' informacionnoj bezopasnosti v obespechenii nepreryvnosti biznesa [The role of information security in ensuring business continuity]. Available at: http://www.interface.ru/home.asp?artId=40308 (accessed: 02/20/2023).
15. Kachurov E. Sem' shagov k nepreryvnosti biznesa [Seven steps to the business continuity], 2015, available at: https://habr.com/ru/company/softline/blog/261053/ (accessed: 03/02/2023).
16. Musatov K. Nepreryvnost' biznesa. Podhody i resheniya [Business continuity. Approaches and solutions]. Available at: https://lib.itsec.ru/articles2/control/ot-ypravleniya-incidentami-ib-cherez-neprerivnost (accessed: 15/05/2023)
17. Voropai N.I., Kolosok I.N., Korkina E.S., Osak A.B. Problemy uyazvimosti i zhivuchesti kiberfizicheskih elektroenergeticheskih sistem [Problems of vulnerability and survivability of cyberphysical electric power systems]. Energeticheskaya politika [Energy policy], 2018, no. 5, pp. 53-61.
18. Kolosok I.N., Korkina E.S. Application of logical-probabilistic analysis to increase the survivability of the Demand Response Aggregator [Primenenie logiko-veroyatnostnogo analiza dlya povysheniya zhivuchesti Agregatora upravleniya sprosom na elektroenergiyu]. Energetik [Power & Electrical engineering], 2022, no. 12, pp. 9-12.
19. "Roselektronika" predstavila kiberzashchishchennuju sistemu dlya cifrovoj electroseti ["Roselektronika" presented a cyber-protected system for the digital power grid]. Available at: https://www.cnews.ru/ news/line/ 2019-07-09_roselektronika_predstavila_kiberzashchishchennuyu (accessed: 07/09/ 2019).
20. Guk Yu.B. Raschet nadezhnosti electroenergeticheskih ustanovok [Calculation of the reliability of electric power plants], Leningrad, Energoatomizdat, 1988, 224 p.
21. Nadezhnost' tekhnicheskih sistem i tekhnogennyj risk. Derevo sobytij [Reliability of technical systems and technogenic risk. Event Tree]. Available at: http://www.obzh.ru/nad/6-9.html (accessed: 03/02/2023).
22. Rudenko Yu.N., Ushakov I.A. Nadezhnost' sistem energetiki. [Reliability of energy systems]. Novosibirsk, Nauka [Novosibirsk, Science], 1989, 328 p.
23. Bow Tie Analysis, available at: http://www.consultant.ru/docment/cons_doc_LAW_406016/79d895387 ec905 fc042 eccdcc6fce3b320e9b18d/ (accessed: 27/01/2023).
24. Utkin N. nterv'yu s ekspertom: «Bezopasnost' kiber-fizicheskikh sistem: trebuyutsya kompleksnyy podkhod i proaktivnyye mekhanizmy» [Interview with an expert: "Security of cyber-physical systems: an integrated approach and proactive mechanisms are required"]. Available at: https://safe-surf.ru/specialists/article/5291/668770/ (accessed: 03/02/2023).

Kolosok Irina Nikolaevna. *Doctor of Sciences, Leading Researcher, MESI SB RAS. Scientific interests area – mathematical models, methods and algorithms for solving complex tasks of information support for monitoring and dispatching control of an intelligent power system (IES) based on modern measuring instruments and new information technologies, cybersecurity and cyberphysical stability of the IES and its objects. AuthorID: 48007871, ORCID: 0000-0002-2843-4455, kolosok@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermontov str.,130.*

Korkina Elena Sergeevna. *PhD, Senior Researcher, MESI SB RAS. Scientific interests area – cybersecurity of electric power facilities, synchronized vector measurements, assessment of the state of electric power systems, cyberphysical systems. AuthorID: 24577537100, SPIN: 8084-7363, ORCID: 0000-0001-6488-5774, korkina@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermontov str.,130.*

Статья поступила в редакцию 06.04.2023; одобрена после рецензирования 16.05.2023; принята к публикации 16.06.2023.
The article was submitted 04/06/2023; approved after reviewing 05/16/2023; accepted for publication 06/16/2023.

УДК 519.257+614.849
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.011

Расчёт комплексного показателя пожарной опасности в административных территориях Иркутской области

Аршинский Леонид Вадимович[1], Гармышев Владимир Викторович[2], Михеев Максим Сергеевич[1], Сафонов Сергей Викторович[1]

[1]Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *larsh@mail.ru*
[2]Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск

Аннотация. Рассматривается обстановка с пожарами на территориях Иркутской области в 2010-2021 годах. Анализ выполнялся с помощью комплексного показателя пожарной опасности, позволяющего оценить обстановку на территории относительно уровня пожарной опасности по субъекту в целом (Иркутская область). Отмечены наиболее и наименее благополучные территории. Показано, что основная часть территорий характеризуется повышенным уровнем пожарной опасности, а отдельные территории в некоторые годы – высоким и чрезвычайным. Так как используемый для расчётов комплексный показатель характеризует обстановку в статике, для оценки динамики предложено выполнить аналогичный расчёт относительно базового 2010 года. Показано, что в динамике ситуация выглядит несколько лучше, но изменения не принципиальные. Сделано предположение, что высокий уровень пожарной опасности в области связан с высокой долей деревянной застройки и продолжительным (более полугода) отопительным периодом при слабой обеспеченности средствами противопожарной защиты жилого сектора, где происходит до 80 % пожаров.

Ключевые слова: пожарная опасность, пожары, Иркутская область, риски, комплексный показатель пожарной опасности

Цитирование: Аршинский Л.В. Расчёт комплексного показателя пожарной опасности в административных территориях Иркутской области / Л.В. Аршинский, В.В. Гармышев, М.С. Михеев, С.В. Сафонов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 107-120. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.011.

Введение. Обстановка с пожарами на той или иной территории – один из важных факторов, влияющих на условия жизни населения. Каждый пожар – это социальный и экономический ущербы, потери не только финансовые и имущественные, но и возможные жертвы среди населения, фактор, влияющий на общее восприятие территории как социально-привлекательной. Для уменьшения таких ущербов территориальными органами, государственными службами проводятся мероприятия по профилактике пожаров, их своевременной ликвидации, преодоления последствий, если пожары произошли.

Как известно, основным способом уменьшения последствий пожаров является их профилактика [1-3]. Она требует меньше вложений и не сопровождается такими социально-экономическими и репутационными потерями, как борьба с уже допущенными пожарами, особенно, если эти пожары становятся масштабными, как это было на территориях Иркутской области (ИО) и Бурятии в 2015 г. или в Саха(Якутии) в 2021 г., когда массово горели леса и возникла угроза населённым пунктам и объектам инфраструктуры.

Однако профилактическая работа затруднительна, если госорганы и территориальная администрация не владеют информацией об общей обстановке с пожарами, месте территории среди других административно-территориальных образований (АТО) в этом вопросе. Безусловно, статистика у них имеется. Однако не всегда эта статистика становится аналитической, когда первичная информация превращается в расчётно-аналитические показатели, которые можно положить в основу управленческих решений.

Одним из таких показателей являются риски, для расчёта которых существует немало методик и которые используются для оценки состояния различного рода систем (технических,

экономических и т.д.) [4-20]. В частности, в [5] описан международный опыт работы с этим показателем. Системное описание рисков применительно к вопросам безопасности жизнедеятельности выполнено в [6-8]. Существует учебная литература по этому вопросу (см. напр. [8-11]).

Понятие риска широко используется в пожарной безопасности [11-17, 19, 20]. Особенностью представленного здесь подхода является работа с комплексными показателями пожарной опасности. Комплексный показатель – это, по существу, специальным образом построенный агрегат частных рисков. Первые исследования по комплексным показателям выполнены Н.Н. Брушлинским и его учениками [11-18]. Их продолжением являются работы [19, 20], они положены в основу данного исследования.

Достоинством подхода и полученного на его основе алгоритма оценивания является то, что он не только рассчитывает частные риски, например риск для человека, проживающего в *i*-м АТО, столкнуться с пожаром $R_1^{\text{АТО}_i}$, риск погибнуть на пожаре $R_2^{\text{АТО}_i}$, и т. д., но и формирует комплексный показатель пожарной опасности в *i*-м АТО, на основании которого можно количественно оценить место того или иного образования среди других и сравнить ситуацию в нём с ситуацией по субъекту в целом.

Использование этого алгоритма для анализа ситуации с пожарами в Иркутской области является предметом данной статьи.

1. Алгоритм расчёта комплексного показателя пожарной опасности на территории. Согласно [19, 20], расчёт комплексного показателя пожарной опасности состоит из следующих шагов (сохраняем авторские обозначения).

1. Сбор данных о последствиях пожаров на территории АТО за соответствующий период времени (берётся календарный год). Сюда входят:

– $N_{\text{нас}}^{\text{АТО}_i}$ – количество людей, проживающих на *i*-й территории в соответствующем году, чел.;
– $n_{\text{об}}^{\text{АТО}_i}$ – общее количество объектов техносферы на *i*-й территории в соответствующем году, ед.
– $n_{\text{п}}^{\text{АТО}_i}$ – общее количество пожаров на *i*-й территории, ед./год;
– $N_{\text{г}}^{\text{АТО}_i}$ – общий количество погибших на пожарах, чел./год;
– $N_{\text{тр}}^{\text{АТО}_i}$ – общий количество травмированных при пожарах, чел./год;
– $n_{\text{ус}}^{\text{АТО}_i}$ – общий количество уничтоженных строений, объектов, ед./год;
– $C_{\text{у}}^{\text{АТО}_i}$ – общий прямой ущерб от пожаров, руб./год;

2. Расчёт на основе предыдущих значений аналогичных показателей для субъекта, в качестве которого здесь выступает Иркутская область:

– $N_{\text{нас}}^{\text{ИО}}$ – количество людей, проживающих в области в соответствующем году, чел.;
– $n_{\text{об}}^{\text{ИО}}$ – общее количество объектов техносферы в области в соответствующем году, ед.
– $n_{\text{п}}^{\text{ИО}}$ – общее количество пожаров на территории области, ед./год;
– $N_{\text{г}}^{\text{ИО}}$ – общий количество погибших на пожарах, чел./год;
– $N_{\text{тр}}^{\text{ИО}}$ – общий количество травмированных при пожарах, чел./год;
– $n_{\text{ус}}^{\text{ИО}}$ – общий количество уничтоженных строений, объектов, ед./год;
– $C_{\text{у}}^{\text{ИО}}$ – общий прямой ущерб от пожаров, руб./год;

3. Оценка рисков на территориях области за год (территориальные риски):

– риск для человека столкнуться с пожаром и его опасными факторами на *i*-й территории:

$$R_1^{\text{АТО}_i} = \frac{n_{\text{п}}^{\text{АТО}_i}}{N_{\text{нас}}^{\text{АТО}_i}} \text{ пожар·человек}^{-1}$$

– риск для человека погибнуть на одном пожаре за единицу времени на *i*-й территории:

$$R_2^{\text{АТО}_i} = \frac{N_{\text{г}}^{\text{АТО}_i}}{n_{\text{п}}^{\text{АТО}_i}} \text{ жертва·пожар}^{-1}.$$

– риск гибели людей (риск для отдельного человека погибнуть от опасных факторов пожара в единицу времени на *i*-й территории):

$$R_3^{\text{АТО}_i} = R_1^{\text{АТО}_i} \cdot R_2^{\text{АТО}_i} = \frac{N_{\text{г}}^{\text{АТО}_i}}{N_{\text{нас}}^{\text{АТО}_i}} \text{ жертва·человек}^{-1}.$$

– риск для человека получить травму в результате пожара в единицу времени на *i*-й территории:

$$R_{\text{тр}}^{\text{АТО}_i} = \frac{N_{\text{тр}}^{\text{АТО}_i}}{N_{\text{нас}}^{\text{АТО}_i}} \text{ жертва·человек}^{-1}.$$

– риск возникновения пожара в единицу времени на объекте на *i*-й территории:

$$R_{\text{вп}}^{\text{АТО}_i} = \frac{n_{\text{п}}^{\text{АТО}_i}}{n_{\text{об}}^{\text{АТО}_i}} \text{ пожар·объект}^{-1}.$$

– риск уничтожения строений, объектов техносферы при пожаре в единицу времени на *i*-й территории:

$$R_{\text{ус}}^{\text{АТО}_i} = \frac{n_{\text{ус}}^{\text{АТО}_i}}{n_{\text{п}}^{\text{АТО}_i}} \text{ объект·пожар}^{-1}.$$

– риск прямого материального ущерба от пожаров в единицу времени на *i*-й территории

$$R_{\text{у}}^{\text{АТО}_i} = \frac{C_{\text{у}}^{\text{АТО}_i}}{n_{\text{п}}^{\text{АТО}_i}} \text{ руб.·пожар}^{-1}.$$

4. Оценка аналогичных рисков по субъекту в целом (Иркутская область):

$$R_1^{\text{ИО}} = \frac{n_{\text{п}}^{\text{ИО}}}{N_{\text{нас}}^{\text{ИО}}} \text{ пожар·человек}^{-1};$$

$$R_2^{\text{ИО}} = \frac{N_{\text{г}}^{\text{ИО}}}{n_{\text{п}}^{\text{ИО}}} \text{ жертва·пожар}^{-1};$$

$$R_3^{\text{ИО}} = R_1^{\text{ИО}} \cdot R_2^{\text{ИО}} \text{ жертва·человек}^{-1};$$

$$R_{\text{тр}}^{\text{ИО}} = \frac{N_{\text{тр}}^{\text{ИО}}}{N_{\text{нас}}^{\text{ИО}}} \text{ жертва·человек}^{-1};$$

$$R_{\text{вп}}^{\text{ИО}} = \frac{n_{\text{п}}^{\text{ИО}}}{n_{\text{об}}^{\text{ИО}}} \text{ пожар·объект}^{-1};$$

$$R_{\text{ус}}^{\text{ИО}} = \frac{n_{\text{ус}}^{\text{ИО}}}{n_{\text{п}}^{\text{ИО}}} \text{ объект·пожар}^{-1};$$

$$R_{\text{у}}^{\text{ИО}} = \frac{C_{\text{у}}^{\text{ИО}}}{n_{\text{п}}^{\text{ИО}}} \text{ руб.·пожар}^{-1}.$$

Для области все необходимые для расчётов значения берутся суммированием соответствующих показателей по территориям.

5. На основе полученных рисков вычисляются парные интегральные пожарные риски:

– парный интегральный риск гибели людей на пожаре на *i*-й территории области:

$$\Pi_{\mathrm{R}_{\text{з}}}^{\mathrm{АТО}_i} = \frac{R_{\text{з}}^{\mathrm{АТО}_i}}{R_{\text{з}}^{\text{ИО}}};$$

– парный интегральный риск травмирования людей на пожаре на *i*-й территории:

$$\Pi_{\mathrm{R}_{\text{тр}}}^{\mathrm{АТО}_i} = \frac{R_{\text{тр}}^{\mathrm{АТО}_i}}{R_{\text{тр}}^{\text{ИО}}};$$

– парный интегральный риск возникновения пожара на *i*-й территории:

$$\Pi_{\mathrm{R}_{\text{вп}}}^{\mathrm{АТО}_i} = \frac{R_{\text{вп}}^{\mathrm{АТО}_i}}{R_{\text{вп}}^{\text{ИО}}};$$

– парный интегральный риск уничтожения строений, объектов техносферы на *i*-й территории:

$$\Pi_{\mathrm{R}_{\text{ус}}}^{\mathrm{АТО}_i} = \frac{R_{\text{ус}}^{\mathrm{АТО}_i}}{R_{\text{ус}}^{\text{ИО}}};$$

– парный интегральный пожарный риск прямого материального ущерба от пожаров на объектах техносферы:

$$\Pi_{\mathrm{R}_{\text{у}}}^{\mathrm{АТО}_i} = \frac{R_{\text{у}}^{\mathrm{АТО}_i}}{R_{\text{у}}^{\text{ИО}}}.$$

6. Вычисление комплексного показателя пожарной опасности в *i*-м АТО области:

$$K_{\text{Rп}}^{\mathrm{АТО}_i} = \frac{\Pi_{R_{\text{з}}}^{\mathrm{АТО}_i} + \Pi_{R_{\text{тр}}}^{\mathrm{АТО}_i} + \Pi_{R_{\text{вп}}}^{\mathrm{АТО}_i} + \Pi_{R_{\text{ус}}}^{\mathrm{АТО}_i} + \Pi_{R_{\text{у-}}}^{\mathrm{АТО}_i}}{5}, \qquad (1)$$

7. Отнесение ситуации к одному из уровней пожарной опасности в *i*-м АТО согласно неравенствам [19, 20]:

1-й уровень:	$K_{\text{Rп}}^{\mathrm{АТО}_i} > 2$	– чрезвычайный;
2-й уровень:	$1 < K_{\text{Rп}}^{\mathrm{АТО}_i} \le 2$	– высокий;
3-й уровень:	$0{,}5 < K_{\text{Rп}}^{\mathrm{АТО}_i} \le 1$	– средний;
4-й уровень:	$0 \le K_{\text{Rп}}^{\mathrm{АТО}_i} \le 0{,}5$	– низкий.

Содержательно, уровень $K_{\text{Rп}}^{\mathrm{АТО}_i} = 1$ означает, что вышеуказанный комплекс рисков на территории примерно равен рискам по субъекту в целом (при равенстве этих рисков парный риск равен единице). Соответственно, чрезвычайный уровень означает в два раза больший риск на территории, чем аналогичный риск по субъекту, а низкий – в два раза меньший.

Однако для ИО, как станет видно впоследствии, вместо указанной системы градаций лучше использовать следующую:

$$0 \le K_{\text{Rп}}^{\mathrm{АТО}_i} \le 0{,}5,$$

– уровень низкий (риски в два и более раза ниже, чем по субъекту в целом).

$$0{,}5 < K_{\text{Rп}}^{\mathrm{АТО}_i} \le 1,$$

– уровень приемлемый (риски не более чем в два раза ниже, чем по субъекту в целом).

$$1 < K_{\text{Rп}}^{\text{АТО}_i} \le 2,$$

– повышенный (риски не более чем в два раза выше, чем по субъекту в целом);

$$2 < K_{\text{Rп}}^{\text{АТО}_i} \le 4,$$

– высокий (риски более чем в два, но менее, чем в четыре раза превышают сумму рисков по субъекту);

$$4 < K_{\text{Rп}}^{\text{АТО}_i},$$

– чрезвычайный уровень пожарной опасности (территориальные риски в четыре и более раз превышают риски по субъекту; такой уровень можно считать аномальным).

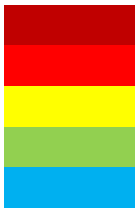
В целом это соответствует первому делению с тем отличием, что внутри чрезвычайного уровня выделен высокий. К сожалению, для ИО такое выделение имеет смысл.

Определим комплексные показатели пожарной опасности и соответствующие уровни для АТО ИО при пятиуровневой градации.

2. Расчёт комплексных показателей пожарной опасности (КППО) для АТО Иркутской области. В основу расчёта были положены данные, предоставленные ГУ МЧС России по ИО, а также органами государственной статистики ([21-23] и др.). Данные были собраны в таблице, фрагменты которых представлены в таблицах 1-7 в динамике за период 2010-2021 гг., всего 33 территории.

На их основе с использованием описанного подхода были рассчитаны парные риски и выведены значения КППО для каждого АТО за каждый год. Результаты представлены в таблице 8.

Уровни пожарной опасности выделены следующим образом:



чрезвычайный - К>4
высокий - 2<К<=4
повышенный 1<К<=2
приемлемый 0,5<К<=1
низкий 0<=К<=0,5

Рис. 1. Уровни пожарной опасности и их представление в таблице 8

Как видно из таблицы 8, типичный уровень пожарной опасности для территорий области – повышенный. Это, в частности, видно по средним значениям показателя для каждого года и за весь изученный период по каждой территории. В среднем за весь период наиболее благоприятная обстановка с пожарами наблюдалась на территориях Баяндаевского ($К_{ср}$=1) и Боханского районов ($К_{ср}$=0,98), г. Братска и Братского района ($К_{ср}$=0,96), г. Иркутска и Иркутского района ($К_{ср}$=0,76), а также Осинского района ($К_{ср}$=0,96). При этом наименьший КППО в среднем за период в г. Иркутске и Иркутском районе.

Три и более событий высокого и чрезвычайного значений КППО отмечаются в Зиминском, Казачинско-Ленском, Катангском, Киренском и Ольхонском АТО. При этом в Ольхонском районе уровень пожарной опасности высок и по среднему показателю: $К_{ср}$=2,06. Казачинско-Ленское, Катангское и Киренское АТО демонстрируют максимальный среди территорий разброс показателей: от 0,4 до 4,08 в Казачинско-Ленском; от 0,38 до 4,25 в Катангском; от 0,01 до 6,27 в Киренском и АТО (наибольший разброс показателей). Причём Казачинско-Ленское АТО демонстрирует высокие значения КППО в 2019-2021 годы (в 2-4 раза выше чем в целом по области!). Все остальные территории показывают в среднем повышенный уровень пожарной опасности. Из территорий с повышенным уровнем пожарной опасности, но присутствием заметной доли низкого и приемлемого показателей за изученный период можно отнести Балаганское (5/12), Нижнеилимское (5/12) и Нукутское (6/12) административно-территориальные образования.

Таблица 1. Численность населения тыс.чел. по территориям ИО

АТО ИО	2010	2011	2012	2013	2014	2015	…	2021
Аларский	21,4	21,4	21,4	21	20,8	20,8	…	20,5
Ангарский	244,4	258,1	244,4	253,2	250,7	248,3	…	237,1
Балаганский	9,1	9,1	9	8,9	8,8	8,6	…	8,4
…	…	…	…	…	…	…	…	…
Всего:	**2334,6**	**2345,2**	**2344,2**	**2339,5**	**2336,7**	**2331,4**	**…**	**2199,4**

Таблица 2. Объектов техносферы по территориям ИО

АТО ИО	2010	2011	2012	2013	2014	2015	…	2021
Аларский	6104	6179	6288	6379	6408	6449	…	7139
Ангарский	56502	56911	57125	57372	57561	57744	…	59349
Балаганский	5327	5440	5522	5629	5717	5807	…	6222
…	…	…	…	…	…	…	…	…
Всего:	**1208091**	**1214855**	**1221255**	**1226987**	**1233669**	**1239318**	**…**	**1268019**

Таблица 3. Количество пожаров по территориям ИО

АТО ИО	2010	2011	2012	2013	2014	2015	…	2021
Аларский	42	40	39	42	47	49	…	56
Ангарский	202	200	216	204	196	178	…	292
Балаганский	18	16	13	13	12	25	…	21
…	…	…	…	…	…	…	…	…
Всего:	**3898**	**3730**	**3570**	**3352**	**3344**	**3171**	**…**	**6238**

Таблица 4. Погибло в пожарах по территориям ИО

АТО ИО	2010	2011	2012	2013	2014	2015	…	2021
Аларский	2	1	2	4	2	3	…	2
Ангарский	19	10	12	23	13	10	…	14
Балаганский	4	0	1	1	0	0	…	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…
Всего:	**311**	**264**	**260**	**248**	**246**	**217**	**…**	**177**

Таблица 5. Травмировано при пожарах по территориям ИО

АТО ИО	2010	2011	2012	2013	2014	2015	…	2021
Аларский	2	0	0	2	0	2	…	0
Ангарский	24	20	27	25	19	20	…	24
Балаганский	0	0	0	0	0	0	…	1
…	…	…	…	…	…	…	…	…
Всего:	**261**	**238**	**248**	**218**	**250**	**205**	**…**	**196**

Таблица 6. Уничтожено объектов, строений при пожарах по территориям ИО

АТО ИО	2010	2011	2012	2013	2014	2015	…	2021
Аларский	15	10	9	10	7	45	…	41
Ангарский	46	41	41	48	42	24	…	75
Балаганский	11	4	2	6	8	12	…	12
…	…	…	…	…	…	…	…	…
Всего:	**718**	**711**	**577**	**685**	**692**	**846**	**…**	**1739**

Таблица 7. Прямой ущерб млн.руб. по территориям ИО в ценах 2010 г.

АТО ИО	2010	2011	2012	2013	2014	2015	…	2021
Аларский	1,54	0,60	0,66	0,55	0,18	0,14	…	1,02
Ангарский	68,50	36,86	45,14	67,96	14,36	7,13	…	55,03
Балаганский	0,33	0,89	0,68	3,46	0,13	0,10	…	2,34
…	…	…	…	…	…	…	…	…
Всего:	**454,01**	**811,60**	**227,57**	**332,95**	**170,58**	**33,48**	**…**	**176,19**

Наиболее сложная обстановка с пожарами в Ольхонском районе: ни одного «благополучного» года за весь период и заметная доля высокого и чрезвычайного уровней пожарной опасности (4/12). Все остальные территории показывают промежуточные результаты. В целом за изученный период средний КППО по области держится в пределах 1,14÷1,37, – повышенный (таблица 8, рисунок 2). На рисунке 3 также представлена гистограмма числа событий чрезвычайного, высокого, приемлемого и низкого КППО за этот период. Очевидно явное преобладание повышенных значений.

Рис.2. Максимальное, минимальное и среднее значения КППО по области за 2010-2021 гг.

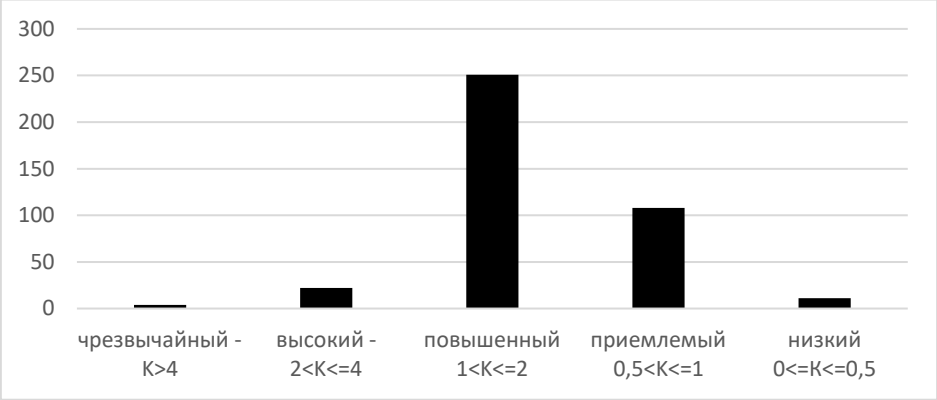


Рис.3. Количество событий чрезвычайного, высокого, повышенного, приемлемого и низкого значений КППО по области за 2010-2021 гг.

Анализ, выполняемый на основе (1), опирается на вычисления парных интегральных рисков как отношения риска на территории в заданном году к областному риску этого же года. Это позволяет оценить положение территории на фоне области в каждом году, но плохо подходит для изучения динамики изменения парных рисков. Представляется, что для оценки динамики целесообразно рассчитывать парные риски, беря за базу (знаменатель для парного интегрального пожарного риска) областные риски стартового – 2010-го года. Подобный расчёт был проведён, результаты представлены в таблице 9.

Такой расчёт покажет, как годовые риски изменяются со временем по отношению именно к стартовому году.

Таблица 8. КППО по территориям ИО

АТО ИО	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Среднее
Аларский	1,18	0,78	0,93	1,31	0,88	1,86	1,41	1,58	1,72	1,84	1,33	1,22	**1,34**
Ангарский	1,34	0,83	1,45	1,54	0,99	1,37	0,86	0,67	0,90	1,02	1,93	2,09	**1,25**
Балаганский	1,56	0,51	0,72	1,37	0,84	0,77	0,72	1,11	1,02	1,56	1,30	1,60	**1,09**
Баяндаевский	0,43	0,96	0,99	1,16	1,27	0,54	0,92	1,12	0,78	1,23	1,21	1,38	**1,00**
Бодайбинский	1,29	1,41	2,04	1,09	2,49	1,34	1,19	0,97	0,53	1,64	0,66	1,69	**1,36**
Боханский	0,98	0,99	0,82	1,08	0,86	0,81	0,95	0,74	1,41	1,04	0,91	1,20	**0,98**
Братский	0,91	0,88	1,08	1,01	0,94	0,93	0,93	0,97	1,11	0,82	0,81	1,06	**0,96**
Жигаловский	1,09	0,78	1,65	1,96	1,12	1,61	0,79	2,04	0,59	1,63	0,75	0,79	**1,23**
Заларинский	1,44	1,06	1,40	0,73	0,91	1,37	1,31	1,11	1,03	2,32	0,93	1,72	**1,28**
Зиминский	1,51	0,99	1,11	1,41	1,54	1,20	1,30	2,29	2,52	1,27	1,58	2,34	**1,59**
Иркутский	0,82	1,03	0,62	0,64	0,65	0,74	0,83	0,75	0,71	0,90	0,73	0,70	**0,76**
Казачинско-Ленский	1,59	1,53	1,10	1,00	1,43	0,86	0,71	0,66	0,40	2,32	4,08	2,95	**1,55**
Катангский	1,16	0,58	0,94	3,27	4,25	0,38	0,58	1,22	1,39	0,63	0,52	2,87	**1,48**
Качугский	1,03	1,01	1,02	1,43	1,30	1,28	1,68	0,98	1,03	0,78	0,77	1,23	**1,13**
Киренский	2,05	1,57	1,49	1,42	1,42	0,58	1,19	6,27	2,87	0,01	1,05	1,76	**1,81**
Куйтунский	0,86	1,21	1,19	1,18	1,76	1,51	1,25	1,22	0,83	1,57	1,13	1,29	**1,25**
Мамско-Чуйский	0,52	1,04	0,83	2,62	0,71	0,44	2,38	1,89	0,06	0,25	0,33	1,36	**1,04**
Нижнеилимский	0,98	1,32	1,32	1,18	1,16	1,78	0,43	0,29	0,96	1,37	1,11	0,83	**1,06**
Нижнеудинский	1,34	1,22	1,48	1,07	1,46	1,34	1,08	0,97	1,83	1,19	1,21	1,43	**1,30**
Нукутский	0,54	1,11	1,29	0,84	0,99	1,04	0,89	1,19	0,84	1,43	1,07	0,96	**1,02**
Ольхонский	1,49	1,03	1,92	3,14	1,61	2,02	1,04	1,11	3,52	5,32	1,21	1,37	**2,06**
Осинский	1,46	1,22	1,43	0,88	0,73	0,71	0,57	1,30	1,08	0,62	0,78	0,77	**0,96**
Слюдянский	1,06	1,53	1,03	1,28	1,23	1,17	1,39	1,41	1,27	1,27	1,10	1,23	**1,25**
Тайшетский	1,26	1,18	1,36	1,19	1,29	1,11	0,96	1,02	1,25	1,28	1,19	1,02	**1,18**
Тулунский	0,90	1,19	1,48	1,22	1,30	1,37	1,90	1,09	0,79	1,10	1,00	1,22	**1,21**
Усольский	1,92	1,73	1,60	1,72	1,69	1,66	1,56	1,77	1,16	1,48	1,31	1,19	**1,57**
Усть-Илимский	1,09	1,35	1,01	1,18	1,16	0,94	0,95	1,23	1,16	0,96	1,37	1,34	**1,15**
Усть-Кутский	1,38	0,98	1,86	1,25	2,28	1,62	1,71	1,24	1,56	1,16	1,22	1,36	**1,47**
Усть-Удинский	1,46	1,16	1,02	0,76	0,67	1,02	0,75	0,39	1,02	2,12	2,85	0,74	**1,16**
Чунский	1,17	1,44	1,47	1,14	1,91	1,30	1,41	0,96	1,88	1,98	1,45	1,22	**1,44**
Черемховский	1,42	1,43	1,28	1,49	1,08	1,46	1,71	1,46	1,42	1,22	1,39	1,18	**1,38**
Шелеховский	1,18	1,65	1,53	1,28	1,57	1,61	1,60	1,12	0,92	1,02	0,98	1,06	**1,29**
Эхирит-Булагатский	1,04	1,00	1,36	1,11	1,82	0,57	1,18	1,26	1,04	0,98	1,39	1,05	**1,15**
Максимум	**2,05**	**1,73**	**2,04**	**3,27**	**4,25**	**2,02**	**2,38**	**6,27**	**3,52**	**5,32**	**4,08**	**2,95**	**3,32**
Минимум	**0,43**	**0,51**	**0,62**	**0,64**	**0,65**	**0,38**	**0,43**	**0,29**	**0,06**	**0,01**	**0,33**	**0,70**	**0,42**
Среднее	**1,20**	**1,14**	**1,27**	**1,36**	**1,37**	**1,16**	**1,16**	**1,32**	**1,23**	**1,37**	**1,23**	**1,37**	**1,26**

С учётом динамики в число территорий с приемлемым средним КППО вошли Ангарское и Нижнеилимское АТО, однако «вышли» Баяндаевское и Осинское; Боханское, Братское и Иркутское остались. В «зелёной зоне» по среднему показателю также присутствует Мамско-Чуйское АТО, но с одним неблагоприятным событием в 2013 г.

Наименьший средний КППО по области всё так же в г. Иркутске и Иркутском районе.

Три и более событий высокого и чрезвычайного КППО по-прежнему отмечаются в Зиминском, Казачинско-Ленском, Киренском и Ольхонском АТО. Катангский из этого перечня вышел. При этом в Ольхонском районе наблюдается выход из «красной зоны» и переход в «жёлтую» по среднему за период 2010-2021 гг, что говорит о положительной в целом динамике обстановки с пожарами на этой территории. Исчез здесь и чрезвычайный уровень 2019 г., что также говорит о том, что данный год выглядел для Ольхонского района чрезвычайным по сравнению с общей обстановкой в области, но является не более чем годом высокой пожарной опасности, если сравнивать его с 2010-м.

Максимальный разброс показателя демонстрирует теперь только Киренское АТО (от 0,01 до 5,37). На остальных территориях обстановка более ровная. Казачинско-Ленское АТО и здесь демонстрирует высокий уровень тревоги за 2019-2021 г.

Наконец, выросло количество территорий хотя и с повышенным средним значением КППО, но относительно большой долей спокойных периодов («зелёная» и «голубая» зоны), когда уровень показателя не превысил областной от 2010 г. Сюда вошли АТО: Балаганское (6/12), Баяндаевское (7/12), Бодайбинское (6/12), Жигаловское (5/12), Качугское (7/12), Нукутское (5/12), Осинское (6/12), Тайшетское (5/12). Всё это говорит о том, что хотя обстановка с пожарами по области непростая, в динамике она изменяется в лучшую сторону. Это же иллюстрируют и значения комплексных показателей в среднем по территориям области (см. рис. 4 и 5).

Рис.4. Приведённые к 2010 г. максимальное, минимальное и среднее значения КППО по территориям ИО

Несмотря на несколько лучшие показатели в динамике, общая ситуация – преобладание территорий с повышенным уровнем пожарной опасности – сохраняется неизменной (рисунок 5). Как представляется, такой уровень пожарной опасности обусловлен высокой долей деревянной застройки и продолжительным зимним (то есть отопительным) периодом в области при дефиците или полном отсутствии средств противопожарной защиты в квартирах и домовладениях (от 70 до 80% пожаров приходится на жилой сектор [11, 24]), однако вопрос требует дополнительного изучения.

Таблица 9. КППО по территориям ИО в динамике для базового 2010 г.

АТО ИО	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Среднее
Аларский	1,18	0,77	0,80	1,15	0,77	1,86	1,46	1,55	2,67	1,92	1,50	1,46	**1,42**
Ангарский	1,34	0,95	1,07	1,36	0,78	0,61	0,59	0,56	0,94	0,97	1,25	1,18	**0,97**
Балаганский	1,56	0,55	0,57	1,27	0,87	0,79	0,73	0,85	1,68	1,47	1,07	1,23	**1,05**
Баяндаевский	0,43	1,00	0,88	1,08	0,96	0,51	0,99	1,14	1,34	1,39	1,09	1,47	**1,02**
Бодайбинский	1,29	1,52	1,58	0,97	1,41	0,60	0,69	0,86	0,37	1,55	0,78	1,48	**1,09**
Боханский	0,98	0,97	0,64	0,93	0,71	0,70	0,86	0,92	1,43	1,16	1,12	1,35	**0,98**
Братский	0,91	0,88	0,93	0,91	0,85	0,69	0,71	0,95	1,06	0,95	0,89	1,14	**0,90**
Жигаловский	1,09	0,72	1,43	1,73	1,09	1,26	0,62	1,65	0,78	1,72	0,84	0,96	**1,16**
Заларинский	1,44	1,22	1,12	0,68	0,80	1,23	0,85	1,37	1,33	2,15	1,07	1,68	**1,24**
Зиминский	1,51	1,03	0,94	1,26	1,27	1,14	1,16	3,93	2,00	1,35	1,58	2,12	**1,61**
Иркутский	0,82	1,47	0,49	0,56	0,51	0,51	0,58	0,52	0,92	0,76	0,60	0,65	**0,70**
Казачинско-Ленский	1,59	1,49	0,94	0,94	1,08	0,60	0,61	0,48	0,45	2,15	3,01	2,47	**1,32**
Катангский	1,16	0,64	0,83	2,83	1,89	0,21	0,66	0,80	1,58	0,99	0,76	2,25	**1,22**
Качугский	1,03	1,07	0,83	1,26	0,94	0,90	1,25	0,90	0,90	0,97	0,98	1,20	**1,02**
Киренский	2,05	1,49	1,25	1,27	1,32	0,38	1,07	5,37	2,15	0,01	1,34	1,82	**1,63**
Куйтунский	0,86	1,25	0,94	1,03	1,55	1,12	0,94	1,10	1,05	1,66	1,34	1,39	**1,19**
Мамско-Чуйский	0,52	0,98	0,70	2,26	0,64	0,49	1,43	1,29	0,04	0,41	0,52	1,40	**0,89**
Нижнеилимский	0,98	1,32	1,14	1,09	0,86	1,15	0,24	0,22	1,16	1,37	1,17	0,94	**0,97**
Нижнеудинский	1,34	1,17	1,24	0,98	1,21	1,20	0,89	0,97	1,52	1,37	1,37	1,45	**1,23**
Нукутский	0,54	1,21	1,13	0,75	0,98	1,01	0,86	1,24	1,00	1,49	1,15	1,12	**1,04**
Ольхонский	1,49	1,00	1,55	2,67	1,44	1,48	0,95	0,89	3,06	2,45	1,15	1,30	**1,62**
Осинский	1,46	1,42	1,24	0,83	0,69	0,62	0,47	1,09	1,30	0,96	0,99	1,00	**1,01**
Слюдянский	1,06	1,50	0,91	1,11	1,03	0,94	1,03	1,14	1,08	1,45	1,12	1,06	**1,12**
Тайшетский	1,26	1,17	1,14	1,05	0,99	0,81	0,57	0,88	1,29	1,43	1,13	0,97	**1,06**
Тулунский	0,90	1,20	1,29	1,10	1,10	1,09	1,53	0,96	0,89	1,44	1,24	1,35	**1,17**
Усольский	1,92	1,71	1,40	1,47	1,44	1,41	1,28	1,69	1,23	1,73	1,48	1,31	**1,51**
Усть-Илимский	1,09	1,33	0,88	1,02	1,02	0,80	0,80	1,06	1,39	1,25	1,39	1,40	**1,12**
Усть-Кутский	1,38	1,04	1,51	1,13	2,03	1,16	1,16	0,99	1,78	1,62	1,54	1,59	**1,41**
Усть-Удинский	1,46	1,15	0,87	0,69	0,62	0,69	0,52	0,44	1,21	1,46	2,25	0,97	**1,03**
Чунский	1,17	1,46	1,19	1,01	1,21	0,85	0,91	1,00	1,75	1,78	1,42	1,22	**1,25**
Черемховский	1,42	1,35	1,10	1,32	0,95	1,36	1,42	1,50	1,29	1,58	1,44	1,30	**1,34**
Шелеховский	1,18	1,63	1,27	1,15	1,28	1,30	1,21	1,01	0,90	1,22	1,15	1,17	**1,21**
Эхирит-Булагатский	1,04	1,00	1,08	1,03	1,58	0,39	0,81	1,05	1,18	1,23	1,14	0,99	**1,04**
Максимум	**2,05**	**1,71**	**1,58**	**2,83**	**2,03**	**1,86**	**1,53**	**5,37**	**3,06**	**2,45**	**3,01**	**2,47**	**2,50**
Минимум	**0,43**	**0,55**	**0,49**	**0,56**	**0,51**	**0,21**	**0,24**	**0,22**	**0,04**	**0,01**	**0,52**	**0,65**	**0,37**
Среднее	**1,20**	**1,17**	**1,06**	**1,21**	**1,09**	**0,91**	**0,90**	**1,22**	**1,29**	**1,38**	**1,24**	**1,35**	**1,17**

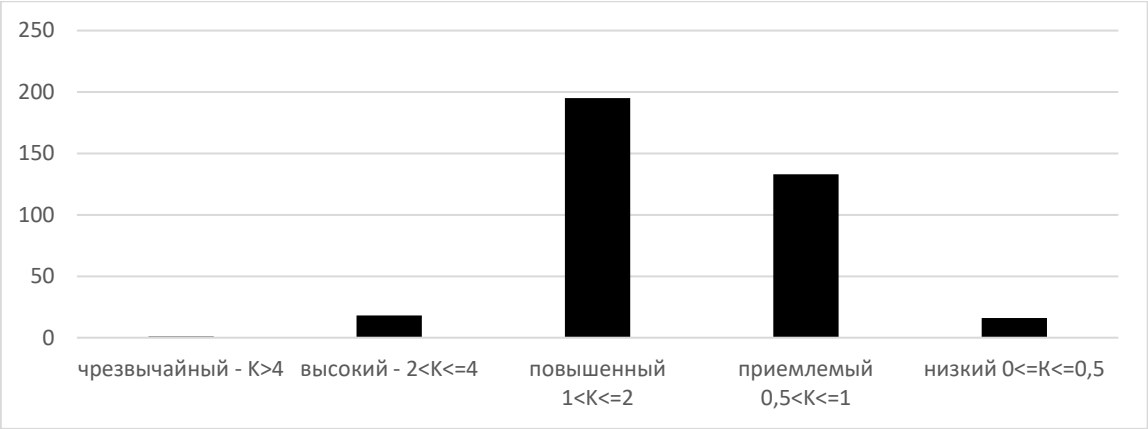


Рис. 5. Приведённое к 2010 г. количество событий чрезвычайного, высокого, повышенного, приемлемого и низкого значений КППО по ИО за период 2010-2021 гг.

В завершение отметим, что при вычислении рисков, связанных с ущербом от пожаров, дополнительно была учтена инфляция за 2010-2021 г. [25]. То есть ущерб считался в сопоставимых ценах. Одним из соавторов статьи (Сафонов С.В.) разработан программный комплекс, позволяющий выполнять эти и другие виды анализов.

Заключение. На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Использование комплексного показателя пожарной опасности территории, предложенного в ИРНИТУ, позволяет определить её «рейтинг» по отношению к другим территориям на данный год.

2. Для оценки изменения пожарной опасности на территории за многолетний период в динамике можно использовать формулу (1), беря за базу областные риски некоторого стартового года. (в данном случае 2010-го) и отслеживая изменения территориальных рисков по отношению к нему. В случае Иркутской области это несколько улучшает картину, но общая оценка ситуации – преобладание повышенного уровня пожарной опасности в административно-территориальных образованиях, – остаётся прежней.

3. Высокий уровень пожарной опасности по территориям области предположительно связан с высокой долей деревянной застройки, продолжительным отопительным периодом, а также отсутствием или дефицитом средств противопожарной защиты в жилом секторе (до 80% пожаров приходится на него). Однако это лишь гипотеза, которая требует дополнительного изучения.

Список источников

1. Сметанкина Г.И. Профилактика пожаров как стратегия развития МЧС России / Г.И. Сметанкина, В.В. Кузнецов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – Воронеж: ВИ ГПС МЧС России, 2015. – Т. 1. – № 1(6). – С. 26-29.
2. Яковлев В.А. Основные аспекты обеспечения пожарной безопасности в техносфере / В.А. Яковлев // Международный научно-исследовательский журнал, 2020. – № 11 (101). – Часть 1. Ноябрь. – С. 78-84. DOI: 10.23670/IRJ.2020.101.11.012.
3. Профилактика пожаров – одна из главных задач сотрудников МЧС России. – URL: https://78.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/4396434 (дата обращения: 12.05.2023).
4. ГОСТ Р 22.10.02–2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Допустимый риск чрезвычайных ситуаций. – М.: Стандартинформ, 2016. – 7 с.
5. Харченко С.Г. Ретроспектива международного опыта анализа рисков / С.Г. Харченко, Р.В. Ананьева // Международная экономика, 2008. – № 6. – С. 61-69.
6. Белов П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование / П.Г. Белов. – М.: Юрайт, 2014. – 728 с.
7. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2017. – 724 с.
8. Тимофеева С.С. Управление риском, системный анализ и моделирование: учеб. пособие. / С.С. Тимофеева, Е.А. Хамидуллина. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. – 160 с.

9. Вишняков Я.Д. Общая теория рисков: учебное пособие / Я.Д. Вишняков, В.В. Овчинников. – М.: ГГУ, 2010. – 212 с.
10. Акатьев В.А. Производственная безопасность: учеб. пособие / В.А. Акатьев. – М.: Изд-во РГТУ, 2011. – 820 с.
11. Брушлинский Н.Н. Пожарная статистика: учеб. пособие / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, М.П. Григорьева. – М.: Академия МЧС России, 2017. – 108 с.
12. Брушлинский Н.Н. О понятии пожарного риска и связанные с ним понятия / Н.Н. Брушлинский // Пожарная безопасность, 1999. – № 3. – 84 с.
13. Брушлинский Н.Н. К вопросу о локальных и интегральных рисках / Н.Н. Брушлинский, Е.А. Клепко // Вестник Академии ГПС МЧС России, 2007. – № 6. – С. 93-96.
14. Попков С.Ю. Методика оценки пожарных рисков в городах и сельской местности России / С.Ю. Попков // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал, 2011, вып.5 (39). – 12 с. – URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-5/04-05-11.ttb.pdf (дата обращения: 08.06.2023)
15. Брушлинский Н.Н. Роль статистики пожаров в оценке пожарных рисков / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов // Проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях, 2012. – № 1. – С. 112-124.
16. Брушлинский Н.Н. Индивидуальный пожарный риск: понятие и вычисление / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2013. – № 5. – С. 30-41.
17. Брушлинский Н.Н. Современные проблемы обеспечения пожарной безопасности в России: монография. / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 178 с.
18. Седнев В.А. Безопасность жизнедеятельности / В.А. Седнев, С.И. Воронов, А.В. Баринов [и др.]. – М: Академия ГПС МЧС России, 2016. – 303 с.
19. Гармышев В.В. Современные проблемы пожарной безопасности на региональном уровне / В.В. Гармышев, Д.В. Дубровин // XXI век. Техносферная безопасность, 2019. – Т. 4. – № 1. – С. 38-61.
20. Тимофеева С.С. Оценка техногенных и пожарных рисков Байкальского региона: монография / С.С. Тимофеева, В.В. Гармышев. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. – 184 с.
21. Материалы анализа оперативно-служебной деятельности государственного пожарного надзора Иркутской области. Статистические сборники за 2010 - 2021 годы. – Иркутск: ГУ МЧС России по Иркутской области, 2010-2021 гг.
22. Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» в 2010 - 2021 гг. – М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010 - 2021 гг.
23. Официальная статистика. Базы данных. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области, 2021. – URL: http://irkutskstat.gks.ru (дата обращения: 13.05.2023).
24. Методические рекомендации по формам и методам работы по предупреждению пожаров в жилом секторе. ГУ МЧС России по Республике Коми. Управление надзорной деятельности. – 22 с. – URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1683888089&tld=ru&lang=ru&name=Metodicheskie-rekomendazii-po-profilaktike-pogharov-v-ghilom-sektore.docx&text=профилактика%20как%20способ%20уменьшения%20 пожаров&url=http%3A%2F% 2Fwww.mrk11.ru%2Fcontent%2Fnews%2F70%2FMetodicheskie-rekomendazii-po-profilaktike-pogharov-v-ghilom-sektore.docx/ (дата обращения: 13.05.2023).
25. Инфляция в России по годам: 1991 - 2023. – URL: http://global-finances.ru/inflyatsiya-v-rossii-po-godam (дата обращения: 13.05.2023).

Аршинский Леонид Вадимович. *Д.т.н., доцент, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения, Author ID: 520252; SPIN: 9286-4084; ORCID: 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.*

Гармышев Владимир Викторович. *К.т.н., доцент, доцент кафедры промэкологии и безопасности жизнедеятельности Иркутского национального исследовательского технического университета, Author ID: 295422; SPIN: 9577-9080; ORCID: 0000-0003-0353-035X, diamant1959@mail.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова, 83.*

Михеев Максим Сергеевич. *Магистрант кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.*

Сафонов Сергей Викторович. *Магистрант кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.*

UDC 519.257+614.849
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.011

Calculation of a complex fire hazard indicator in the administrative territories of the Irkutsk region

Leonid V. Arshinskiy[1], Vladimir V. Garmyshev[2], Maksim S. Mikheev[1], Sergey V. Saphonov[1]

[1]Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk, *larsh@mail.ru*

[2]Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

Abstract. The situation with fires in the Irkutsk region in 2010-2021 is considered. The analysis was carried out with the help of a comprehensive fire hazard indicator, which allows assessing the situation on the territory relative to the level of fire danger for the subject as a whole (Irkutsk region). The most and least prosperous territories are marked. It is shown that the main part of the territories is characterized by an increased level of fire danger, and some territories in some years are high and extreme. Since the complex indicator used for calculations characterizes the situation in statics, it is proposed to perform a similar calculation relative to the base year 2010 to assess the dynamics. It is shown that the dynamics of the situation looks somewhat better, but the changes are not fundamental. It is assumed that the high level of fire danger in the region is associated with a high proportion of wooden buildings and a long (more than six months) heating period with poor provision of fire protection facilities in the residential sector, where up to 80% of fires occur.

Keywords: fire hazard, fires, Irkutsk region, risks, complex fire hazard indicator

References

1. Smetankina G.I., Kuznetsov V.V. Profilaktika pozharov kak strategiya razvitiya MCHS Rossii [Fire prevention as a development strategy of the EMERCOM of Russia]. Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy [Fire safety: problems and prospects]. Voronezh, VI GPS MCHS Rossii [Voronezh Institute of EMERCOM of Russia], 2015, vol. 1, no. 1(6), pp. 26-29.
2. Yakovlev V.A. Osnovnye aspekty obespecheniya pozharnoj bezopasnosti v tekhnosfere [The main aspects of fire safety in the technosphere]. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal], 2020, no. 11(101), part 1. November, pp. 78-84. DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.101.11.012.
3. Profilaktika pozharov – odna iz glavnyh zadach sotrudnikov MCHS Rossii [Fire prevention is one of the main tasks of the EMERCOM of Russia employees]. Available at: https://78.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/4396434 (accessed: 05/12/23).
4. GOST R 22.10.02–2016. Bezopasnost' v chrezvychajnyh situaciyah. Menedzhment riska chrezvychajnoj situacii. Dopustimyj risk chrezvychajnyh situacij [Safety in emergency situations. Emergency risk management. Acceptable risk of emergency situations]. Moskow, Standartinform, 2016, 7 p.
5. Harchenko S.G., Anan'eva R.V. Retrospektiva mezhdunarodnogo opyta analiza riskov [Retrospective of the international experience of risk analysis]. Mezhdunarodnaya ekonomika [International economics], 2008, no. 6, pp. 61-69.
6. Belov P.G. Upravlenie riskami, sistemnyj analiz i modelirovanie [Risk management, system analysis and modeling]. Moscow, YUrajt, 2014, 728 p.
7. Mahutov, N.A. Bezopasnost' i riski: sistemnye issledovaniya i razrabotki [Safety and risks: system research and development]. Novosibirsk, Nauka [Science], 2017, 724 p.
8. Timofeeva S.S., Hamidullina E.A. Upravlenie riskom, sistemnyj analiz i modelirovanie: ucheb. posobie [Risk management, system analysis and modeling: textbook]. Irkutsk, Izd-vo IRNITU [Publishing House IRNITU], 2016, 160 p.
9. Vishnyakov Y.D., Ovchinnikov V.V. Obshchaya teoriya riskov: uchebnoe posobie [General theory of risks: textbook]. Moscow, GGU, 2010, 212 p.
10. Akat'ev V.A. Proizvodstvennaya bezopasnost': ucheb. posobie [Industrial safety: textbook]. Moscow, RGTU, 2011, 820 p.
11. Brushlinskij N.N., Sokolov S.V., Grigor'eva M.P. Pozharnaya statistika: ucheb. posobie [Fire statistics: textbook]. Moscow, Akademiya MCHS Rossii [Academy of the EMERCOM of Russia], 2017, 108 p.
12. Brushlinskij N.N. O ponyatii pozharnogo riska i svyazannye s nim ponyatiya [On the concept of fire risk and related concepts]. Pozharnaya bezopasnost' [Fire safety], 1999, no. 3, 84 p.
13. Brushlinskij N.N., Klepko E.A. K voprosu o lokal'nyh i integral'nyh riskah [On the issue of local and integral risks]. Vestnik Akademii GPS MCHS Rossii [Bulletin of the Academy of State Fire Service of the EMERCOM of Russia], 2007, no. 6, pp. 93-96.

14. Popkov S.Yu. Metodika ocenki pozharnyh riskov v gorodah i sel'skoj mestnosti Rossii [Methodology for assessing fire risks in cities and rural areas of Russia]. Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. Internet-zhurnal [Technosphere safety technologies. Online journal], 2011, vol. 5 (39), 12 p., available at: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-5/04-05-11.ttb.pdf (accessed: 06/08/23).
15. Brushlinskij N.N., Sokolov S.V. Rol' statistiki pozharov v ocenke pozharnyh riskov [The role of fire statistics in the assessment of fire risks]. Problemy bezopasnosti v chrezvychajnyh situaciyah [Problems of safety in emergency situations], 2012, no. 1, pp. 112-124.
16. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. Individual'nyj pozharnyj risk: ponyatie i vychislenie [Individual fire risk: concept and calculation]. Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij [Safety and emergencies problems], 2013, no. 5. pp. 30-41.
17. Brushlinskij N.N., Sokolov S.V. Sovremennye problemy obespecheniya pozharnoj bezopasnosti v Rossii: monografiya [Modern problems of fire safety in Russia: monograph.]. Moscow, Akademiya GPS MCHS Rossii [Aacademy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia], 2014, 178 p.
18. Sednev V.A., at al. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [Life safety], Moscow, Akademiya GPS MCHS Rossii [Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia], 2016, 303 p.
19. Garmyshev V.V. Dubrovin D.V. Sovremennye problemy pozharnoj bezopasnosti na regional'nom urovne [Modern problems of fire safety at the regional level]. XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost' [XXI century. Technosphere safety], 2019, v.4, no.1, pp. 38-61.
20. Timofeeva S.S., Garmyshev V.V. Ocenka tekhnogennyh i pozharnyh riskov Bajkal'skogo regiona: monografiya [Assessment of technogenic and fire risks of the Baikal region: monograph]. Irkutsk, Izd-vo IRNITU [Publishing House IRNITU], 2019, 184 p.
21. Materialy analiza operativno-sluzhebnoj deyatel'nosti gosudarstvennogo pozharnogo nadzora Irkutskoj oblasti. Statisticheskie sborniki za 2010 - 2021 gody [Materials of the analysis of operational and service activities of the state fire supervision of the Irkutsk region. Statistical collections for 2010-2021]. Irkutsk, GU MCHS Rossii po Irkutskoj oblasti [The EMERCOM of Russia in the Irkutsk region], 2010-2021.
22. Gosudarstvennye doklady «O sostoyanii zashchity naseleniya i territorij Rossijskoj Federacii ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tekhnogennogo haraktera» v 2010 - 2021 gg. [State reports "On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies" in 2010 - 2021]. Moscow, MCHS Rossii [EMERCOM of Russia], 2010 - 2021.
23. Territorial'nyj organ Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki po Irkutskoj oblasti, 2021 [Territorial department of the Federal State Statistics Service for the Irkutsk region, 2021]. Available at: http://irkutskstat.gks.ru.
24. Metodicheskie rekomendacii po formam i metodam raboty po preduprezhdeniyu pozharov v zhilom sektore. GU MCHS Rossii po Respublike Komi. Upravlenie nadzornoj deyatel'nosti [Methodological recommendations on the forms and methods of work on fire prevention in the residential sector. The EMERCOM of Russia in the Komi Republic. Management of Supervisory Activities]. 22 p., available at: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1683888089&tld=ru&lang=ru&name=Metodicheskie-rekomendazii-po-profilaktike-pogharov-v-ghilom-sektore.docx&text=профилактика%20как%20способ %20уменьшения%20пожаров& url=http%3A%2F%2Fwww.mrk11.ru%2Fcontent%2Fnews%2F70%2FMetodicheskie-rekomendazii-po-profilaktike-pogharov-v-ghilom-sektore.docx/.
25. Inflyaciya v Rossii po godam: 1991 - 2023 [Inflation in Russia by year: 1991 - 2023]. Available at: http://global-finances.ru/inflyatsiya-v-rossii-po-godam

Arshinsky Leonid Vadimovich. *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Departament Information Systems and Information Security of Irkutsk State Transport University, Author ID: 520252; SPIN: 9286-4084; ORCID 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru.*

Garmyshev Vladimir Viktorovich. *Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department Industrial Ecology and Life Safety of Irkutsk National Research Technical University, Author ID: 295422; SPIN: 9577-9080; ORCID: 0000-0003-0353-035X, diamant1959@mail.ru.*

Mikheev Maxim Sergeevich. *Master's student of the Department Information Systems and Information Security of the Irkutsk State Transport University.*

Safonov Sergey Viktorovich. *Master's student of the Department Information Systems and Information Security of the Irkutsk State Transport University.*

Статья поступила в редакцию 30.05.2023; одобрена после рецензирования 09.06.2023; принята к публикации 16.06.2023.

The article was submitted 05/30/2023; approved after reviewing 06/09/2023; accepted for publication 06/16/2023.

УДК 519.862.6
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.012

Применение регрессионных моделей для определения надежности контрагента

Туктарова Полина Андреевна, Давлетшина Светлана Маратовна, Хамидуллина Диана Ильвировна
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»,
Россия, Уфа, *fdo@ugatu.su*

Аннотация. В статье представлена реализация математической модели множественной регрессии, с помощью которой можно оценить надежность контрагента. Оценка надежности контрагентов – это одна из главных задач при осуществлении работы с контрагентами на предприятии. Проведение оценки надежности позволит организации избежать финансовых рисков и нежелательных проверок налоговой инспекции. Предложенный подход использования множественной регрессии при оценке надежности контрагента в организации подходит для применения на 6 месяцев текущей работы, поэтому, для большей эффективности, рекомендуется проводить данную работу с периодичностью раз в полгода. Значения коэффициентов оборачиваемости дебиторской задолженности и показателя рентабельности продаж можно использовать при оценке надежности контрагентов предприятия.

Ключевые слова: контрагент, экономическая безопасность, регрессионный анализ

Цитирование: Туктарова П.А. Применение регрессионных моделей для определения надежности контрагента / П.А. Туктарова, С.М. Давлетшина, Д.И. Хамидуллина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 121-128. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.012.

Введение. На сегодняшний день современная экономика предполагает взаимодействие организации с различными контрагентами. Покупатели, залогодатели, кредиторы, поставщики – это лишь часть контрагентов, с которыми сталкивается организация. В рыночной экономике невозможно осуществлять деятельность изолировано от других, поэтому каждая организация взаимодействует с контрагентами.

Для обеспечения экономической безопасности организации необходимо знать, можно ли сотрудничать с определённым контрагентом. Взаимодействие организации с контрагентами несет определённые риски, и поэтому, по мере развития бизнеса и увеличения числа компаний контрагентов, расширяются области возможных рисков. Обман, мошенничество, сокрытие значимой информации, к сожалению, имеют место быть, так как ряд компаний пытаются обманным путем заключить договор для получения выгоды. Поэтому, прежде чем вступать с какой-либо организацией или индивидуальным предпринимателем в договорные отношения, необходимо быть полностью уверенным в надежности этих лиц, а также в отсутствии у них опасных намерений.

Проверка контрагентов традиционно является неотъемлемой стадией преддоговорной работы любой компании. В крупных организациях, как правило, существует специально разработанный внутренний регламент, на который сотрудники обязаны ориентироваться при выборе потенциальных контрагентов и установлении договорных отношений с ними. Регламент предусматривает перечень документов, которые необходимо запросить у потенциального контрагента для последующего предоставления в юридический отдел организации. В свою очередь, юридический отдел по итогам анализа документов выносит заключение относительно наличия или отсутствия правовых рисков заключения договора с предлагаемым контрагентом.

1. Пути решения описываемой проблемы. Авторами предлагается провести оценку надежности контрагентов с помощью реализации математической модели. Оценка надежности контрагентов – это одна из главных задач при осуществлении работы с контрагентами на предприятии. Проведение оценки надежности позволит организации избежать финансовых рисков и нежелательных проверок налоговой инспекции.

Математические модели позволяют организации оценивать поведение контрагентов в динамике по ряду параметров, поскольку предприятиям необходимо знать своих контрагентов, их возможности и поведение [1].

При проведении оценки надежности хотелось бы иметь такую формулу, модель, которая могла бы давать нам информацию о надежности контрагента. Оценивать надежность будем с помощью многих значимых для организации показателей финансовой устойчивости.

В данной работе при оценке будем использовать такую математическую модель, как множественная регрессия. Основной целью множественной регрессии является построение модели с большим числом факторов, определяя при этом влияние каждого из них в отдельности, а также совокупное их воздействие на моделируемый показатель [2,3].

Для начала выбираем контрагентов, с которыми организация планирует заключить договора на выполнение, например, строительно-монтажных работ в ближайшие 6 месяцев [4]. За значение факторов возьмем коэффициенты финансовой устойчивости (x), которые могут влиять на надежность контрагента. Их значения возьмем из бухгалтерской отчетности контрагентов[5]. Значение интегрального показателя (y) – надежность контрагента, рассматривается в баллах. В таблице 1 представлены критерии оценки показателя надежности контрагента [6].

Таблица 1. Критерии оценки надежности контрагента

Показатели финансового состояния	Рейтинг показателей	Высший	Низший	Условия снижения критерия
Рентабельность СК (x1)	5	11 % выше – 5 балла	Менее 6 % – 0 балла	За каждый 1 % снижения, по сравнению с 11 %, снимается по 0,3 б.
Рентабельность продаж (x2)	5	25 % выше – 5 балла	Менее 5 % – 0 балла	За каждый 1 % снижения, по сравнению с 25 %, снимается по 0,3 б.
Коэффициент текущей ликвидности (x3)	5	1,5 и выше – 5 балла	менее 1,0 – 0 балла	За каждый 0,1 пункта снижения, по сравнению с 1,5, снимается по 1 баллу
Коэффициент СОС (x4)	5	0, 5 и выше – 5 баллов	менее 0,1 – 0 балла	За каждый 0,1 пункта снижения, по сравнению с 0,5, снимается по 1 баллу
Коэффициент финансовой независимости (x5)	5	1,0 и выше –5 балла	менее 0,5 – 0 балла	За каждый 0,1 пункта снижения, по сравнению с 1,0, снимается по 1 баллу
Коэффициент критической оценки (x6)	5	1 и выше – 5 балла	Менее 0,7 – 0 балла	За каждый 0,1 пункта снижения, по сравнению с 1, снимается по 1 баллу
Итого	30		0	

С помощью применения множественной регрессионной модели можно будет увидеть связь между интегральным показателем и коэффициентами, которые являются важными при оценке надежности контрагента. Ниже представлена формула расчета множественной регрессии (1) [7].

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_px_p + \varepsilon, \quad (1)$$

где y – интегральный показатель;

x – значения коэффициентов оценки;

a – коэффициент y-пересечения;
b – коэффициенты, полученные в ходе регрессионного анализа;
p – количество оценочных показателей;
e – случайная ошибка.

Чтобы определить, подходит ли данная модель для реализации поставленной задачи, необходимо выполнить важное условие $0 \leq R \leq 1$ (R − коэффициент детерминации). Чем меньше разброс значений остатков около линии регрессии по отношению к общему разбросу значений, тем, очевидно, лучше прогноз [8]. Чем ближе R к единице, тем теснее связь рассматриваемых признаков. Значение R, близкое к 1.0 показывает, что модель объясняет почти всю изменчивость соответствующих переменных [9].

В таблице 2 представлены исходные данные для построения регрессионной модели. Модель будет строиться, исходя из 6 оценочных показателей (x) и 24-х выбранных строительно-монтажных компаний, так как для примера взяты контрагенты, выполняющие строительно-монтажные работы.

Таблица 2. Исходные данные

Контрагенты	Рентабельность СК (x1), %	Рентабельность продаж (x2), %	Коэффициент текущей ликвидности (x3), доли	Коэффициент СОС (x4), доли	Коэффициент фин. независимости (x5), доли	Коэффициент критической оценки (x6), доли	Надежность контрагента (y), балл
Стройинвест	17,56	19,36	1,74	0,45	1,26	1	28,308
ПСК-6	10,35	12,98	1,32	0,55	1,23	1,3	26,019
Климатическое оборудование	10	17,25	1,52	0,53	1,54	1	27,375
Интра	6,61	16,29	1,74	0,57	1,58	0,9	20,07
Снэма-Сервис	3,54	11,28	0,96	0,08	0,43	0,8	6,646
Синтез	10	2,75	0,93	-0,16	0,42	0,56	4
СТ-Монтаж	7,65	2,41	0,59	-0,17	0,32	0,67	3,968
Уралстрой	7,62	4,65	0,52	0,11	0,82	0,8	10,986
Альфа-Строй	14,06	16,36	1,04	0,11	0,6	1,5	22,408
Строй-транс-13	15,3	14,88	1,32	0,39	1,13	1,4	23,964
Домус	16,01	22,25	1,32	0,53	1,29	1,4	27,175
Атлант	12,61	22,29	1,74	0,53	0,78	1,5	28,955
СМУ-45	14,54	15,28	1,99	0,19	0,73	1	24,646
ООО "Техно-СтройЭко"	11,4	17,25	1,43	0,19	0,82	0,9	21,605
ООО "Партнер"	11,65	22,41	1,4	0,52	1,33	0,9	27,223

Спецстрой	10,62	16,55	1,02	1,18	0,88	1	23,351
СК Монолит	19,56	22,76	1,94	0,59	0,66	1	28,988
Спринг	18,35	21,98	1,12	0,27	0,83	1	28,314
Грант-Строй	11,41	27,25	1,02	0,34	0,64	1,3	29
Юг-строй	5,61	2,29	1,14	0,52	0,8	0,8	12,64
Атриум	11,06	16,36	1,1	0,71	0,6	1,2	17,408
Имидж Строй	5,3	14,88	0,33	0,49	0,13	0,5	6,964
Талан	10,01	14,25	1,22	0,53	0,29	1,2	18,475
Рассвет	2,61	10,29	1,2	0,53	0,78	0,68	10,587

Для данной модели были проверены основные предпосылки регрессионного анализа, которые известны, как условия Гаусса – Маркова [10]. Проверим 3-е условие Гаусса – Маркова: условие с учетом того, что $M(\varepsilon_i) = M(\varepsilon_j) = 0$, с помощью критерия Дарбина-Уотсона [11]. Для оценки корреляции используется статистика, ниже представлена формула для её расчета (2) [11]:

$$d = \frac{\sum_{i=2}(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2} = \frac{289{,}3713666}{165{,}9188366} = 1{,}74405374. \quad (2)$$

Для определения наличия автокорреляции остатков между соседними членами ряда используется критерий Дарбина – Уотсона. Остатки должны быть случайными, но иногда каждое следующее значение остатков зависит от предшествующих [12]. В этом случае имеют место автокорреляции в остатках (рис. 1) [13]:

1. Гипотеза H_0 об отсутствии автокорреляции в остатках.
2. Гипотеза H_1 гипотеза о положительной автокорреляции в остатках.
3. Гипотеза H_2 гипотеза об отрицательной автокорреляции в остатках.

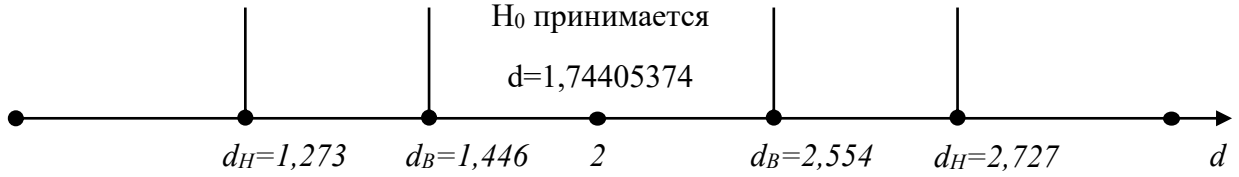


Рис. 1. Графическая интерпретация критерия Дарбина – Уотсона

По рисунку 1 видно, что d=1,74405374 находится между $d_в$ и 4-$d_в$, следовательно, принимается гипотеза об отсутствии автокорреляции в остатках [14].

Также было проверено наличие мультиколлинеарности между факторами. В таблице 3 представлена матрица парных линейных коэффициентов корреляции.

Далее был посчитан определитель матрицы: Det|R|= 0,642189242. Следовательно, можно сделать вывод о том, что определитель матрицы межфакторной корреляции отличен от нуля, следовательно, можно сделать вывод об отсутствии мультиколлинеарности [15].

Таблица 3. Матрица парных линейных коэффициентов корреляции

1	0,603	0,516905	0,078123	0,245475192	0,552602909
0,603	1	0,490653	0,432989	0,328010026	0,571545304
0,516905	0,490653	1	0,284655	0,548216913	0,394953253
0,078123	0,432989	0,284655	1	0,366333973	0,273264621
0,245475	0,32801	0,548217	0,366334	1	0,292196587
0,552603	0,571545	0,394953	0,273265	0,292196587	1

Далее, после того, как рассчитали определитель матрицы межфакторной корреляции, проведем регрессионный анализ, для того, чтобы построить уравнение регрессии, результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Регрессионный анализ

Регрессионная статистика				
Множественный R	0,968745015			
R-квадрат	0,938466903			
Нормированный R-квадрат	0,91674934			
Стандартная ошибка	2,499213397			
Наблюдения	24			
Дисперсионный анализ				
	df		MS	F
Регрессия	6	1619,443	269,9072	43,21235
Остаток	17	106,1831	6,246068	
Итого	23	1725,627		
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение
Y-пересечение	-8,01182976	2,122431	-3,77484	0,001511
Переменная X 1	0,535445671	0,167665	3,193553	0,005321
Переменная X 2	0,468792095	0,114444	4,096266	0,000753
Переменная X 3	2,61774881	1,704503	1,535784	0,142993
Переменная X 4	2,99260874	2,16777	1,380501	0,185315
Переменная X 5	5,250429153	1,656014	3,170521	0,005591
Переменная X 6	6,121308985	2,370509	2,582276	0,019377

После проведения регрессионного анализа были получены следующие коэффициенты по каждой из переменных x (таблица 5).

Таблица 5. Значения коэффициентов по переменным

	Коэффициенты
Y-пересечение	-8,01182976
Переменная X 1	0,535445671
Переменная X 2	0,468792095
Переменная X 3	2,61774881
Переменная X 4	2,99260874
Переменная X 5	5,250429153
Переменная X 6	6,121308985

Уравнение регрессии имеет следующий вид, формула (2):

$$Y = -8{,}011829765 + 0{,}53544567\,\mathrm{x}_1 + 0{,}468792095\,\mathrm{x}_2 + 2{,}61774881\,\mathrm{x}_3 + 2{,}99260874\,\mathrm{x}_4 + 5{,}250429153\,x_5 + 6{,}121308985\,x_6\,. \quad (2)$$

Полученное уравнение регрессии показывает взаимосвязь между надежностью контрагента, рентабельностью собственного капитала, рентабельностью продаж, коэффициентом текущей ликвидности, коэффициентом обеспеченности собственными оборотными средствами, коэффициентом финансовой независимости, коэффициентом критической оценки.

Из уравнения (2) видно, что с ростом рентабельности собственного капитала увеличивается показатель надежности контрагента на 0,535445671. С ростом показателя рентабельности

продаж вырастает показатель надежности контрагента на 0,468792095; рост показателя коэффициента текущей ликвидности приводит к увеличению показателя надежности контрагента на 2,61774881; рост показателя коэффициента обеспеченности собственными оборотными средствами приводит к увеличению показателя надежности на 2,99260874; рост показателя коэффициента финансовой независимости приводит к росту показателя надежности на 5,250429153; рост показателя коэффициента критической оценки приводит к увеличению показателя надежности на 6,121308985. Таким образом, было выявлено уравнение, которое позволит оценить надежность контрагента.

Выполнив регрессионный анализ, можно прийти к выводу, что значение коэффициента множественной корреляции расположено ближе к 1 и составляет 0,968745015 единиц, то есть наблюдается тесная связь между признаками.

Заключение. Таким образом, в статье представлена реализация математической модели. С помощью построения множественной регрессии была выявлена возможность оценить надежность контрагента. Оценка надежности контрагентов – это одна из главных задач при осуществлении работы с контрагентами на предприятии. Проведение оценки надежности позволит организации избежать финансовых рисков и нежелательных проверок налоговой инспекции. Предложенный нами подход использования множественной регрессии при оценке надежности контрагента в организации подходит для применения на 6 месяцев текущей работы, поэтому для большей эффективности, рекомендуется проводить данную работу с периодичностью, раз в полгода. Значения коэффициентов оборачиваемости дебиторской задолженности и показателя рентабельности продаж можно использовать при оценке надежности контрагентов.

Список источников

1. Прикладная эконометрика // Экономика и бизнес. – URL: https://cyberleninka.ru/journal/n/prikladnaya-ekonometrika (дата обращения: 20.12.22).
2. Шаповалов Д.А. Аналитические средства: математическая экономика и эконометрика / Д.А. Шаповалов, Д.А. Хабаров // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral», 2020. – № 3. – С. 387-393.
3. Горбачевская Т.С. Использование трендовых моделей для прогнозирования экономических процессов / Т.С. Горбачевская, А.Н. Богатова, А.Д. Трофмова, А.В. Бивзюк // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet», 2020. – № 5. – С. 235-239.
4. Асташкина Ю.Н. Методы эконометрического анализа финансовых показателей / Ю.Н. Асташкина, А.А. Снатенков // Международная научно-практическая конференция, 2021. – № 1. – С. 73-77.
5. Клисторин В.И. О математике в экономической науке / В.И. Клисторин // Всероссийский экономический журнал ЭКО, 2020. – № 11. – С. 38-58.
6. Муравьева В.С. Основные составляющие организационно-экономического моделирования / В.С. Муравьева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2021. – № 172(08). – С. 1-19.
7. Куницына А.Г. Прогнозирование с помощью регрессионного анализа / А.Г. Куницына, Л.А. Винсковская // Журнал Достижения науки и образования, 2020. – № 2. – С. 17-19.
8. Хутиев А.М. Анализ системы взаимоотношений с контрагентами в современной экономике / А.М. Хутиев // Хроноэкономика, 2020. – № 3 (24). – С. 242-245.
9. Родичева В.П. Особенности и перспективы расчетов с контрагентами в современных условиях / В.П. Родичева // Вестник экспертного совета, 2020. – № 2-3(21-22). – С. 66-73.
10. Зотиков Н.З. Контрагент - надежный партнер или источник налогового риска / Н.З. Зотиков // Вестник евразийской науки, 2021. – № 1. – С. 1-21.
11. Данько К.А. Необходимые процедуры проверки контрагента перед заключением сделки / К.А. Данько // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Юриспруденция, 2021. – № 3. – С. 98-102.
12. Еделькина А.Г. Процесс проверки контрагентов как важный элемент комплаенс / А.Г. Еделькина // Вестник евразийской науки, 2021. – № 5. – С. 1-12.

13. Одоева О.И. Повышение эффективности системы внутреннего контроля расчетов с контрагентами в организации / О.И. Одоева, А.Н. Гомбоева // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент, 2020. – № 4. – С. 118-125.
14. Еремина Н.В. К вопросу об эффективности системы внутреннего контроля состояния взаиморасчетов с контрагентами / Н.В. Еремина, Б.М. Мусаева, Е.А. Хахалева // Естественно-гуманитарные исследования, 2022. – № 40(2). – С. 104-108.
15. Конева М.В. Контроль взаиморасчетов с контрагентами с применением ИКТ в бухгалтерском учете строительных организаций / М.В. Конева // Естественно-гуманитарные исследования, 2020. – № 31(5). – С. 335-342.

Туктарова Полина Андреевна. *Кандидат экономических наук, доцент.*

Давлетшина Светлана Маратовна. *Кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики предпринимательства ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», fdo@ugatu.su. Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Карла Маркса 12.*

Хамидуллина Диана Ильвировна. *Ассистент кафедры экономики предпринимательства ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», fdo@ugatu.su . Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Карла Маркса 12.*

UDC 519.862.6
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.012

Statement, formalization and implementation of the mathematical model of improvement of the system of work with contractors at the enterprise

Polina A. Tuktarova, Svetlana M. Davletshina, Diana I. Khamidullina
Ufa University of Science and Technology,
Russia, Ufa, *fdo@ugatu.su*

Abstract. The article presents the implementation of the mathematical model. By constructing multiple regression, it was possible to assess the reliability of the counterparty. Evaluation of the reliability of counterparties is one of the main tasks when working with counterparties at an enterprise. Conducting a reliability assessment will allow an organization to avoid financial risks and unwanted tax audits. The proposed approach of using multiple regression in assessing the reliability of a counterparty in an organization is suitable for use for 6 months of current work. Therefore, for greater efficiency, it is recommended to carry out this work at intervals, once every six months. The values of the coefficients of the turnover of accounts receivable and the indicator of profitability of sales can be used to assess the reliability of the counterparties of the enterprise.

Keywords: counterparty, economic security, regression analysis

References

1. Prikladnaya ekonometrika [Applied econometrics]. Ekonomika i biznes [Economics and business], available at: https://cyberleninka.ru/journal/n/prikladnaya-ekonometrika (accessed: 12/20/2022).
2. Shapovalov D.A., Khabarov D.A. Analiticheskiye sredstva: matematicheskaya ekonomika i ekonometrika [Analytical tools: mathematical economics and econometrics]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologiy “Integral” [International journal of applied sciences and technologies "Integral"], 2020, no. 3, pp. 387-393.
3. Gorbachevskaya T.S., Bogatova A.N., Trofmova A.D., Bivzyuk A.V. Ispol'zovaniye trendovykh modeley dlya prognozirovaniya ekonomicheskikh protsessov [Using trend models to predict economic processes]. Nauchno-obrazovatel'nyy zhurnal dlya studentov i prepodavateley “StudNet” [Scientific and educational journal for students and teachers "StudNet"], 2020, no. 5, pp. 235-239.
4. Astashkina Yu.N., Snatenkov A.A. Metody ekonometricheskogo analiza finansovykh pokazateley [Methods of econometric analysis of financial indicators]. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya [International Scientific and Practical Conference], 2021, no. 1, pp. 73-77.
5. Klistorin V.I. O matematike v ekonomicheskoy nauke [On Mathematics in Economics]. Vserossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal EKO [All-Russian economic journal ECO], 2020, no. 11, pp. 38-58.

6. Muravieva V.S. Osnovnye sostavlyayushchie organizatsionno-ekonomicheskogo modelirovaniya [The main components of organizational and economic modeling]. Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2021, no. 172 (08), pp. 1-19.
7. Kunitsyna A.G., Vinskovskaya L.A. Prognozirovanie s pomoshchyu regressionnogo analiza [Forecasting using regression analysis]. Dostizheniya nauki i obrazovaniya [Science and Education Achievements], 2020, no. 2, pp. 17-19.
8. Khutiev A.M. Analiz sistemy vzaimootnosheniy s kontragentami v sovremennoy ekonomike [Analysis of the system of relationships with counterparties in the modern economy]. Khronoekonomika [Chronoeconomics], 2020, no. 3 (24), pp. 242-245.
9. Rodicheva V.P. Osobennosti i perspektivy raschetov s kontragentami v sovremennykh usloviyakh [Features and prospects of settlements with counterparties in modern conditions]. Vestnik ekspertnogo soveta [The Expert Council Bulletin], 2020, no. 2-3 (21-22), pp. 66-73.
10. Zotikov N.Z. Kontragent - nadezhnyy partner ili istochnik nalogovogo riska [A counterparty is a reliable partner or a source of tax risk] Vestnik evraziyskoy nauki [Bulletin of Eurasian Science], 2021, no. 1, pp. 1–21.
11. Danko K.A. Neobkhodimye protsedury proverki kontragenta pered zaklyucheniem sdelki [Necessary procedures for checking a counterparty before concluding a transaction] Zhurnal Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Yurisprudentsiya [The bulletin of the Moscow State Regional University. Series: jurisprudence], 2021, no. 3, pp. 98-102.
12. Edelkina A.G. Protsess proverki kontragentov kak vazhnyy element kompleksa [The process of checking counterparties as an important element of the complex]. Vestnik evraziyskoy nauki [Eurasian Science Bulletin], 2021, no. 5, pp. 1-12.
13. Odoeva O.I., Gomboeva A.N. Povyshenie effektivnosti sistemy vnutrennego kontrolya raschetov s kontragentami v organizatsii [Improving the efficiency of the system of internal control of settlements with counterparties in an organization]. Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika i menedzhment [The Bulletin of the Buryat State University. Economics and Management], 2020, no. 4, pp. 118-125.
14. Eremina N.V., Musaeva B.M., Khakhaleva E.A. K voprosu ob effektivnosti sistemy vnutrennego kontrolya sostoyaniya vzaimoraschetov s kontragentami [On the issue of the effectiveness of the internal control system for the state of mutual settlements with counterparties]. Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya [Natural Humanitarian Research], 2022, no. 40 (2), pp. 104-108
15. Koneva M.V. Kontrol vzaimoraschetov s kontragentami s primeneniem ikt v bukhgalterskom uchete stroitelnykh organizatsiy [Control of settlements with counterparties using ICT in the accounting of construction organizations]. Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya [Natural Humanitarian Research], 2020, no. 31 (5), pp. 335-342.

Polina A. Tuktarova. *PhD in Economics.*

Svetlana M. Davletshina. *PhD in Economics of the Department of Economics of Entrepreneurship, Ufa University of Sciences and Technologies, fdo@ugatu.su. Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Karl Marx 12.*

Diana I. Khamidullina. *Assistant of the Department of Economics of Entrepreneurship, Ufa University of Sciences and Technologies, fdo@ugatu.su. Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Karl Marx 12.*

Статья поступила в редакцию 09.01.2023; одобрена после рецензирования 29.05.2023; принята к публикации 15.06.2023.

The article was submitted 01/09/2023; approved after reviewing 05/29/2023; accepted for publication 06/15/2023.

Информационные технологии

УДК 004.91:004.738.5
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.013

Вопросы ресурсов корпоративной информационной системы СО РАН: история и современное состояние

Бычков Игорь Вячеславович[1], Клименко Ольга Анатольевна[2], Рычкова Елена Владимировна[2], Шабальников Игорь Владимирович[2]

[1]Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Россия, Иркутск

[2]Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Россия, Новосибирск, *o.klimenko@sb-ras.ru*

Аннотация. В статье представлен анализ документов и новостей на корпоративном сайте Сибирского отделения РАН – портале СО РАН www.sbras.ru. Особенностью корпоративного сайта является то, что он содержит обширную информацию о деятельности Отделения с момента основания в 1957 году. Портал СО РАН начал работу в 1996 году, и с этого времени проводилась систематизация документов, которая позволяет проводить глубокий анализ. Всего на корпоративном сайте хранится более 16 тыс. записей об исследованиях в области точных, естественных и гуманитарных наук. Большой пласт документов относится к развитию Сибири. В настоящее время корпоративный сайт предоставляет краткую и подробную информацию о разработках институтов и университетов Сибирского макрорегиона, которые выполняют задачу достижения технологического суверенитета России. Для предоставления достоверной, научно обоснованной информации предлагается связывать ресурсы сайтов институтов, университетов и социальных сетей в единое информационное пространство.

Ключевые слова: корпоративные информационные системы, технологический суверенитет, социальные сети

Цитирование: Бычков И.В. Вопросы ресурсов корпоративной информационной системы СО РАН: история и современное состояние / И.В. Бычков, О.А. Клименко, Е.В. Рычкова, И.В. Шабальников // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 129-137. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.013.

Введение. Сибирское отделение Академии наук СССР (СО АН СССР) основано в 1957 году как научный центр за Уралом, который должен был обеспечить обороноспособность страны, экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. В советское время важным инструментом объединения научных сил для ускоренного развития сибирского региона была комплексная программа научных исследований «Сибирь». В нее входило 40 подпрограмм, посвященных узловым проблемам социально-экономического развития Сибири: разведке, добыче и комплексной переработке полезных ископаемых, лесных и водных ресурсов, созданию новых материалов и технологий, охране окружающей среды, социальным аспектам. В рамках этой программы в 1984 году были объединены усилия более 400 организаций 60 министерств и ведомств. Красноярский филиал СО АН СССР совместно с отраслевыми научно-исследовательскими институтами, вузами и производственными организациями участвовал в 6 подпрограммах программы «Сибирь»: «Лесные ресурсы Сибири», «Благородные и редкие металлы, медь и никель Красноярского края», «Цветные металлы Красноярского края», «Угли Канско-Ачинского бассейна», «Экология, охрана окружающей среды Сибири» (раздел «Чистый Енисей»), «Аэрокосмические исследования природных ресурсов Сибири». В Восточно-Сибирском филиале СО АН СССР (г. Иркутск) в советское время функционировали межотраслевые научно-производственные объединения «Химия», «Энергия» [1].

Правопреемником СО АН СССР в 1991 году стало Сибирское отделение Российской академии наук (СО РАН).

1. История создания и развитие Сети передачи данных СО РАН. Большую роль в продвижении достижений сибирских ученых и объединении научных и образовательных организаций Сибири в информационном пространстве сыграла корпоративная сеть передачи данных СО РАН [2]. Институты СО РАН и Новосибирский государственный университет (НГУ) создавали сайты, на которых появлялись научные ресурсы, возникали взаимные ссылки. В 1996 году по инициативе академика Ю.И. Шокина был создан корпоративный сайт – портал СО РАН [3].

В 1999 году постановлением президиума СО РАН было утверждено Положение о Совете «Сети Интернет Новосибирского научного центра» [4]. Совет являлся межинститутским органом, содействующим координации работ по поддержке и развитию Интернета в Новосибирском научном центре (ННЦ). Совет обеспечивал организационно-технические мероприятия, связанные с реализацией этих работ, и был органом управления.

На заседаниях Совета обсуждались и были выработаны основные направления деятельности Совета:

- принятия и реализации организационно-технических решений, связанных с эксплуатацией, поддержкой и развитием сети;
- анализа состояния и тенденций развития информационно-телекоммуникационных технологий;
- содействия формированию информационных ресурсов научных учреждений СО РАН, сетевых услуг, информационных систем, технологий и средств их обеспечения;
- подготовки и осуществления организационных мероприятий по эксплуатации сети.

В состав Совета входили ведущие специалисты в области информационно-телекоммуникационных технологий ННЦ СО РАН и НГУ.

В марте 2000 года была принята новая целевая программа «Информационно-телекоммуникационные ресурсы СО РАН», сформирован единый Научно-координационный совет, назначены представители Совета в региональных научных центрах – координаторы программы. К 2004 году сеть Интернет ННЦ была расширена так, что объединила научные институты и организации Сибирского отделения РАН, институты Российских академий медицинских и сельскохозяйственных наук, ГНЦ вирусологии и биотехнологии «Вектор», а также ряд других научных, учебных, медицинских организаций, учреждений культуры, образования и социальной сферы [5]. Была создана региональная корпоративная сеть передачи данных Сибирского отделения РАН. Она включила в себя сети передачи данных научных центров, расположенных в Новосибирске, Иркутске, Томске, Красноярске и других городах Сибири. Сеть объединила более 150 организаций научно-образовательной сферы Сибирского региона (более 40 тыс. пользователей). Все сайты институтов СО РАН были связаны через портал СО РАН. В 2009 году в результате реорганизации с учётом новых потребностей Отделения были сформированы программы «Телекоммуникационные и мультимедийные ресурсы СО РАН» и «Информационные ресурсы СО РАН». В 2011 году на базе программы «Телекоммуникационные и мультимедийные ресурсы СО РАН» был создан Центр коллективного пользования «Система передачи данных СО РАН» [6, 7].

Группа сотрудников в составе С.В. Бредихина, И.В. Бычкова, С.Н. Васильева, С.Л. Мушера, В.С. Никульцева, Г.М. Ружникова, А.М. Федотова, И.В. Шабальникова, В.В. Шайдурова под руководством Ю.И. Шокина, участвовавших в работе по созданию информационно-телекоммуникационной инфраструктуры междисциплинарных научных исследований, как основы экономического и социального развития восточных регионов России, была награждена премией Правительства Российской Федерации 2012 года в области науки и техники [8].

В настоящее время корпоративная сеть СО РАН продолжает существовать. Поддержка функционирования сетевой инфраструктуры в Новосибирске выполняется сотрудниками Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, другие части корпоративной сети поддерживаются в каждом регионе самостоятельно.

2. Структура ресурсов СО РАН: современное состояние. Корпоративные ресурсы СО РАН состоят из портала СО РАН, сайта «Академгородок 2.0» [9], интернет-изданий «Наука в Сибири» [10], «Наука из первых рук» [11]; журнала «Наука и технологии Сибири» [12]. В марте 2022 года начал работать телеграм-канал «Советник СО РАН» [13], на котором в неформальной форме публикуются новости из институтов, университетов Сибирского макрорегиона, особое внимание уделяется достижениям молодых ученых. Функционирует канал СО РАН на YouTube с видео заседаний президиума СО РАН, общих собраний, фильмов об Отделении и др. [14].

В создании общего информационного пространства участвуют сайты Иркутского филиала СО РАН, Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», НГУ, сайты институтов и университетов Сибирского макрорегиона. В последние годы большую роль приобретают социальные сети, многие научно-образовательные организации, министерства, губернаторы используют их для быстрого распространения информации о своей деятельности.

Взаимодействие с региональными властями идет на уровне руководства СО РАН, которое принимает участие в работе научно-технических советов регионов, форумах, выставках и т.п. Новости о таких событиях регулярно публикуются в издании «Наука в Сибири» на портале СО РАН, сайтах Иркутского филиала СО РАН, «Академгородок 2.0». Администрации областей, краев и республик проводят конкурсы научно-технических проектов, информация о которых публикуется на ресурсах СО РАН. Само Отделение каждый год присуждает премии имени выдающихся ученых Сибирского отделения РАН. Информация о конкурсах для ученых федерального уровня концентрируется в разделе «Конкурсы и гранты» портала СО РАН.

С момента создания и по сей день на портале СО РАН размещаются документы, так или иначе имеющие отношение к науке в целом, такие, как указы Президента РФ, постановления Правительства РФ, документы федеральных министерств, документы региональных органов власти, Российской академии наук. За 2022 год и с января по март 2023 года на портале СО РАН были размещены документы в следующем количестве:

- Законы РФ, Указы Президента РФ – 38 документов (всего внесено 250 документов);
- постановления Правительства РФ – 64 (всего 400 документов);
- документы федеральных министерств – 38;
- документы региональных органов власти – 3;
- постановления и другие документы президиума РАН – 88;
- постановления и другие документы президиума СО РАН – 164.

Всего за весь период существования портала СО РАН в разделы «Законы РФ», «Указы Президента РФ» были внесены 250 документов, имеющих отношение к научно-технической политике РФ; в раздел «постановления Правительства РФ» – 400 документов, в раздел «Документы федеральных министерств и ведомств» (включая документы Министерства науки и высшего образования РФ) – 222 документа.

В связи с Распоряжением Правительства РФ от 26 января 2023 года [15] о принятии Стратегии социально-экономического развития Сибирского федерального округа до 2035 года, на портале СО РАН были сгруппированы в один раздел 19 новостей и 18 документов, имеющих отношение к Стратегии развития Сибири.

О работе Большой норильской экспедиции на портале СО РАН в 2022 году были опубликованы 52 новости. В этом же году деятельности Научного совета СО РАН по проблемам озера Байкал были посвящены 22 новости. С момента создания в 2019 году (и по сей день) были опубликованы 32 новости, связанные с Иркутским филиалом СО РАН.

При размещении новостей на портале СО РАН каждой присваивается признак, указывающий, к какому направления науки относится эта новость. В 2022 году были опубликованы 1746 новостей, связанных с направлениями науки (рис.1). По сравнению с 2021 годом в процентном отношении увеличилось количество новостей по направлениям «Экономические науки», «Энергетика, машиностроение, механика и процессы управления», «Химические науки».

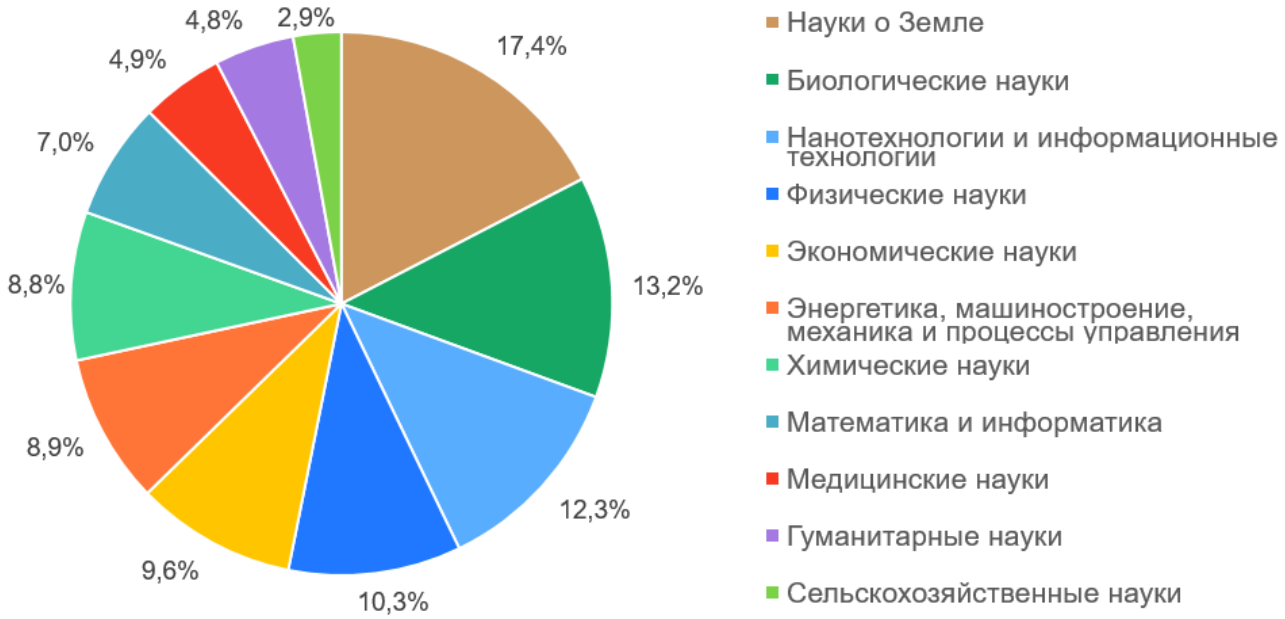


Рис. 1. Распределение новостей по направлениям науки в 2022 году

Проводится регулярный анализ посещаемости сайтов с помощью сервиса Google Analytics. Так, число пользователей, которые заходили на портал СО РАН в 2022 году с разных IP адресов, составляет около 150 тыс. человек. Анкетирование в 2023 году членов Президиума СО РАН и аппарата управления показало востребованность сайта «Академгородок 2.0», интернет-изданий «Наука в Сибири», «Наука из первых рук», журнала «Наука и технологии Сибири». Другим важным направлением деятельности СО РАН является распространение научных знаний для широких слоев населения. Большую роль в этом играют советы молодых ученых, которые проводят просветительские мероприятия и предоставляют видео-лекции.

3. Задачи технологического суверенитета. В 2022 году с изменением геополитической ситуации существенно возросла востребованность прикладных разработок ученых. Сибирское отделение РАН широко представляет в информационном пространстве достижения институтов и университетов. С 2021 года издается журнал «Наука и технологии Сибири». Как сказано в предисловии к Выпуску 1, Сибирское отделение РАН реализует системообразующую миссию, объединяя в исследовательские и инновационные проекты лучшие компетенции многих отраслей науки и технологий из разных организаций и ведомств. Аудитория нового информационного издания СО РАН – инновационные подразделения высокотехнологичных корпораций и компаний Российской Федерации и других стран, федеральные и региональные органы государственной власти, заинтересованные в совместной реализации долгосрочных проектов на основе существующих научно-технологических заделов и решений [16].

Все выпуски журнала «Наука и технологии Сибири» в формате PDF размещаются на портале СО РАН в разделе «Инновационные разработки» [12]. С марта 2021 года по декабрь 2022 года для данной страницы зафиксировано более 4 тысяч посещений. На рисунке 2 приведено количество загрузок pdf-файла каждого выпуска журнала.

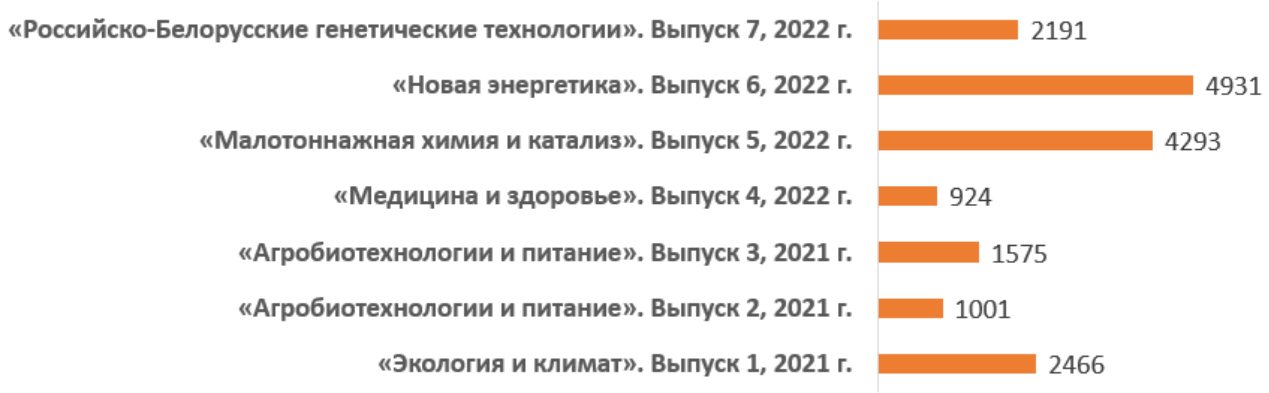


Рис. 2. Количество загрузок pdf-файлов журнала «Наука и технологии Сибири» (с августа по декабрь 2022 года)

На портале СО РАН в мае 2022 года создан раздел «Разработки институтов СО РАН» [17]. В этом разделе разработки сгруппированы по категориям. Если разработка отнесена к двум или трём категориям, то она присутствует в каждой из этих категорий. Категория является веб-страницей, где для каждой разработки приведены ее название, назначение, решаемые задачи и ссылка на страницу института-разработчика в базе данных «Организации и сотрудники СО РАН» на портале СО РАН [18]. Количество предложений по категориям приведено на рисунке 3. На рисунке 4 показано количество просмотров каждой категории.

Рис. 3. Разработки институтов СО РАН: количество предложений в каждой категории

Рис. 4. Количество просмотров веб-страницы каждой категории в разделе «Разработки институтов СО РАН» с мая 2022 г. по март 2023 г.

Заключение. На современном этапе наличие в корпоративной информационной системе СО РАН ресурсов, содержащих концентрированную информацию по многим научно-техническим и гуманитарным проблемам, позволяет предоставить вспомогательную информацию для принятия решений в сфере формирования научно-технической политики. Руководство СО РАН отмечает, что созданная на корпоративном сайте подборка документов (в разделах «Законы РФ», «Указы Президента РФ», «Постановления Правительства РФ», «Документы федеральных министерств и ведомств», «Документы РАН») способствует подготовке аналитических записок и выработке экспертных предложений от Сибирского отделения РАН. Для институтов и университетов возможно размещение информации о своих разработках в разных представлениях, в том числе в виде баз открытых данных. Для предоставления достоверной, научно обоснованной информации предлагается связывать ресурсы сайтов институтов, университетов и социальных сетей в единое информационное пространство.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий «Разработка, создание и исследование распределенных информационных систем для поддержки принятия решений и автоматизации процессов» (№ FWNW-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

Список источников

1. Академия наук СССР. Сибирское отделение: проспект. – Включ. разд.: Развитие академической науки в Сибири; Новосибирский научный центр; Бурятский филиал; Восточно-Сибирский филиал; Красноярский филиал; Томский филиал; Якутский филиал; Научные учреждения в Чите, Кемерове, Тюмени, Барнауле, Кызыле, Омске. – Новосибирск: Внешторгиздат, 1987.
2. Шокин Ю.И. Вопросы развития Сети Интернет Новосибирского научного центра / Ю.И. Шокин, А.М. Федотов, В.С. Никульцев // Вычислительные технологии, 1997. – Т. 2. – № 3. – С. 97-103.
3. Портал СО РАН // Официальный сайт Сибирского отделения РАН. – URL: https://www.sbras.ru/ru (дата обращения: 28.03.2023).
4. Постановление президиума СО РАН от 10.06.1999 № 178 «Положение о сети “ИНТЕРНЕТ ННЦ”» // Портал СО РАН, 1999. – URL: https://www.sbras.ru/files/news/docs/256.html (дата обращения: 28.03.2023).

5. Отчет о деятельности Сибирского отделения Российской академии наук в 2004 году. Раздел «Вычислительные и информационно-телекоммуникационные ресурсы» // Портал СО РАН, 2004. – URL: https://www.sbras.ru/files/files/rep/rep2004/tom3/1_5.pdf (дата обращения: 28.03.2023).
6. Постановление президиума СО РАН от 03.02.2011 № 40 «О программе “Телекоммуникационные и мультимедийные ресурсы СО РАН” и создании ЦКП СО РАН “Система передачи данных СО РАН”» // Портал СО РАН, 2011. – URL: https://www.sbras.ru/files/news/docs/pso_40-03-02-11.pdf (дата обращения: 28.03.2023).
7. Шокин Ю.И. Телекоммуникационные и мультимедийные ресурсы СО РАН / Ю.И. Шокин, И.В. Бычков, В.В. Шайдуров // Сибирское отделение РАН в XXI веке: сб. статей. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – С.171-176.
8. Плотников Ю. Двадцать лет работы увенчались премией правительства / Ю. Плотников // Газета «Наука в Сибири», № 12 (21 марта 2013 г.). – С. 2-9. – URL: https://www.sbras.info/system/files?file=archive/images/2013/n12/nvs_12_black.pdf (дата обращения: 28.03.2023).
9. Сайт «Академгородок 2.0». – URL: http://www.akademgorodok2.ru/ (дата обращения: 28.03.2023).
10. Интернет-издание «Наука в Сибири». – URL: https://www.sbras.info (дата обращения: 28.03.2023).
11. Журнал «Наука из первых рук». – URL: https://scfh.ru (дата обращения: 28.03.2023).
12. Журнал «Наука и технологии Сибири» // Портал СО РАН, 2021. – URL: https://www.sbras.ru/ru/innovation (дата обращения: 28.03.2023).
13. Телеграм-канал «Советник СО РАН». – URL: https://t.me/CouncilorSBRAS (дата обращения 28.03.2023).
14. Канал СО РАН на YouTube. – URL: https://www.youtube.com/SBRAS_official (дата обращения: 28.03.2023).
15. Распоряжение Правительства РФ от 26.01.2023 № 129-р // Портал СО РАН, 2023. – URL: https://www.sbras.ru/ru/news/49572 (дата обращения: 28.03.2023).
16. «Наука и технологии». Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2021. – Вып. 1 «Экология и климат». – С. 6. – URL: https://www.sbras.ru/files/files/brochures/nit_2021_07_15.pdf (дата обращения 28.03.2023).
17. Раздел «Разработки институтов СО РАН» // Портал СО РАН, 2022. – URL: https://www.sbras.ru/ru/import_substitution (дата обращения: 28.03.2023).
18. Клименко О.А. Развитие информационной среды СО РАН в условиях санкционных ограничений и информационной войны против РФ / О.А. Клименко, Е.В. Рычкова, И.В. Шабальников // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии, 2022. – Т. 20. – № 3. – С.29-37. – DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20-3-29-37.

Бычков Игорь Вячеславович. *Академик РАН, профессор, доктор технических наук, директор Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, AuthorID: 62875, SPIN: 5816-7451, ORCID: 0000-0002-1765-0769, bychkov@icc.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, а/я 1233.*

Клименко Ольга Анатольевна. *Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, AuthorID: 15086, SPIN: 4784-0360, o.klimenko@sb-ras.ru, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, д. 6.*

Рычкова Елена Владимировна. *Кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, AuthorID: 68501, SPIN: 1933-9426, ORCID: 0000-0001-9692-8441, helen@ict.nsc.ru, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, д. 6.*

Шабальников Игорь Владимирович. *Заведующий сектором информационных систем, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, AuthorID: 599979, ORCID: 0000-0001-9821-854X, shabalnikov@ict.sbras.ru, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, д. 6.*

UDC 004.91:004.738.5
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.013

Issues of resources of the corporate information system of the SB RAS: history and current state

Igor V. Bychkov[1], Olga A. Klimenko[2], Elena V. Rychkova[2], Igor V. Shabalnikov[2]

[1]V.M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS, Russia, Irkutsk
[2]Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Russia, Novosibirsk, *o.klimenko@sb-ras.ru*

Abstract. The article presents an analysis of documents and news on the corporate website of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences - the SB RAS portal www.sbras.ru. A feature of the corporate website is that it contains extensive information about the activities of the Department since its foundation in 1957. The portal of the SB RAS began its work in 1996, and since that time, the systematization of documents has been carried out, which allows for a deep analysis. In total, the corporate website stores more than 16 thousand records on research in the field of exact, natural and human sciences. A large layer of documents refers to the development of Siberia. Currently, the corporate website provides brief and detailed information about the developments of institutes and universities of the Siberian macroregion, which carry out the task of achieving the technological sovereignty of Russia. The authors propose to provide reliable, scientifically based information to link the resources of the websites of institutes, universities and social networks into a common information space.

Keywords: corporate information systems, technological sovereignty, social networks

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWNW-2021-0005) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030, project “Development, creation and research of distributed information systems for decision support and process automation” of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies.

References

1. Akademiya nauk SSSR. Sibirskoe otdelenie: prospekt. Vklyuchaya razdely: Razvitie akademicheskoy nauki v Sibiri; Novosibirskiy nauchnyy tsentr; Buryatskiy filial; Vostochno-Sibirskiy filial; Krasnoyarskiy filial; Tomskiy filial; Yakutskiy filial; Nauchnye uchrezhdeniya v Chite, Kemerove, Tyumeni, Barnaule, Kyzyle, Omske [USSR Academy of Sciences. Siberian branch: prospectus. Including sections: Development of academic science in Siberia; Novosibirsk Scientific Center; Buryat branch; East Siberian branch; Krasnoyarsk branch; Tomsk branch; Yakut branch; Scientific institutions in Chita, Kemerovo, Tyumen, Barnaul, Kyzyl, Omsk]. Novosibirsk, Vneshtorgizdat, 1987.
2. Shokin Y.I., Fedotov A.M., Nikultsev V.S. Voprosy razvitiya Seti Internet Novosibirskogo nauchnogo tsentra [On development of Internet network in Novosibirsk Researche Centre]. Vychislitel'nyye tekhnologii [Computational Technologies], 1997, vol. 2, no. 3, pp. 97-103.
3. Portal SO RAN. Ofitsialnyy sayt Sibirskogo otdeleniya RAN [Portal of the SB RAS. Official website of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences]. Available at: https://www.sbras.ru/ru (accessed: 03/28/23).
4. Postanovlenie prezidiuma SO RAN ot 10.06.1999 no. 178 “Polozhenie o seti INTERNET NNTs” [Decree of the Presidium of the SB RAS dated June 10, 1999 no. 178 “Regulations on the NSC INTERNET network”]. Portal of the SB RAS, 1999, available at: https://www.sbras.ru/files/news/docs/256.html (accessed: 03/28/23).
5. Otchet o deyatelnosti Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk v 2004 godu. Razdel “Vychislitelnye i informatsionno-telekommunikatsionnye resursy” [Report on the activities of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in 2004. Section “Computing and information and telecommunication resources”]. Portal SO RAN [Portal of the SB RAS], 2004, available at: https://www.sbras.ru/ files/files/rep/rep2004/tom3/1_5.pdf (accessed: 03/28/23).
6. Postanovlenie prezidiuma SO RAN ot 03.02.2011 no. 40 “O programme Telekommunikatsionnye i multimediynye resursy SO RAN i sozdanii TsKP SO RAN Sistema peredachi dannykh SO RAN” [Decree of the Presidium of the SB RAS dated February 3, 2011 no. 40 “On the program Telecommunication and multimedia resources of the SB RAS and the creation of the Central Collective Use Center of the SB RAS Data transmission system of the SB RAS”]. Portal SO RAN [Portal of the SB RAS], 2011, available at: https://www.sbras.ru/files/news/docs/pso_40-03-02-11.pdf (accessed: 03/28/23).
7. Shokin Yu.I., Bychkov I.V., Shaidurov V.V. Telekommunikatsionnye i multimediynye resursy SO RAN [Telecommunication and multimedia resources of the SB RAS]. Sibirskoye otdeleniye RAN v XXI veke: sb. statey.

[Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in the 21st century: proc.], Novosibisk, SB RAS Publ., 2012, pp. 171-176.

8. Plotnikov Yu. Dvadtsat let raboty uvenchalis premiey pravitelstva [Twenty years of work crowned with a government prize]. Gazeta «Nauka v Sibiri» [Newspaper "Science in Siberia"], no. 12 (March 21, 2013), pp. 2-9, available at: https://www.sbras.info/system/files?file=archive/images/2013/n12/nvs_12_black.pdf (accessed: 03/28/23).
9. Sayt "Akademgorodok 2.0" [Site "Akademgorodok 2.0"]. Available at: http://www.akademgorodok2.ru/ (accessed: 03/28/23).
10. Internet-izdaniye "Nauka v Sibiri" [Internet edition "Science in Siberia"]. Available at: https://www.sbras.info (accessed: 03/28/23).
11. Zhurnal "Nauka iz pervykh ruk" [Journal "SCIENCE First Hand"]. Available at: https://scfh.ru (accessed: 03/28/23).
12. Zhurnal "Nauka i tekhnologii Sibiri" [Journal "Science and Technologies of Siberia"]. Portal SO RAN [Portal of the SB RAS], 2021, available at: https://www.sbras.ru/ru/innovation (accessed: 03/28/23).
13. Telegram-kanal "Sovetnik SO RAN" [Telegram-channel "Councilor of the SB RAS"], available at: https://t.me/CouncilorSBRAS (accessed: 03/28/23).
14. Kanal SO RAN na YouTube [YouTube channel of the SB RAS], available at: https://www.youtube.com/SBRAS_official (accessed: 03/28/23).
15. Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 26.01.2023 № 129-p [Decree of the Government of the Russian Federation dated January 26, 2023 No. 129-p]. Portal SO RAN [Portal of the SB RAS]. 2023, available at https://www.sbras.ru/ru/news/49572 (accessed: 03/28/23).
16. "Nauka i tekhnologii" Novosibirsk ["Science and Technologies". Novosibirsk]. Ekologiya i klimat [Ecology and Climate], 2021, iss. 1, p. 6, available at: https://www.sbras.ru/files/files/brochures/nit_2021_07_15.pdf (accessed: 03/28/23).
17. Razdel "Razrabotki institutov SO RAN" [Section "Developments of the Institutes of the SB RAS"]. Portal SO RAN [Portal of the SB RAS], 2022, available at: https://www.sbras.ru/ru/import_substitution (accessed: 03/28/23).
18. Klimenko O.A., Rychkova E.V., Shabalnikov I.V. Razvitie informatsionnoy sredy SO RAN v usloviyakh sanktsionnykh ogranicheniy i informatsionnoy voyny protiv RF [Development of the Information Environment of SB RAS under Sanctions and Information Warfare against the Russian Federation]. Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii [Vestnik NSU. Series: Information Technologies], 2022, vol. 20, no. 3, pp. 29-37, DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20-3-29-37.

Bychkov Igor Vyacheslavovich. *Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Director of the V.M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS, AuthorID: 62875, SPIN: 5816-7451, ORCID: 0000-0002-1765-0769, bychkov@icc.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova str., 134.*

Klimenko Olga Anatolievna. *Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, AuthorID: 15086, SPIN: 4784-0360, o.klimenko@sb-ras.ru, Russia, Novosibirsk, Ac. Lavrentieva ave., 6.*

Rychkova Elena Vladimirovna. *Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Junior Researcher of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, AuthorID: 68501, SPIN: 1933-9426, ORCID: 0000-0001-9692-8441, helen@ict.nsc.ru, Russia, Novosibirsk, Ac. Lavrentieva ave., 6.*

Shabalnikov Igor Vladimirovich. *Head of Information Systems Sector of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, AuthorID: 599979, ORCID: 0000-0001-9821-854X, shabalnikov@ict.sbras.ru, Russia, Novosibirsk, Ac. Lavrentieva ave., 6.*

Статья поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 04.05.2023; принята к публикации 05.05.2023.
The article was submitted 04/28/2023; approved after reviewing 05/04/2023; accepted for publication 05/05/2023.

УДК 004.89
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.014

Программное средство извлечения сущностей из семантически аннотированных табличных данных

Амирасланов Ильгар Вугарович[1], Дородных Никита Олегович[2], Юрин Александр Юрьевич[1,2]

[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск, *iskander@icc.ru*

[2]Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Россия, Иркутск.

Аннотация. В настоящее время графы знаний широко применяются в различных предметных областях, например, в промышленности, торговле, финансах и социальных сетях. Граф знаний представляет собой мощное средство объединения и представления информации с использованием стандартизированных методов моделирования знаний. Однако, разработка графов знаний и, в частности, пополнение их новыми конкретными сущностями (фактами) остается сложной задачей. Использование различных информационных источников может облегчить этот процесс. Таким источником могут быть таблицы, которые потенциально содержат богатую семантическую информацию. В статье предлагается подход и его программная реализация для автоматизированного извлечения значимой информации из табличных данных в виде фактов и пополнения ими целевого графа знаний. Основной особенностью предлагаемого подхода является сочетание эвристических методов с моделями глубокого машинного обучения для семантического аннотирования табличных данных. Применимость подхода продемонстрирована на двух примерах: при анализе рынка труда Иркутской области и оценке технического состояния нефтехимического оборудования.

Ключевые слова: семантический веб, приобретение знаний, граф знаний, семантическая интерпретация таблиц, извлечение фактов, пополнение графа знаний, таблица

Цитирование: Амирасланов И.В. Программное средство извлечения сущностей из семантически аннотированных табличных данных / И.В. Амирасланов, Н.О. Дородных, А.Ю. Юрин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 138-151. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.014.

Введение. В настоящее время разработка предметно-ориентированных интеллектуальных систем, направленных на решение сложных задач (например, диагностирование и оценка технического состояния сложных технических систем, прогнозирование чрезвычайных ситуаций, энергетическая безопасность, медицина и т.д.), остается актуальной задачей. Одной из тенденций в этой области является использование графов знаний, предназначенных для накопления и передачи знаний о реальном мире, узлы которых представляют интересующие объекты, а ребра – отношения между этими объектами [1]. Разработка графов знаний является трудоемкой и сложной задачей, которая до сих пор не решена в полной мере. Поэтому исследования, направленные на создание новых методов обработки информации для конструирования и пополнения графов знаний при решении практических слабоформализуемых задач в различных предметных областях, являются актуальными [2]. В контексте данной проблематики перспективным подходом является использование различных информационных источников (например, баз данных, документов, концептуальных моделей). В качестве такого источника могут быть использованы и таблицы, которые широко используются в различных исследованиях и в анализе данных. Большое количество таблиц размещено в Интернет (например, в формате HTML), а также в электронных документах (например, в форматах DOCX и PDF), в рукописных материалах и в компьютерных программах. Как показали недавние исследования [3], таблицы могут являться ценным источником знаний и содержать миллионы полезных фактов. Однако таблицы весьма неоднородны по своей структуре, содержанию и назначению. В большинстве случаев они не интерпретируются компьютерными программами

без участия человека. Их исходное представление не обеспечивает всей явной семантики, необходимой для их интерпретации в автоматическом режиме. Этот факт препятствует активному практическому использованию таких табличных данных.

Ранее авторами был предложен подход для автоматизированного извлечения конкретных сущностей (фактов) из таблиц и пополнения ими целевого графа знаний [4]. В данной статье предлагается расширить и улучшить этот подход, в частности, используя новый гибридный метод семантического аннотирования столбцов таблицы, основанный на эвристических решениях и методах машинного обучения. Предлагаемый подход реализован в форме веб-ориентированного программного средства – «TabbyLD2» [5]. Также в статье представлены два прикладных примера и полученная экспериментальная оценка.

1. Состояние вопроса. Пополнение графов знаний на основе таблиц требует интерпретации табличных данных. Эта проблема известна как Семантическая Интерпретация Таблиц (СИТ) (Semantic Table Interpretation) [6] и представляет собой распознавание и связывание табличного содержания с внешними понятиями из целевого графа знаний. СИТ включает в себя три основные задачи [7]:

- *семантическое аннотирование ячеек* (*САЯ*) – сопоставление значений ячеек с сущностями (экземплярами классов) из целевого графа знаний;
- *семантическое аннотирование столбцов* (*САС*) – сопоставление столбцов таблицы с классами или типами данных из целевого графа знаний;
- *семантическое аннотирование отношений между столбцами* (*САО*) – сопоставление отношений между столбцами со свойствами (предикатами) из целевого графа знаний.

В последние годы проблеме СИТ уделяется большое внимание. В частности, методы СИТ основаны на использовании: сопоставления онтологий; поиска сущностей, как в глобальных таксономиях (например, DBpedia, Wikidata, Yago, Freebase), так и в предметно-ориентированных графах знаний; викификации и векторном представлении графов знаний. Например, в [8] экспериментально показано, что более эффективным является гибридный подход «FactBase Lookup», который сочетает в себе сервисы поиска сущностей и технику векторного представления графов знаний.

За последние три года наблюдается рост работ, связанных с автоматическим семантическим аннотированием табличных данных, в частности, веб-таблиц. Как правило, они сосредоточены на анализе естественно-языкового содержания и контекста таблиц. Так, в [9] предлагается новая модель гибридного семантического сопоставления под названием «JHSTabEL» для решения задачи САЯ. «Sherlock» [10] и «Sato» [11] определяют семантические типы для столбцов таблицы, используя более тысячи признаков, извлеченных из набора реляционных веб-таблиц для обучения искусственных нейронных сетей. При этом «Sato» дополнительно использует векторное представление таблицы с признаками скрытого размещения Дирихле (Latent Dirichlet Allocation) и попарные зависимости столбцов, моделируемые слоем случайных условных полей (Conditional Random Fields). «ColNet» [12] представляет собой фреймворк, использующий свёрточные нейронные сети (Convolutional Neural Network – CNN), встраивая общую семантику столбцов в векторное пространство для предсказания столбцам таблицы соответствующих семантических типов (классов). Программные решения: «Doduo» [13], «SeLaB» [14], «TURL» [15] и «TaBERT» [16] предоставляют предварительно обученные табличные модели с использованием архитектуры «Transformer» и языковых моделей на основе «BERT» для различных задач СИТ.

Несмотря на повышенный интерес к моделям понимания таблиц, в научной литературе описано очень мало примеров их применения на практике. Существующие подходы представляют ограниченное количество семантических типов (классов) для аннотирования таблиц

(только те типы, для которых обучены классификаторы). Еще одним очень важным недостатком таких подходов является отсутствие этапа генерации семантической разметки таблицы, например, в виде триплетов в формате RDF. Реализация большинства подходов не доводится до конечного пользователя. В частности, программные инструменты подходят только для программистов, сложны в настройке и не имеют графического пользовательского интерфейса.

2. Постановка задачи. Вертикальные таблицы, состоящие из столбцов данных, используются в качестве входных данных для предлагаемого подхода. Каждый такой столбец может описывать только один тип данных, а также может содержать заголовок.

В таких таблицах столбцы могут быть:

- *категориальными* – содержат текстовые упоминания некоторых объектов предметной области;
- *литеральными* – содержат различные литеральные значения, например, даты, числа и т.д.

Вертикальные таблицы могут содержать сущностный (тематический) столбец – это категориальный столбец, который определяет семантическое содержание исходной таблицы и может быть потенциальным первичным ключом. Это делает вертикальную таблицу реляционной.

Предположение 1. В обрабатываемых таблицах нет объединенных ячеек.

Предположение 2. Исходные таблицы обрабатываются независимо друг от друга.

Таким образом, предлагаемый подход направлен на аннотирование вертикальных таблиц (решение задач САС и САО) на основе целевого графа знаний. DBpedia [17] используется в качестве целевого графа знаний общего назначения.

3. Предлагаемый подход.

3.1. Основные этапы подхода. Основываясь на результатах [4, 18], предлагаемый подход состоит из следующих основных этапов (рис. 1):

- *предварительная обработка таблицы* – подготовка табличных данных к дальнейшему процессу аннотирования. Данный этап включает в себя четыре основные задачи: (1) преобразование форматов таблиц; (2) очистка данных (например, восстановление не-корректных символов Юникода и тегов HTML, удаление множественных пробелов и «мусорных» символов); (3) атомарная классификация столбцов на категориальные (со-держащие именованные сущности) и литеральные (содержащие различные литеральные значения, например, даты или числа) типы; (4) идентификация сущностного (тематического) столбца, определяющего смысловое содержание таблицы;
- *связывание сущностей* – представляет собой решение задачи САЯ;
- *определение семантических типов для столбцов* – представляет собой решение задачи САС отдельно для категориальных, включая сущностный столбец, и литеральных столбцов;
- *определение связей между столбцами* – представляет собой решение задачи САО;
- *извлечение сущностей* – извлечение новых конкретных сущностей (фактов) на основе определенных аннотаций для столбцов и отношений между ними. Извлеченные таким образом сущности могут пополнить целевой граф знаний.

В обновленной версии данного подхода улучшены этапы предварительной обработки таблицы в контексте решения задачи определения атомарных типов столбцов, а также семантического аннотирования категориальных столбцов. Подробное описание разработанного алгоритмического обеспечения, решающего остальные задачи на других этапах, представлено в работе [4]. Далее подробно рассмотрим обновленные этапы (рис.1).

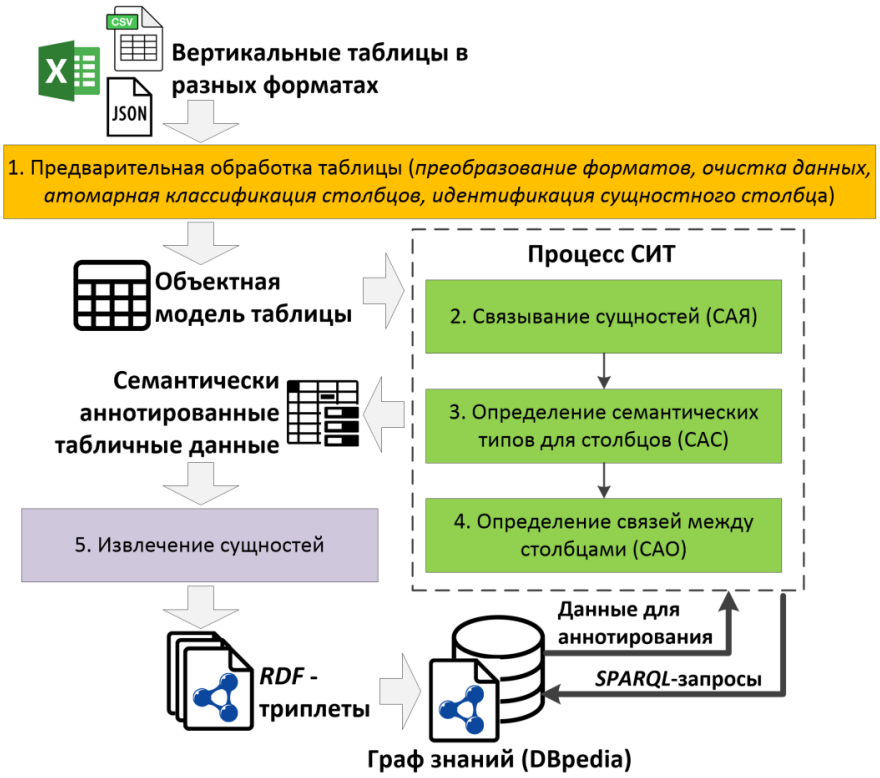


Рис. 1. Основные этапы предлагаемого подхода

3.2. Атомарная классификация столбцов. Атомарная классификация столбцов представляет собой автоматическое определение категориальных и литеральных столбцов в исходной таблице. Для этого используется библиотека обработки естественного языка «Stanford CoreNLP» [19] и, в частности, распознаватель именованных сущностей «Stanford Named-Entity Recognizer (Stanford NER)». «Stanford NER» распознает вхождения различных именованных сущностей в тексте. Для этого распознаватель включает в себя следующий набор так называемых NER-классов: «PERSON», «NORP», «FACILITY», «ORGANIZATION», «GPE», «LOCATION», «PRODUCT», «EVENT», «ART_WORK», «LAW», «DATE», «TIME», «PERCENT», «MONEY», «QUANTITY», «ORDINAL», «CARDINAL». Однако распознаватель плохо справляется с короткими текстами, представленными в ячейках таблицы. По этой причине дополнительно используется библиотека «Duckling» [20]. Данная библиотека написана на языке Haskell и позволяет анализировать входной текст и представлять его в виде структурированных распознанных данных с использованием большого набора именованных классов сущностей, например, «AmountOfMoney», «CreditCardNumber», «Distance» и др. Кроме того, используется библиотека «DateParser» [21] для лучшего определения даты в различных форматах. Таким образом, каждой ячейке в исходной таблице назначается расширенный набор NER-классов. В зависимости от назначенного NER-класса ячейка может быть либо категориальной, либо литеральной. Атомарный тип для столбца определяется на основе общего количества категориальных и литеральных ячеек. Результаты этого этапа используются в дальнейшем процессе СИТ.

3.3. Определение семантических типов для столбцов. В работе [4] использовались следующие методы определения семантического типа (класса) для категориальных столбцов, включая сущностный столбец:

– *голосование методом простого большинства* – это эвристика, в которой используется подсчет частоты встречаемости классов, которым принадлежат определенные релевантные сущности, присвоенные каждой ячейке в столбце. Таким образом, данная эвристика

полностью основана на результатах решения задачи САЯ, поэтому она не гарантирует высокой степени соответствия выбранному классу;

– *сходство по заголовку* – это эвристика, использующая лексическое сопоставление между названием заголовка и названием класса из полученного набора кандидатов. Данная эвристика активно использует заголовки столбцов, которые часто недоступны в реальных табличных данных;
– *предсказание класса* – это метод, основанный на фреймворке «ColNet» [12], который использует настраиваемые бинарные классификаторы (CNN-модели) для предсказания релевантного класса из набора кандидатов соответствующему категориальному столбцу. Однако этот метод, так же, как и эвристика «*голосование методом простого большинства*», зависит от результатов решения задачи САЯ, которые в большинстве практических задач отсутствуют

Для устранения выделенных недостатков предлагается модифицированное решение задачи САС, состоящее из трёх методов:

1. Метод на основе NER-классов. Данный метод основан на информации об уже распознанных именованных сущностях (NER-классах) на этапе атомарной классификации столбцов (см. подраздел 3.2). Определенные для каждой ячейки NER-классы сопоставляются с классами из целевого графа знаний DBpedia (таблица 1).

Таблица 1. Соответствия основных NER-классов и классов из графа знаний DBpedia

NER-классы	Классы из DBpedia	Описание
LOCATION	dbo:Park, dbo:Mine, dbo:Garden, dbo:Cemetery, dbo:WineRegion, dbo:NaturalPlace, dbo:ProtectedArea, dbo:WorldHeritageSite, dbo:SiteOfSpecialScientificInterest	*Места, не относящиеся к GPE, например, горные хребты, водоемы, реки и т.д.*
GPE	dbo:PopulatedPlace	*Страны, города, штаты.*
NORP	dbo:EthnicGroup	*Национальности, религиозные или политические группы.*
PERSON	dbo:Person	*Люди, в том числе вымышленные.*
PRODUCT	dbo:Device, dbo:Food, dbo:MeanOfTransportation	*Транспорт, оружие, еда и т.д. (не услуги).*
FACILITY	dbo:ArchitecturalStructure	*Здания, аэропорты, автомагистрали, мосты и т.д.*
ORG	dbo:Organisation	*Компании, агентства, учреждения и т.д.*
EVENT	dbo:Event	*Названия ураганов, сражений, войн, спортивных событий и т.д.*
WORK_OF_ART	dbo:Work	*Названия книг, песен и т.д.*
LAW	dbo:Law, dbo:LegalCase	*Названия нормативных документов, законов.*
NONE	owl#Thing	*Результат NER пуст.*

Далее подсчитывается количество появлений соответствующего класса DBpedia. Данное количество преобразуется в оценку от 0 до 1 на основе алгоритма «Minimax». Класс с наивысшей нормализованной оценкой определяется как наиболее подходящий и присваивается текущему категориальному столбцу.

2. Метод предсказания класса на основе контекста. Данный метод основан на фреймворке «Sato» [11] и обрабатывает два типа контекста:

- *глобальный контекст* – представляет все значения ячеек исходной таблицы, т.е. он одинаков для каждого столбца исходной таблицы;
- *локальный контекст* – представляет набор независимо предсказанных классов для соседних столбцов.

Указанные зависимости используются в модели глубокого машинного обучения «Sato», которая обучалась на коллекции таблиц «WebTables» (около 80 тысяч реляционных веб-таблиц) из проекта «VizNet». В отличие от фреймворка «ColNet», «Sato» не требует предварительного извлечения конкретных сущностей из графа знаний на основе ячеек таблицы и работает напрямую с табличными данными. Потенциально, этот факт делает подход «Sato» более перспективным, хотя он требует большого количества табличных данных для обучения.

3. Метод связности классов. Данный метод используется для корректировки выбора релевантных классов после применения всех остальных методов аннотирования. Метод основан на идеях вероятностной графовой модели (probabilistic graphical model), в частности, неориентированной модели в виде Марковских случайных полей, которые включают использование переменных узлов для представления текущих состояний аннотаций столбцов таблицы. Каждый такой переменный узел имеет следующие свойства (параметры):

- «*семантический тип*» – это текущий класс из набора кандидатов, который выбирается в качестве целевой аннотации на основе применения всех методов аннотирования;
- «*оценка*» – это итоговая оценка, присвоенная данному классу-кандидату на основе применения всех методов аннотирования;
- «*столбец*» – номер столбца;
- «*связность*» – параметр, показывающий уровень связанности текущего переменного узла с другими (количество отношений между текущими выбранными классами в качестве аннотаций);
- «*изменение*» – параметр, указывающий, следует ли менять данный переменный узел на текущей итерации.

Перед началом работы метода каждый класс из набора кандидатов сортируется по убыванию агрегированной оценки, которая считается путем суммирования всех оценок, полученных в результате применения всех остальных методов аннотирования. Далее осуществляется процедура инициализации переменных узлов. В частности, первый класс из отсортированного набора кандидатов присваивается параметру «семантический тип», а его агрегированная оценка присваивается параметру «оценка» в переменной узла. Параметр «связность» по умолчанию равен нулю, а параметр «изменение» выставлен в состояние «True» для всех переменных узлов. Далее делается попытка найти такую комбинацию переменных узлов, где их «связность» по возможности будет ненулевой, но при этом также будет учитываться и их «оценка». Для этого переменные узлы итеративно обновляются следующими классами из набора кандидатов. В конечном итоге класс-кандидат с наивысшим параметром «связности» и «оценкой» определяется как наиболее подходящий (релевантный) класс и назначается текущему столбцу в качестве итоговой аннотации.

4. Программная реализация. Модифицированный подход реализован в виде программного средства «TabbyLD2» [5], написанного на языке Python и включающего в себя следующие основные программные модули:

- *модель данных* (*datamodel*) – содержит объектные модели Python для описания табличных данных и элементов целевого графа знаний;
- *модуль предобработки* (*preprocessing*) – реализует этап очистки табличных данных, атомарную классификацию столбцов и идентификацию сущностного столбца;
- *семантический аннотатор* (*table_annotation*) – реализует этапы САЯ, САС и САО, а также содержит генератор RDF-триплетов и модуль для взаимодействия с целевыми графами знаний, включая сервисы «DBpedia SPARQL Endpoint» и «DBpedia Lookup»;
- *вспомогательный модуль* (*helpers*) – содержит различные полезные функции для работы с файлами, данными и т.д.;
- *модуль экспериментальной оценки* (*experimental_evaluation*) – содержит сценарии для запуска экспериментов на различных тестовых наборах данных.

Разработанное средство имеет два режима работы:

- *консольный режим* – запускается через командную строку и является основным режимом для обработки таблиц;
- *веб-режим* – запускается в виде веб-сервера и использует программный интерфейс взаимодействия через REST API для доступа к основным функциям семантического аннотатора.

В дополнение к основному программному средству разработано веб-ориентированное клиентское приложение «TabbyLD2-Client» [22], предоставляющее пользовательский графический интерфейс доступа к функциям СИТ и генерации RDF-триплетов, реализованных в «TabbyLD2». Клиентское веб-приложение разработано с использованием языка PHP и фреймворка Yii2 на основе паттерна проектирования «Model-View-Controller» и ориентированно на непрограммирующих пользователей (например, предметных экспертов, аналитиков данных, инженеров по знаниям).

Клиентское веб-приложение реализует следующие основные функции:

- импорт табличных данных в формате CSV;
- автоматическая атомарная классификация столбцов на категориальный и литеральный типы, а также идентификация сущностного столбца (средствами «TabbyLD2»);
- автоматическое аннотирование ячеек, столбцов и отношений между столбцами (средствами «TabbyLD2»);
- просмотр загруженной таблицы и результатов её предобработки и аннотирования;
- изменение (модификация) автоматического составления аннотаций (пользователь может выбрать из списка найденных кандидатов необходимую сущность, класс или свойство);
- генерация предметных графов знаний в формате RDF на основе аннотированных табличных данных (средствами «TabbyLD2»).

5. Примеры практического применения. Разработанное программное обеспечение было использовано при решении следующих прикладных задач.

5.1. Проект Talisman. В сотрудничестве с Институтом системного программирования имени В.П. Иванникова Российской академии наук (ИСП РАН) решалась задача формирования различных предметно-ориентированных графов знаний и их пополнения конкретными сущностями (фактами), извлеченными из таблиц. Данные графы знаний представляют собой семантические ориентированные графы, доступ к которым предоставляется через интерфейс

«GraphQL». Графы знаний разрабатывались в рамках платформы «Talisman» [23], которая объединяет различные программные компоненты «Big Data» и использует в качестве основных сервисов такие технологии ИСП РАН, как «Dedoc» (система извлечения структуры документов) и «Texterra» (система извлечения семантики из текстов). Таким образом, платформа «Talisman» представляет собой интеллектуальную систему для структурирования и формализации знаний предметной области, извлеченных из разных неструктурированных информационных источников (например, Веб или документы), на основе которых в дальнейшем могут решаться задачи аналитики.

Демонстрационный стенд с платформой «Talisman» был развернут на сервере в Институте динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН (https://isdct.talisman.ispras.ru/). В рамках данного стенда была разработана онтологическая схема (рис. 2), представляющая собой основу для предметного графа знаний и содержащая только основные понятия и отношения из области анализа рынка труда Иркутской области (например, вакансии, персоны, компании, учебные заведения, навыки). Созданная онтологическая схема наполнялась конкретными сущностями (фактами) извлеченными из веб-ресурсов, документов и, в частности, таблиц. Всего было извлечено больше 100 тысяч конкретных сущностей.

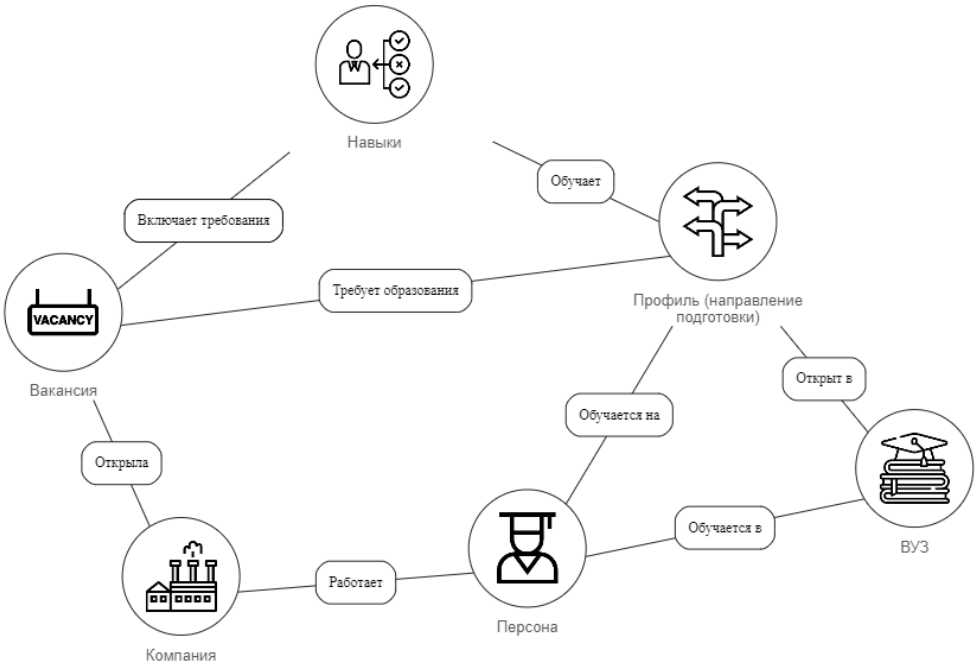


Рис. 2. Онтологическая схема, описывающая область анализа рынка труда Иркутской области на стенде платформы «Talisman»

Отдельно проводился эксперимент, целью которого было показать принципиальную возможность использования предлагаемого подхода и разработанного средства для СИТ, в частности, для решения задачи САС. Для этого в качестве тестового набора данных был сформирован документ, содержащий 8 таблиц. Каждая таблица описывает вакансии, открытые в Иркутской области по категории «информационные технологии». Табличные данные собирались вручную на различных веб-ресурсах: hh.ru, superjob.ru, rabota.ru, avito.ru, zarplata.ru, irk.rosrabota.ru, а также банков вакансий Иркутской области, ГАУ «Иркутский областной многофункциональный центр предоставления государственных и муниципальных услуг (МФЦ)». Для получения экспериментальной оценки использовалась хорошо известная мера точности (*accuracy*):

$$accuracy = \frac{CA}{C},$$

где CA – это количество корректно аннотированных столбцов, т.е. столбцы, которым верно были присвоены соответствующие классы (*типы концептов*) или типы данных (*типы значений характеристик*); C – общее количество столбцов в таблице.

Результаты оценки точности для двух базовых методов («*голосование методом простого большинства*» и «*сходство по заголовку*»), а также после уточнения аннотаций на основе метода связности классов представлены в таблице 2. Полученные результаты показывают перспективность использования разработанного подхода и средства для поддержки процесса инженерии предметно-ориентированных графов знаний.

Таблица 2. Экспериментальная оценка задачи САС для тестовых таблиц

Название таблицы	Accuracy (два базовых метода)	Accuracy (два базовых метода + метод связности классов)
Банк вакансий Иркутской Обл.	0,833	0,833
Работа на hh.ru	1,000	1,000
Работа на superjob.ru	0,750	0,750
Работа на rabota.ru	0,857	0,857
Работа на www.avito.ru	1,000	1,000
Работа на zarplata.ru	0,667	0.778
Работа на Росработа	1,000	1,000
Гос. авто. уч. Иркутский МФЦ	0,778	0,778
Итоговая оценка	0,860	0.874

5.2. Экспертиза промышленной безопасности. В рамках пилотного проекта создания системы поддержки принятия решений при Экспертизе Промышленной Безопасности (ЭПБ) в нефтехимии для Иркутского научно-исследовательского и проектного института химического и нефтехимического машиностроения (АО ИркутскНИИхиммаш) также решалась задача создания и пополнения графов знаний. ЭПБ – это процедура оценки технического состояния различного рода оборудования. База знаний разработанной системы формировалась в течение нескольких лет, при этом использовались знания экспертов, концептуальные модели, а также автоматический анализ отчетов по ЭПБ, которые содержат разнородную информацию в виде текстов, диаграмм, графиков и таблиц. В большинстве случаев именно таблицы являются наиболее перспективным источником для автоматического извлечения информации и наполнения баз знаний.

В предыдущих работах [4, 18] рассматривалась задача заполнения предметно-ориентированного графа знаний на основе табличных данных, извлеченных из отчетов по ЭПБ. Разработанный граф знаний содержит информацию о различном нефтехимическом оборудовании, исследуемом в процессе ЭПБ. В этой статье представлено расширение созданного графа знаний на основе данных различных измерений. Для решения текущей задачи из отчетов по ЭПБ были извлечены 70 таблиц, представляющих результаты измерений технического состояния нефтехимического оборудования. В таблице 3 представлен фрагмент, описывающий результаты измерений резервуара. Все исходные таблицы были семантически аннотированы на основе разработанной онтологической схемы (рис. 3).

Процесс семантического аннотирования для этих таблиц осуществлялся автоматически с использованием предлагаемых подхода и средства. В частности, для решения задачи САС использовались все методы аннотирования, кроме «*голосования методом простого большинства*» и метода предсказания класса на основе фреймворка «ColNet», поскольку в разработанной онтологической схеме изначально отсутствовали конкретные сущности, описывающие

рассматриваемую предметную область. Аннотации для отношений между столбцами таблицы (например, между сущностным столбцом и другими категориальными или литеральными столбцами) были выведены автоматически с использованием полученных точных аннотаций столбцов. Следует отметить, что не все аннотации для столбцов и отношений между ними были установлены таким образом. Поэтому данные аннотации были уточнены вручную экспертами предметной области.

Таблица 3. Фрагмент, описывающий результаты измерений резервуара

Наименование определяемой величины	Единицы измерения	Расчетная формула или обозначение	Числовое значение
Остаточный ресурс	лет	Тк	20
Фактическая толщина стенки обечайки с учетом минусового допуска	мм	Sф	7,3
Минимально допустимая толщина стенки элемента	мм	So	4
Исполнительная толщина стенки обечайки	мм	Sи	8
Время эксплуатации	лет	T1	27
Расчетный срок службы	лет	Тир	10
Коэффициент, учитывающий отличие средней ожидаемой скорости коррозии с доверительной вероятностью 0,75-0,9		K1	0,5
Коэффициент, учитывающий погрешность определения скорости коррозии по линейному закону, от скорости коррозии, рассчитанной по более точным (нелинейным) законам изменения контролируемого параметра		K2	0,75
Скорость коррозии	мм/год	a	0,1

Рис. 3. Фрагмент онтологической схемы, описывающий процесс измерения

Таким образом, 636 уникальных конкретных сущностей были извлечены из строк всего набора таблиц с использованием определенных аннотаций для столбцов и их взаимосвязей. Извлеченные сущности пополнили целевую онтологическую схему, в результате чего был получен предметно-ориентированный граф знаний для процедуры ЭПБ, описывающий результаты измерений технического состояния нефтехимического оборудования. Пример экранной

формы отображения таблицы с определенными атомарными типами и семантическими аннотациями для столбцов представлен на рисунке 4.

Заключение. Таблицы являются распространенным способом представления информации и повсеместно используются в различных предметных областях. Эффективное использование таблиц требует разработки специализированных средств для автоматической семантической интерпретации их содержимого. Это особенно актуально при решении реальных практических задач.

☐ Сущностный (тематический) столбец ☐ Категориальный столбец ☐ Литеральный столбец

Показаны записи **1-9** из **9**.

#	Наименование определяемой величины [Измерения]	Единицы измерения | [ЕдиницыИзмерения]	Расчетная формула или обозначение | [ФормулаРасчета]	Числовое значение | [xsd:positiveInteger]
1	Остаточный ресурс	лет	Тк	20
2	Фактическая толщина стенки обечайки с учетом минусового допуска	мм.	Sф	7,3
3	Минимально допустимая толщина стенки элмента	мм.	So	4
4	Исполнительная толщина стенки обечайки	мм.	Su	8
5	Время эксплуатации	лет	t1	27
6	Расчетный срок службы	лет	Тир	10
7	Коэффициент, учитывающий отличие средней ожидаемой скорости коррозии от гарантированной скорости коррозии с доверительной вероятностью 0.75-0.9	None	K1	0,5
8	Коэффициент, учтитывающий погрешность определения скорости коррозии по линейному закону, от скорости коррозии, расчитанной по более точным (нелинейным) законам изменения контролируемого параметра	None	K2	0,75
9	Скорость коррозии	мм./год	a	0,1

Рис. 4. Пример экранной формы отображения таблицы с определенными атомарными типами и семантическими аннотациями для столбцов

В статье был предложен подход для автоматизированного извлечения конкретных сущностей (фактов) из семантически аннотированных таблиц и пополнения ими целевого графа знаний. Данный подход был реализован в виде двух взаимодействующих между собой программных средств: «TabbyLD2» и «TabbyLD2-Client». Разработанные программные средства были успешно применены при решении практических задач пополнения предметно-ориентированных графов знаний. Полученная экспериментальная оценка показала перспективность использования предлагаемого подхода и программного обеспечения. В будущем планируется изучить возможность использования предварительно обученных языковых моделей для более улучшенной семантической аннотации таблиц.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента России (проект СП-978.2022.5) и госзадания Минобрнауки России по проекту «Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объёмов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения» (№ гос. регистрации: 121030500071-2).

Список источников

1. Hogan A., Blomqvist E., Cochez M. Knowledge Graphs, 2021.
2. Villazon-Terrazas B., Garcia-Santa N., Ren Y. Construction of enterprise knowledge graphs (i). exploiting linked data and knowledge graphs in large organisations, Springer, Cham, 2017.
3. Lehmberg O., Ritze D., Meusel R. A large public corpus of web tables containing time and context metadata. Proceedings of the 25th International conference companion on World Wide Web, 2016, pp. 75-76.

4. Дородных Н.О. Подход к автоматизированному наполнению графов знаний сущностями на основе анализа таблиц / Н.О. Дородных, А.Ю. Юрин // Онтология проектирования, 2022. – Т.12. – № 3. – С. 336-352.
5. TabbyLD2. Available at: https://github.com/tabbydoc/tabbyld2 (accessed: 04/11/2023).
6. Bonfitto S., Casiraghi E., Mesiti M. Table understanding approaches for extracting knowledge from heterogeneous tables. Wiley interdisciplinary reviews: Data mining and knowledge discovery, 2021, vol.11, no. 4, e1407.
7. Liu J., Chabot Y., Troncy R. From tabular data to knowledge graphs: A survey of semantic table interpretation tasks and methods. Journal of Web Semantics, 2023, vol. 76, 100761.
8. Efthymiou V., Hassanzadeh O., Rodriguez-Muro M. Matching web tables with knowledge base entities: From entity lookups to entity embeddings. Proceedings of 16th International semantic Web Conference (ISWC'2017), Lecture notes in computer science, 2017, vol. 3316, pp. 260-277.
9. Xie J., Lu Y., Cao C. Joint Entity Linking for Web tables with hybrid semantic matching. Proceedings of the International Conference on Computational Science, Lecture notes in computer science, 2020, vol. 12138, pp. 618-631.
10. Hulsebos M., Hu K., Bakker M. Sherlock: A Deep learning approach to semantic data type detection. KDD'19: Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, 2019, pp. 1500-1508.
11. Zhang D., Suhara Y., Li J. Sato: Contextual semantic type detection in tables. Proceedings of the VLDB Endowment, 2020, vol. 13, no.11, pp. 1835-1848.
12. Chen J., Jimenez-Ruiz E., Horrocks I. ColNet: Embedding the semantics of web tables for column type prediction. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019, vol. 33, no.1, pp. 29-36.
13. Suhara Y., Li J., Li Y. Annotating columns with pre-trained language models. SIGMOD'22: Proceedings of the 2022 International Conference on Management of Data, 2022, pp. 1493-1503.
14. Trabelsi M., Cao J., Heflin J. SeLaB: Semantic labeling with BERT. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2021, pp. 1-8.
15. Deng X., Sun H., Lees A. TURL: Table understanding through representation learning. Proceedings of the VLDB Endowment, 2020, vol. 14, no. 3, pp. 307-319.
16. Yin P., Neubig G., Yih W. TaBERT: Pretraining for joint understanding of textual and tabular Data. Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2020, pp. 8413-8426.
17. Bizer C., Lehmann J., Kobilarov G. DBpedia A Crystallization point for the Web of data. Journal of Web Semantics, 2009, vol. 7, no. 3, pp. 154-165.
18. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Knowledge graph augmentation based on tabular data: a case study for industrial safety inspection. Proceedings of the Sixth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'22), Lecture notes in networks and systems, 2022, vol. 566, pp. 314-324.
19. Stanford CoreNLP. Available at: https://stanfordnlp.github.io/CoreNLP/ (accessed: 04/11/2023).
20. Duckling. Available at: https://github.com/facebook/duckling (accessed: 04/11/2023).
21. Dateparser. Available at: https://dateparser.readthedocs.io/en/latest/ (accessed: 04/11/2023).
22. TabbyLD2-Client. Available at: https://github.com/tabbydoc/tabbyld2_client (accessed: 04/11/2023).
23. Talisman. Available at: https://talisman.ispras.ru/ (accessed: 04/11/2023).

Амирасланов Ильгар Вугарович. *Студент Института информационных технологий и анализа данных Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНИТУ). Основные направления исследований: семантическая интерпретация таблиц. ilgar-amiraslanov@mail.ru.*

Дородных Никита Олегович. *К.т.н., старший научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН). Основные направления исследований: автоматизация создания интеллектуальных систем и баз знаний, получение знаний из документов, таблиц, концептуальных моделей, семантическая интерпретация таблиц. ORCID: 0000-0001-7794-4462, Author ID (RSCI): 979843, Author ID (Scopus): 57202323578, Researcher ID (WoS): E-8870-2014, tualatin32@mail.ru.*

Юрин Александр Юрьевич. *Д.т.н., заведующий лабораторией Информационных технологий исследования природной и техногенной безопасности ИДСТУ СО РАН, доцент Института информационных технологий и анализа данных ИрНИТУ. Основные направления исследований: разработка систем интеллектуальных систем и баз знаний, использование прецедентного подхода и семантических технологий при проектировании интеллектуальных диагностических систем. ORCID: 0000-0001-9089-5730, Author ID (RSCI): 174845, Author ID (Scopus): 16311168300, Researcher ID (WoS): A-4355-2014, iskander@icc.ru.*

UDC 004.89
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.014

A tool for extraction of entities from semantically annotated tabular data

Ilgar V. Amiraslanov[1], Nikita O. Dorodnykh[2], Alexander Yu. Yurin[1,2]

[1]Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk, *iskander@icc.ru*
[2]Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Russia, Irkutsk

Abstract. Today, knowledge graphs are widely used in various domains, for example, in industry, commerce, finance, and social networks. A knowledge graph is a powerful means of information combination and representation using standardized knowledge modelling methods. However, the development of knowledge graphs and, in particular, their population with new specific entities (facts) remains a difficult task. The use of various information sources can facilitate this process. Such a source can be tables that potentially contain rich semantic information. In this paper proposes an approach and its software implementation for automated extraction of significant information from tabular data in the form of facts and population of a target knowledge graph with them. The main feature of the proposed approach is the combination of heuristic methods with deep machine learning models for semantic table annotation. The applicability of the proposed approach is demonstrated by two examples: labor market analyzing for the Irkutsk region and assessing the technical state of petrochemical equipment.

Keywords: semantic web, knowledge acquisition, knowledge graph, semantic table interpretation, fact extraction, knowledge graph population, table

Acknowledgements: The reported study was supported by the Council for Grants of the President of Russia (grant No. SP-978.2022.5) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project no. 121030500071-2 "Methods and technologies of a cloud-based service-oriented platform for collecting, storing and processing large volumes of multi-format interdisciplinary data and knowledge based upon the use of artificial intelligence, model-driven approach and machine learning").

References

1. Hogan A., Blomqvist E., Cochez M. Knowledge Graphs, 2021.
2. Villazon-Terrazas B., Garcia-Santa N., Ren Y. Construction of Enterprise Knowledge Graphs (I). Exploiting Linked Data and Knowledge Graphs in Large Organisations. Springer, Cham, 2017.
3. Lehmberg O., Ritze D., Meusel R. A large public corpus of web tables containing time and context metadata. Proceedings of the 25th International Conference Companion on World Wide Web, 2016, pp. 75-76.
4. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Podhod k avtomatizirovannomu napolneniyu grafov znanij sushchnostyami na osnove analiza tablic [An approach for automated knowledge graph population with entities based on table analysis]. Онтология проектирования [Ontology of designing], 2022, vol.12, no.3, pp. 336-352.
5. TabbyLD2. Available at: https://github.com/tabbydoc/tabbyld2 (accessed: 04/11/2023).
6. Bonfitto S., Casiraghi E., Mesiti M. Table understanding approaches for extracting knowledge from heterogeneous tables. Wiley interdisciplinary reviews: Data mining and knowledge discovery, 2021, vol.11, no.4, e1407.
7. Liu J., Chabot Y., Troncy R. From tabular data to knowledge graphs: A survey of semantic table interpretation tasks and methods. Journal of Web Semantics, 2023, vol.76, 100761.
8. Efthymiou V., Hassanzadeh O., Rodriguez-Muro M. Matching web tables with knowledge base entities: From entity lookups to entity embeddings. Proceedings of 16th International semantic Web Conference (ISWC'2017), Lecture notes in computer science, 2017, vol.3316, pp. 260-277.
9. Xie J., Lu Y., Cao C. Joint Entity Linking for Web tables with hybrid semantic matching. Proceedings of the International Conference on Computational Science, Lecture notes in computer science, 2020, vol.12138, pp. 618-631.
10. Hulsebos M., Hu K., Bakker M. Sherlock: A Deep learning approach to semantic data type detection. KDD'19: Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, 2019, pp. 1500-1508.
11. Zhang D., Suhara Y., Li J. Sato: Contextual semantic type detection in tables. Proceedings of the VLDB Endowment, 2020, vol.13, no.11, pp. 1835-1848.
12. Chen J., Jimenez-Ruiz E., Horrocks I. ColNet: Embedding the semantics of web tables for column type prediction. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019, vol.33, no.1, pp. 29-36.
13. Suhara Y., Li J., Li Y. Annotating columns with pre-trained language models. SIGMOD'22: Proceedings of the 2022 Inter-national Conference on Management of Data, 2022, pp. 1493-1503.

14. Trabelsi M., Cao J., Heflin J. SeLaB: Semantic labeling with BERT. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2021, pp. 1-8.
15. Deng X., Sun H., Lees A. TURL: Table understanding through representation learning. Proceedings of the VLDB Endowment, 2020, vol.14, no.3, pp. 307-319.
16. Yin P., Neubig G., Yih W. TaBERT: Pretraining for joint understanding of textual and tabular Data. Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2020, pp. 8413–8426.
17. Bizer C., Lehmann J., Kobilarov G. DBpedia A Crystallization point for the Web of data. Journal of Web Semantics, 2009, vol.7, no.3, pp. 154-165.
18. Dorodnykh N.O., Yurin A.Yu. Knowledge graph augmentation based on tabular data: a case study for industrial safety inspection. Proceedings of the Sixth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’22), Lecture notes in networks and systems, 2022, vol.566, pp. 314-324.
19. Stanford CoreNLP. Available at: https://stanfordnlp.github.io/CoreNLP/ (accessed: 04/11/2023).
20. Duckling. Available at: https://github.com/facebook/duckling (accessed: 04/11/2023).
21. Dateparser. Available at: https://dateparser.readthedocs.io/en/latest/ (accessed: 04/11/2023).
22. TabbyLD2-Client. Available at: https://github.com/tabbydoc/tabbyld2_client (accessed: 04/11/2023).
23. Talisman. Available at: https://talisman.ispras.ru/ (accessed: 04/11/2023).

Amiraslanov Ilgar Vugarovich. *Student of the Institute of Information Technologies and Data Analysis, Irkutsk National Research Technical University (INRTU). Main research domains: semantic table interpretation. ilgar-amiraslanov@mail.ru.*

Dorodnykh Nikita Olegovych. *Ph.D., senior associate researcher at Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS (ISDCT SB RAS). Main research domains: computer-aided development of intelligent systems and knowledge bases, knowledge acquisition based on documents, tables and conceptual models, semantic table interpretation. ORCID: 0000-0001-7794-4462; Author ID (RSCI): 979843; Author ID (Scopus): 57202323578; Researcher ID (WoS): E-8870-2014, tualatin32@mail.ru.*

Yurin Alexander Yurievich. *Ph.D., head of a laboratory "Information and telecommunication technologies for investigation of natural and technogenic safety" at ISDCT SB RAS and associate professor of INRTU. Main research domains: development of intelligent systems and knowledge bases, application of the case-based reasoning and semantic technologies in the design of diagnostic intelligent systems, maintenance of reliability and safety of complex technical systems. ORCID: 0000-0001-9089-5730; Author ID (RSCI): 174845; Author ID (Scopus): 16311168300; Researcher ID (WoS): A-4355-2014, iskander@icc.ru.*

Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 28.04.2023; принята к публикации 10.05.2023.
The article was submitted 04/12/2023; approved after reviewing 04/28/2023; accepted for publication 05/10/2023.

УДК 004.056.5
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.015

Повышение эффективности систем защиты информации с помощью категоризации событий безопасности

Исхаков Андрей Юнусович[1], Исхаков Сергей Юнусович[2]
[1]Институт проблем управления РАН, Россия, Москва, *iay@ipu.ru*
[2]ПАО Промсвязьбанк, Россия, Москва

Аннотация. В статье рассмотрены основные принципы построения системы категоризации событий безопасности, сформулированы требования к ней и предложена методика ее применения, обеспечивающая возможность избегать необходимость корректировки наборов правил детектирования при добавлении новых источников событий или обновления подсистемы регистрации событий. При этом рассмотренные варианты категоризации применяются только для событий безопасности и не затрагивают события общесистемного программного обеспечения. Приведены примеры вариантов категоризации событий для различных средств защиты информации. Определены возможности масштабирования системы категоризации и методы ее адаптации для применения в промышленных системах автоматизации и управления. Также представлены результаты эксперимента по применению методики для повышения эффективности защиты автоматизированных систем на примере виртуального киберполигона, подтверждающие эффективность подобной методики и возможность ее применения для защиты промышленных систем.

Ключевые слова: корреляция, категоризация данных, нормализация, таксономия, система управления событиями безопасности, сценарии атак, инцидент

Цитирование: Исхаков А.Ю. Повышение эффективности систем защиты информации с помощью категоризации событий безопасности / А.Ю. Исхаков, С.Ю. Исхаков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 152-164. – DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.015.

Введение. Выстраивание процессов защиты в современных автоматизированных системах сопряжено с необходимостью сложной многоаспектной корреляции данных, генерируемых как в самой системе, так и ее инфраструктуре. При этом одним из источников являются журналы событий безопасности различных объектов, анализ которых позволяет формировать в системах защиты правила корреляции [1], чтобы сосредотачиваться на наиболее важных цепочках событий, свидетельствующих о возможных инцидентах.

Правила корреляции ориентированы на обработку уже нормализованных событий, каждое из которых представляет собой совокупность полей, заполненных данными из необработанного события. Набор полей определяется в рамках принятой в системе защиты таксономии [2], а отнесение данных исходного события к конкретным полям осуществляется в соответствии с заранее определенной формулой нормализации для данного источника.

В [3] подробно рассмотрены проблемы потери данных при обработке событий безопасности от различных источников и предложено методическое обеспечение процесса нормализации. Тем не менее для защиты реальных объектов при написании правил корреляции необходимо иметь возможность оперировать семантикой регистрируемых событий – учитывать контекст события для корректного определения его смысла.

Одним из способов решения этой задачи является применение категоризации – назначения обработанному событию некоторых меток, позволяющих однозначно трактовать регистрируемое событие. Инструментарий категорирования событий безопасности [4] представлен в ряде решений класса систем управления событиями безопасности (Security information and event management, SIEM) [5]. Однако, данная функциональность в основном ориентирована на выполнение поиска событий без привязки к исходному формату, источнику или ключевым словам. В то же время анализ научной литературы [6-13] свидетельствует о слабой проработке методических указаний по применению категоризации на этапе построения

комплексной эшелонированной защиты, реализующей взаимосвязь контента не только с целью структурирования информации и гибкого поиска при расследовании инцидентов, но и при интеграции средств защиты информации (СЗИ) и обновлении источников событий.

В статье рассматривается подход к разработке систем категоризации событий с точки зрения формирования методических основ разработки контента для выявления инцидентов. Под контентом здесь понимается совокупность формул нормализации, правил корреляции, политик и других инструментов, применяемых в СЗИ для выявления инцидентов. При этом подход не ориентирован на определенный тип средств защиты, будь то SIEM, межсетевые экраны для веб-приложений (Web Application Firewall, WAF) [14], системы контроля доступа к неструктурированным данным и т.д.

Предлагаемая методика применения категоризации ориентирована на формирование методических основ разработки и управления контентом различных систем защиты, как однокомпонентных, так и состоящих из нескольких эшелонов.

1. Категоризация как средство повышения эффективности системы защиты. Под эффективностью СЗИ понимается степень решения поставленной совокупности задач защиты информации. В данном исследовании в качестве СЗИ рассматриваются системы, включающие обработку событий безопасности, а в качестве критерия повышения эффективности СЗИ предлагается оценивать снижение значений показателя «Доля пропущенных цепочек атак (инцидентов)».

Одной из основных проблем построения комплексных систем защиты, состоящих из нескольких СЗИ, является необходимость верификации всего контента, который обеспечивает логику выявления инцидентов, при добавлении новых источников или объектов защиты. Ее решение может быть достигнуто за счет использования высокоуровневых критериев, опирающихся не на конкретные значения в определенных полях, а на некоторые метки, определяющие категории и отражающие физический смысл регистрируемых событий. Для этого необходима система категоризации данных, которая позволяла бы применять одинаковые критерии к событиям с одинаковым семантическим значением [3]. Такой подход не только позволяет конструировать более гибкие правила корреляции, но и обеспечивает возможность бесшовного (с точки зрения интеграции со средствами защиты информации) масштабирования инфраструктуры без необходимости переработки политик безопасности и правил корреляции на комплексах защиты. Приведем примеры:

1) в некоторой SIEM системе установлен пакет правил корреляции, обеспечивающий выявление конкретных типов атаки; правила при этом базируются на определенных значениях в полях нормализованных событий (идентификатор типа сообщения, значения поля «статус» и т.д.); при добавлении нового источника или обновлении текущих необходимо проверить наличие и корректность формул нормализации для него, а также удостовериться, что события от него попадут под критерии в вышеупомянутых правилах корреляции; на практике зачастую необходимо корректировать часть правил или даже весь набор, поскольку в противном случае они не сработают и инцидент не будет выявлен;
2) в некотором WAF используется набор правил, генерирующих события безопасности при обнаружении в журналах веб-сервера определенной последовательности значений; срабатывание таких правил формирует набор атомарных событий, на основе которых могут формироваться правила корреляции, генерирующие события о предполагаемом инциденте, при этом такая корреляция может выполняться как средствами самого межсетевого экрана для веб-приложений, так и внешними системами (например, на стороне SIEM через передачу туда атомарных событий); при добавлении нового

защищаемого веб-приложения необходимо проверить, подходят ли текущие правила для выявления аналогичных событий в его работе; на практике необходимость этого действия обусловлена широким спектром имеющихся на рынке фреймворков и технологий веб-разработки, поэтому зачастую необходимо добавлять новые правила под конкретное защищаемое приложение; в случае добавления или корректировки таких правил необходимо проверить, что они учтены во всех вышестоящих корреляциях, в противном случае корреляция не сработает и инцидент не будет выявлен.

Аналогичные проблемы характерны и для других типов СЗИ, принцип функционирования которых основан на использовании в явном виде журналов событий или «разборе» конкретных протоколов и формализации наблюдаемых взаимодействий. Применение категоризации позволяет избежать необходимость корректировки наборов правил детектирования при добавлении новых источников событий или обновления подсистемы регистрации событий существующих. Также нивелируются ситуации, когда правила корреляции не срабатывают из-за привязки к конкретным значениям в полях нормализованных событий.

2. Методика и принципы категорирования событий. Предлагаемый подход подразумевает, что все объекты защищаемой системы и ее инфраструктуры могут быть разделены на источники ИТ-событий и ИБ-событий (ИБ – информационная безопасность). При этом ИТ-источники создают записи в журналах о событиях на объекте без оценки происходящего с точки зрения ИБ, например, факт успешного скачивания файла. В свою очередь, ИБ-источники генерируют записи в журналах, содержащие дополнительные данные о фиксируемом событии с точки зрения ИБ, например, событие потокового антивируса об успешно заблокированной попытке скачать вредоносный файл.

В то же время источники событий безопасности могут генерировать ИТ-события, например, фиксировать факты обновления антивирусных баз, перезагрузки системы и т.д. Также общесистемное и прикладное программное обеспечение (ПО) часто содержит в себе модули защиты и может генерировать как ИТ-события, так и ИБ-события, поэтому категоризацию необходимо применять, основываясь на типе самого события, а не на типе источника. Данное исследование сфокусировано на событиях безопасности.

Категоризация должна применяться к нормализованным событиям и является существенным дополнением к этому процессу, обеспечивая возможность повысить эффективность правил корреляции при выявлении атак. В большинстве случаев это достигается за счет указания категории событий на последнем этапе создания формул нормализации или разработке вспомогательных правил. При разработке системы категоризации предлагается использовать следующие принципы.

Во-первых, каждое нормализованное событие должно иметь не более одной метки в рамках отдельной категории. Это позволяет определить правила наполнения таксономических полей на предшествующем этапе – нормализации событий. Кроме того, такой подход позволяет снизить количество условий в правилах корреляции и не делать дополнительных проверок для определения контекста события.

Во-вторых, масштаб системы категорирования должен обеспечивать необходимый и достаточный уровень для формирования правил корреляции. Другими словами, количество и структура категорий неразрывно связаны с механизмом корреляции событий и должны формировать единую методическую базу при выявлении и расследовании инцидентов.

В общем случае, методика применения категоризации выглядит следующим образом.

Шаг 1. Экспертная оценка события. На данном этапе эксперт определяет, относится ли это событие к типу событий ИБ и попадает ли оно к данной системе категоризации.

Шаг 2. Проведение нормализации события.

Шаг 2.1. Выявление основных сущностей в событии.

Шаг 2.2. Определение схемы взаимодействия основных сущностей.

Шаг 2.3. Извлечение значимых данных и назначение их в таксономические поля, определенные схемой нормализации.

Шаг 3. Проведение категоризации события.

Шаг 3.1. Определение среды, откуда получено событие.

Шаг 3.2. Определение основного типа инцидента.

Шаг 3.3. Определение подтипа инцидента, к которому относится событие. Данный шаг может повторяться несколько раз в зависимости от детализации и количества уровней выделенных подтипов.

При этом для успешного применения методики должны выполняться следующие требования:

- должны быть определены справочники полей нормализации и уровней категоризации;
- для каждой категории событий должен быть определен набор полей нормализации, которые подлежат заполнению.

Таким образом, схемы категоризации и нормализации событий должны быть напрямую связаны между собой. Это позволяет обеспечить соответствие семантики события всей важной информации в нем и набору полей, куда эта информация должна быть помещена. При появлении новых источников, события от которых не укладываются в данную схему, следует:

- скорректировать справочники категорий и соответствующие им наборы полей нормализации;
- провести проверку всех формул нормализации для событий изменившихся категорий;
- провести проверку правил корреляции, использующих в своих условиях затронутые категории событий.

3. Варианты применения категоризации. Рассмотрим вариант применения категоризации в SIEM-системе. Определенные в [3] сущности, используемые для нормализации событий, взаимодействуют между собой. Для описания среды взаимодействия в предлагаемой системе категоризации выделим основные уровни – сетевое взаимодействие, уровень хоста и уровень прикладного ПО. В ряде случаев допустимо выделить в отдельный уровень события, фиксируемые средствами физической охраны, поскольку многие из них снабжены развитыми механизмами регистрации событий, которые используются при выявлении инцидентов.

С учетом текущего уровня развития ИТ-инфраструктуры для предлагаемой системы категоризации введем предположение, что любой инцидент в автоматизированной системе будет отражен на одном или нескольких уровнях среды взаимодействия, определенных выше. На каждом из этих уровней могут иметься СЗИ, которые выявляют следы инцидента или отдельные атомарные события из общей цепочки действий атакующих. При этом на уровне сети речь идет о характерных следах в сетевом трафике, на уровне хоста могут быть использованы журналы аудита операционной системы и встроенных средств удаленного управления сервером, а в случае с прикладным ПО нередко присутствуют модули защиты, которые фиксируют аномалии на уровне системы и генерируют события безопасности.

Наличие событий от средств физической охраны весьма опционально. К тому же, далеко не всегда можно построить цепочки атаки, связав эти события. В связи с этим для подобных событий предлагается вводить отдельные категории. Поскольку к подобным источникам обычно относятся охранно-пожарные системы или системы контроля и управления доступом, то детектируемые ими события предлагается разделить на три типа – обнаружение

физического проникновения (проход через турникет, движение в охраняемой зоне и т.д.), повреждение объекта (например, срабатывание датчика разбития стекла), а также сигнал тревоги (обнаружение пожара, включение оповещения и т.д.).

Определив среду, в которой зафиксировано событие, необходимо определить основной тип, отражающий его физический смысл. Поскольку ранее было определено, что работа с одинаковыми по своей семантике событиями должна строиться по одинаковым критериям, то категорировать их надо одинаково, независимо от среды взаимодействия, поэтому в случае с уровнями сетевого взаимодействия, хоста и прикладного ПО набор таких типов подлежит объединению. Именно этот перечень типов формирует еще один уровень категоризации и, в целом, определяет некоторый рубрикатор инцидентов, который, в свою очередь, должен быть необходим и достаточен в рамках защищаемого объекта.

Для обеспечения масштабируемости системы категорий допускается введение дополнительных уровней, уточняющих различные подтипы инцидентов.

На рис. 1 приведена схема варианта применения категоризации для SIEM.

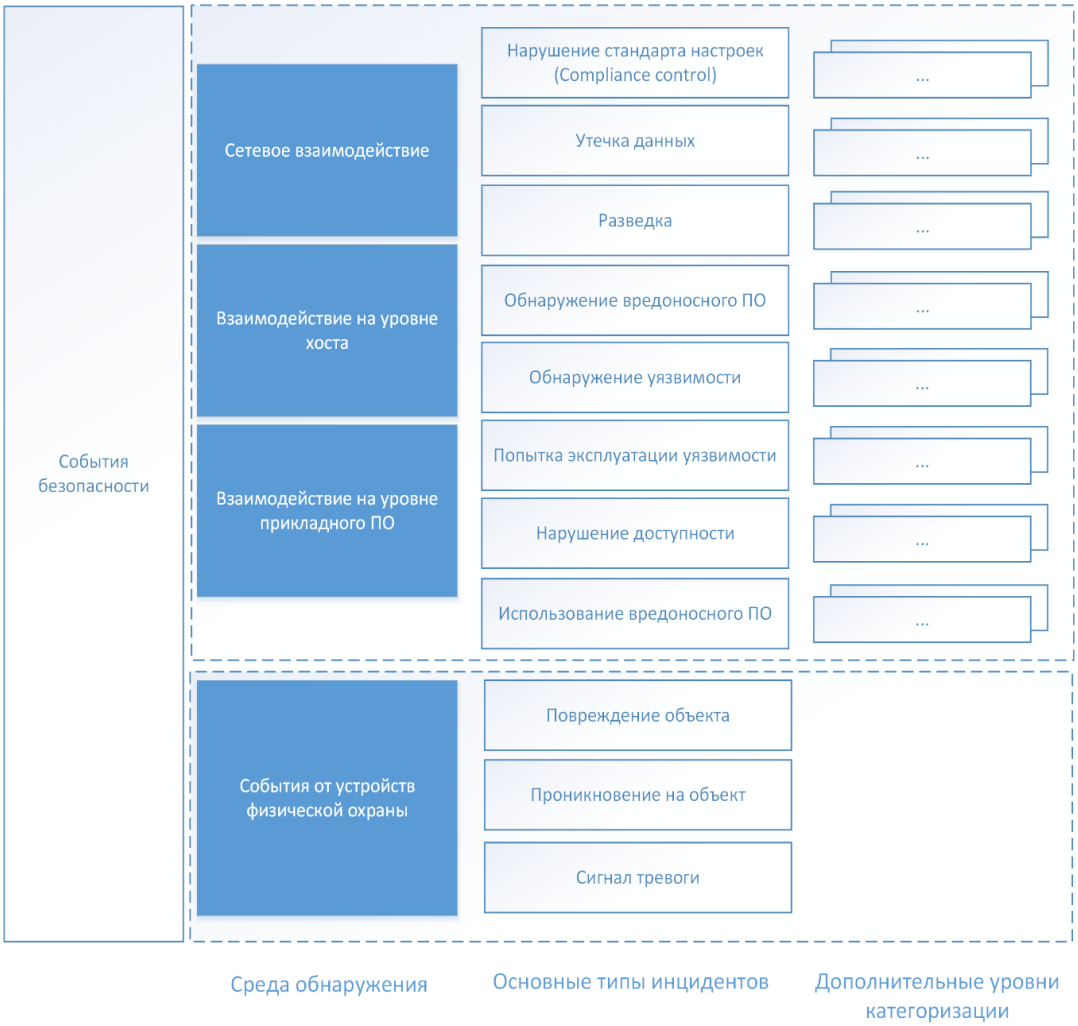


Рис. 1. Пример категоризации событий для SIEM

Рассмотрим преимущества категоризации на другом частном примере – эксплуатации WAF (рисунок 2), установленного в одном из наиболее популярных режимов интеграции Reverse-proxy [14]. В таком режиме WAF терминирует на себе SSL-трафик и выполняет инспекцию трафика для выявления и блокировки атак на веб-приложение. Поскольку функциональность разбора HTTP-запросов [14] является базовым компонентом WAF, будем считать, что этап нормализации (фактически, парсинг заголовков и содержимого HTTP-

запросов и ответов) выполняется без вмешательства оператора. Запросы, содержащие признаки атак (исходя из правил безопасности) будем называть событиями. При этом существует необходимость построения сложных правил, включающих объединение нескольких событий в цепочки (как часто повторяющихся в течение некоторого промежутка времени, так и последовательности нескольких событий разного типа).

Поскольку в данном примере функционирование СЗИ строится на основе событий о сетевом взаимодействии, применять уровни среды, аналогичные примеру на рисунке 1, некорректно. Если же WAF обеспечивает защиту нескольких приложений, можно определить в качестве среды обнаружения классы критичности защищаемых систем. Типы инцидентов также, как и в случае с предыдущим примером, будут общими, поскольку работа с одинаковыми по своей семантике событиями должна строиться по одинаковым критериям. При этом понимание среды обнаружения может быть использовано в дальнейшем для выработки сценариев реагирования.

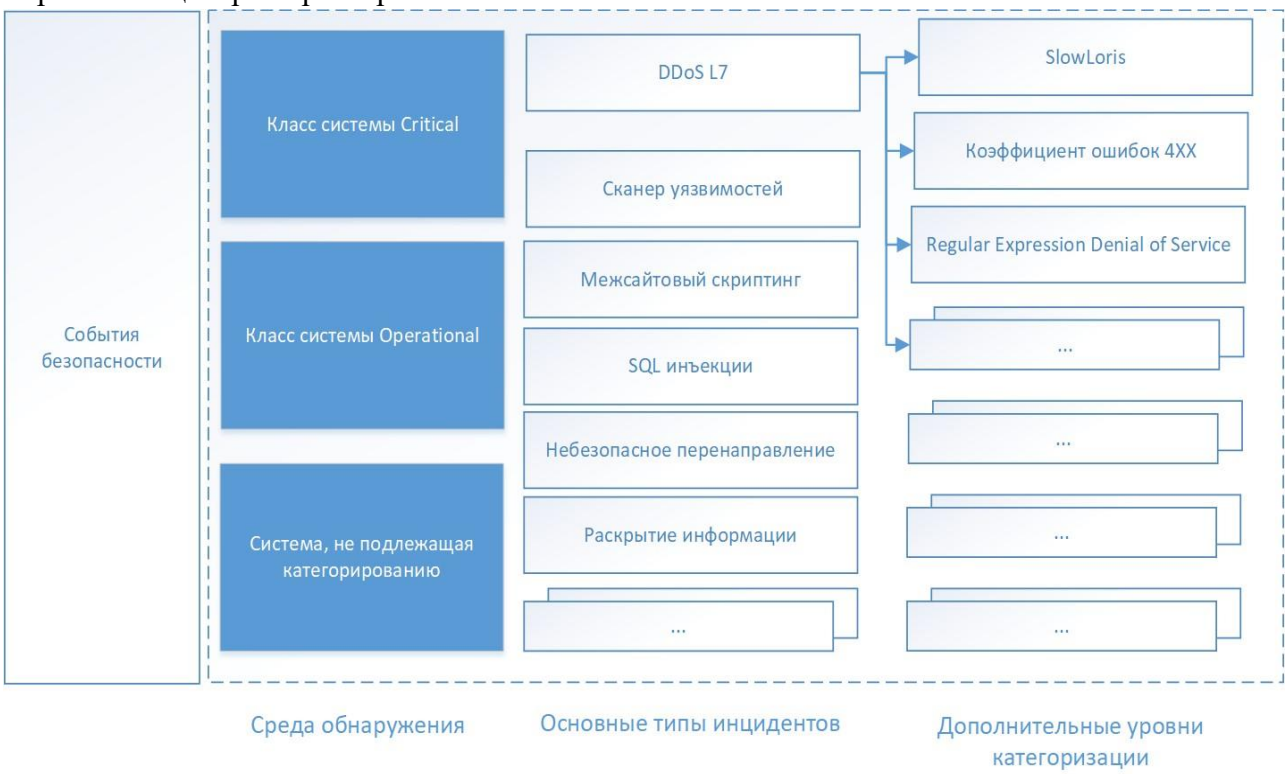


Рис. 2. Пример категоризации событий для WAF

Рассмотрим задачу защиты от DDoS-атаки [15] на уровне L7 модели OSI [14, 15] для систем класса Critical и систем, не подлежащих классификации. Наличие эшелонированной защиты на других СЗИ, кратная избыточность в части предоставляемых ресурсов системы и бизнес-логика обусловливают необходимость для оператора СЗИ устанавливать высокие пороги для блокировки источников запросов по признаку DDoS на основе счетчика ошибок. Для систем, не подлежащих категорированию, исходя из отсутствия других эшелонов защиты и запаса в части вычислительных ресурсов, требуется обеспечить незамедлительную отправку источников запросов в списки блокировок. Таким образом, при добавлении новой системы, исходя из присвоения соответствующей метки, обновление правил корреляции не требуется.

Приведенные на рисунках 1 и 2 схемы не претендуют на полноту обзора возможных типов инцидентов, а предназначены для демонстрации разработки категоризации для разных СЗИ, исходя из приоритизации защищаемых компонент и особенностей эксплуатации объекта. Важно отметить, что у разных вендоров и даже разных классов СЗИ одного вендора имеются существенные отличия в терминологии функциональности разработки контента.

4. Особенности применения методики для промышленных систем автоматизации и управления. Внедрение любой системы защиты требует адаптации к защищаемому объекту, что особенно характерно для промышленных систем автоматизации и управления (ПСАиУ). Это связано с большим количеством разнородных источников событий и широкой вариативностью их версий [16]. Даже на двух схожих ПСАиУ могут оказаться объекты одного класса, но с разными версиями системного ПО, что может привести к различиям в регистрируемых событиях безопасности, поэтому необходимо адаптировать контент для выявления атак, учитывая приведенные выше принципы категоризации событий.

В первую очередь, необходимо оценить и актуализировать перечень имеющихся источников событий, в том числе:

- проверить, что все необходимые для срабатывания правил корреляции источники присутствуют в ПСАиУ и с них возможен сбор событий безопасности;
- убедиться, что на требуемых источниках событий применены требуемые настройки аудита (поскольку несоответствие этих настроек может привести к отсутствию необходимых для детектирования событий);
- организовать подключение всех необходимых источников и проверку корректности доставки событий от них (в зависимости от процессов в ПСАиУ могут значительно отличаться интервалы сбора событий с пассивных источников либо иметь место задержки и потери событий от активных источников);
- провести верификацию системы категоризации и нормализации событий на предмет соответствия данным, получаемым с источников (при необходимости провести корректировку справочников полей в соответствии с указаниями к предлагаемой методике).

После этого следует провести анализ самого набора правил корреляции и, при необходимости, его корректировку. При корректировке имеющихся или создании новых правил корреляции необходимо:

- учитывать временные интервалы и особенности доставки событий и, при необходимости, подобрать необходимые периоды корреляции данных; поскольку в ПСАиУ могут иметь место длительные задержки в поступлении событий от ряда источников [17], то может быть нарушена логика детектирования; в данных случаях следует рассмотреть возможность проведения «отложенной корреляции», осуществляя периодическую выборку событий, уже поступивших в базу; это позволит корректно восстановить последовательность действий и выявить случившийся инцидент, хоть и постфактум, вместо того, что он будет пропущен;
- определить сегменты ПСАиУ, для которых будут действовать тот или иной контент, поскольку большинство правил объективно лишь для определенных участков системы; например, зачастую не стоит реагировать на попытки сканирования ресурсов во внешнем dmz-контуре, тогда как подобные явления внутри закрытых сегментов сети требуют незамедлительного реагирования;
- определить и внести список исключений, заполнив необходимые справочники; в любой реальной системе существуют объекты, активность которых должна быть исключена из логики детектирования, поскольку данные процессы являются легитимной активностью.

Помимо вышеуказанных действий, также необходимо провести анализ системы критичности инцидентов, основываясь на важности активов либо на типе инцидентов, определяемом на втором уровне системы категоризации.

5. Стенд киберполигона и апробация методики. Для апробации разработанной методики был разработан стенд (рисунок 3), входящий в состав киберполигона ИПУ РАН.

Пользователями методики выступали операторы СЗИ – эксперты по направлениям сетевой безопасности и безопасности веб-приложений. В основе стенда лежит система усиленной проверки подлинности субъектов [18], анализирующая, в том числе, данные из системы управления событиями информационной безопасности. Усиленная проверка подлинности заключается в применении дополнительных механизмов адаптивного подбора факторов и способов аутентификации, исходя из категории выявленной аномалии, детектируемой посредством применения моделей машинного обучения [14].

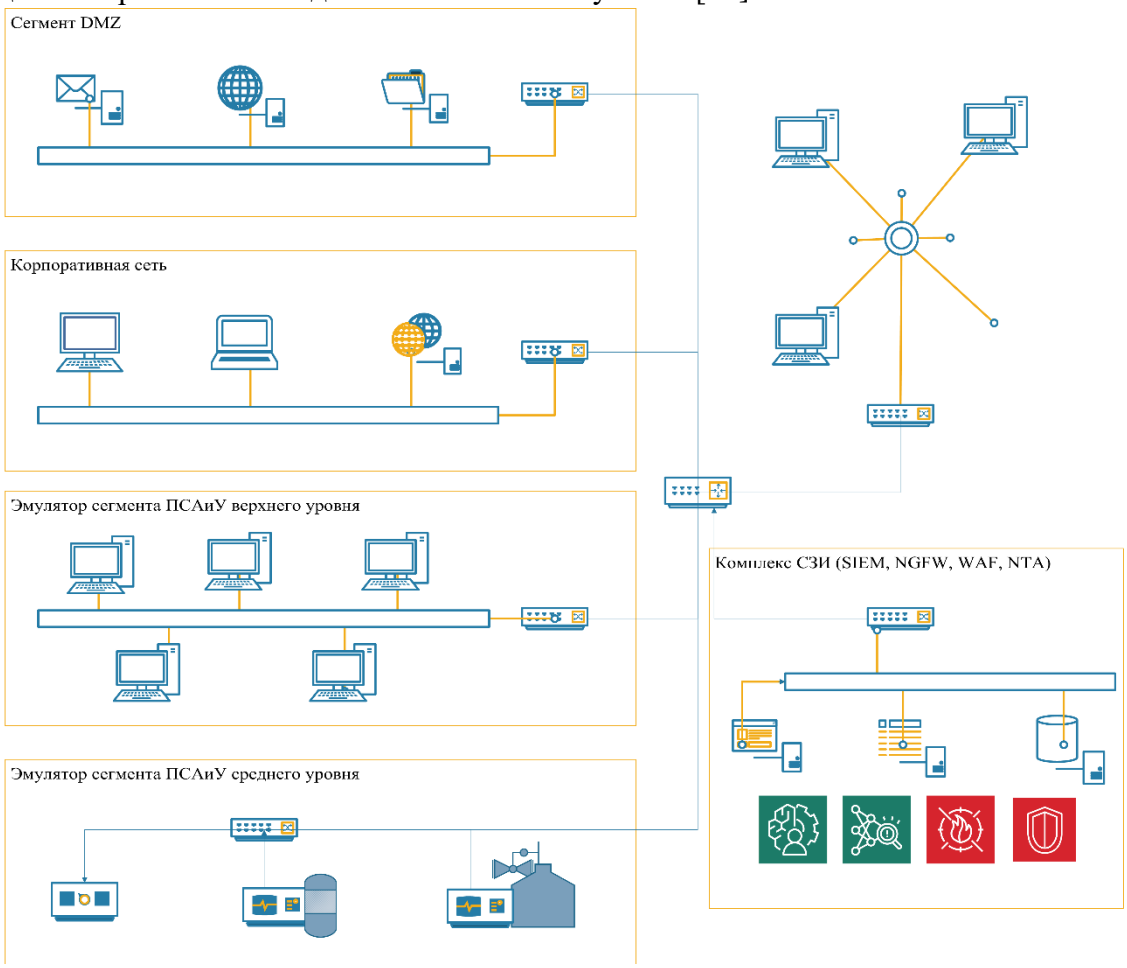


Рис. 3. Структурная схема задействованного стенда

Сегментация различных участков сети киберполигона выполняется на логическом уровне, что в рамках поставленных исследовательских задач является допустимым. В составе полигона реализован сегмент средств обеспечения безопасности, который включает в себя систему управления событиями безопасности, межсетевые экраны различных классов (Next Generation Firewall, Web Application Firewall), потоковую песочницу. Гибкость управления и возможность масштабирования основных эмулируемых хостов реализована за счет технологии контейнеризации. Была поставлена задача оценить эффективность применения предложенной методики категоризации посредством оценки пропущенных инцидентов безопасности в ходе эмуляции жизненного цикла различных сегментов киберполигона.

Реализация предложенной методики непосредственно на СЗИ выполнялась с помощью механизма тэгирования атомарных правил безопасности (листинги 1 и 2).

Листинг 1. Пример псевдокода правила корреляции до применения категоризации

```
alert_to_BL
{
   correlation_brute_acs_vuln12(times=100, time_frame=5, period=3)
   {
```

```
        Policy_rule equals a323dcf19403 // Vendor1
        or
        Policy_rule equals a109f34c3987 // Vendor1_new_firmware
        or
        Policy_rule equals 384124hfb324 // Vendor2
        or
        Policy_rule equals 324145453cc2 // Vendor3
    }
}
```

Листинг 2. Пример псевдокода правила корреляции после применения категоризации

```
alert_to_BL_upgrade
{
   correlation_brute_acs_upgrade(times=100, time_frame=5, period=3)
   {
      Event_tag.name contains “Brute_vuln_acs”
   }
}
```

На период проведения эксперимента были зафиксированы 72 сценария атак, ранее верифицированных вышеуказанными экспертами, применявшими данную методику. Все сценарии запускались автоматически с помощью скриптов, каждый из которых рассчитан на конечное количество выполнений атак для фиксации эталонного количества инцидентов. В течение 14 дней случайным образом в каждый из сегментов вносились корректировки по составу хостов, запущенных служб, сервисов и ПО. За указанный период апробации методики получены результаты, представленные на рис. 4 и в таблице 1.

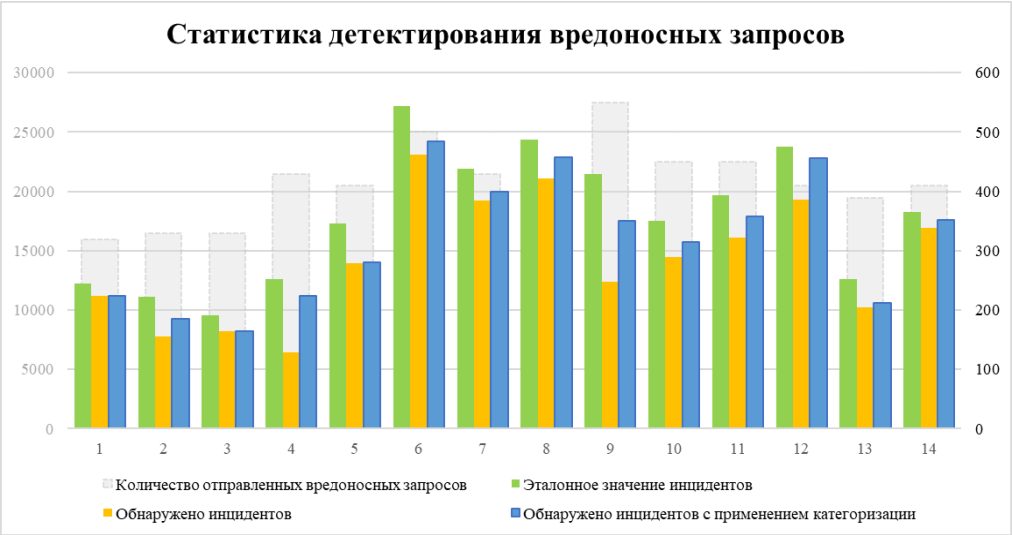


Рис. 4. Статистика обнаруженных инцидентов безопасности

Таблица 1. Результаты апробации методики

Критерий	Число изменений в защищаемую инфраструктуру (исходя из статичной базы сигнатур)	Корреляции без категоризации	Применение категоризации событий безопасности
Доля пропущенных цепочек атак (инцидентов) *	Среднее значение	19%	11%
	<10	12%	8%
	⩾10	23%	15%

* *Комментарий.* Важно отметить, что полученные характеристики не следует сравнивать с общепринятыми оценками False Acceptance Rate и False Rejection Rate, используемыми при оценке эффективности систем обнаружения вторжений, систем

биометрической идентификации и т.д. В качестве эталона рассматривались предопределенные сценарии, которые были заложены в скрипты генерации цепочек атак. При этом большое количество пропусков обусловлено особенностями эмулирования жизненного цикла, а именно хаотичного ввода и вывода из эксплуатации защищаемых узлов, изменения сервисов и служб. В случае подхода, основанного на корреляции без применения категоризации, пропуск обусловлен длительной задержкой по автоматизированному сканированию активов и необходимостью ручного конфигурирования правил корреляции. Пропуски детектирования событий безопасности при условии проведенной категоризации согласно вышеперечисленной методике обусловлены объективной невозможностью формирования всеобъемлющего перечня категорий, учитывающих будущие изменения в составе защищаемых активов. На практике при использовании предложенного подхода минимизация доли пропущенных инцидентов достигается за счет регламентации и контроля изменений по защищаемым объектам при условии валидации со стороны администраторов безопасности.

Заключение. Текущий уровень развития инфраструктуры промышленных систем автоматизации и управления обусловливает необходимость учитывать контекст событий для обеспечения эффективности выявления атак в реальных условиях. Основываясь на созданном на предыдущих этапах исследования методическом обеспечении процесса нормализации, предложен подход к построению систем категоризации событий безопасности, научная новизна которого состоит в применении категорий не только для поиска и обработки событий, но и для формирования методических основ разработки контента для выявления инцидентов.

В статье рассмотрены основные принципы построения системы категоризации событий безопасности, сформулированы требования к ней и предложена оригинальная методика ее применения, обеспечивающая возможность избегать необходимость корректировки наборов правил детектирования при добавлении новых источников событий или обновления подсистемы регистрации существующих событий. При этом рассмотренные варианты категоризации применяются только для событий безопасности и не затрагивают события общесистемного программного обеспечения.

Основным положением методики является требование наличия для каждого события одной четко определенной категории. Предусмотрены возможности масштабирования системы категоризации, определены методы адаптации системы категоризации для применения в промышленных системах автоматизации и управления. Также представлены результаты эксперимента по применению методики для повышения эффективности защиты автоматизированных систем на примере стенда, созданного на базе киберполигона. Полученные результаты показали эффективность подобной методики и подтвердили возможность ее применения для защиты промышленных систем.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-71-00125 «Алгоритмическое обеспечение для усиленной проверки подлинности субъектов доступа в критически важных объектах».

Список источников

1. Федорченко А.В. Анализ методов корреляции событий безопасности в siem-системах. Часть 1 / А.В. Федорченко, Д.С. Левшун, А.А. Чечулин, И.В. Котенко // Труды СПИИРАН, 2016. – № 4 (47). – С. 5-27.
2. Reference incident classification taxonomy task force status and way forward. Available at: https://www.enisa.europa.eu/publications/reference-incident-classification-taxonomy/@@download/fullReport (accessed: 05/01/2023).
3. Исхаков А.Ю. Модели нормализации данных в системах управления событиями безопасности РТК / А.Ю. Исхаков, С.Ю. Исхаков // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2020. Труды тринадцатой международной конференции. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 1390-1399.

4. Rajivan P., Konstantinidis E., Ben-Asher N., Gonzalez C. Categorization of events in security scenarios: the role of context and heuristics. Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting, 2016, no. 60(1), pp. 274-278, DOI: 10.1177/1541931213601063.
5. Granadillo G., González-Zarzosa S., Diaz R. Security Information and Event Management (SIEM): Analysis, trends, and usage in critical infrastructures. Sensors, 2021, no. 21, 4759, DOI:10.3390/s21144759.
6. Kin J.-Y., Kwon H.-Y. Threat classification model for security information event management focusing on model efficiency. Computers & Security, 2022, no. 120, 102789, DOI: 10.1016/j.cose.2022.102789.
7. Шишкин В.М. Исследование применения прогнозной модели в процессе управления безопасностью / В.М. Шишкин, К.Е. Колесников // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2018. – № 4 (12). – С. 96-104.
8. Котенко И.В. Модель системы управления информацией и событиями безопасности / И.В. Котенко, И.Б. Паращук // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, 2020. – № 2. – С. 84-94.
9. Микрюков А.А. Классификация событий в системах обеспечения информационной безопасности на основе нейросетевых технологий / А.А. Микрюков, А.В. Бабаш, В.А. Сизов // Открытое образование, 2019. – № 1. – С. 57-63.
10. Новикова Е.С. Обзор алгоритмов корреляции событий безопасности для обеспечения безопасности облачных вычислительных сред / Е.С. Новикова, Я.А. Бекенева, А.В. Шоров, Е.С. Федотов // Информационно-управляющие системы, 2017. – № 5 (90). – С. 95-104. – DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.5.95.
11. Hossain S.M, Couturier R., Rusk J., Kent K.B. Automatic event categorizer for SIEM. Proceedings of the 31st annual international conference on computer science and software engineering (CASCON '21). IBM Corp., USA, 2021, pp. 104-112.
12. Miloslavskaya N., Furnell S. Network Security Intelligence centres for information security incident management. Brain-Inspired cognitive architectures for artificial intelligence: BICA*AI 2020. BICA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1310, 2020, pp. 270-282, DOI: 10.1007/978-3-030-65596-9_34.
13. Cinque M., Cotroneo D., Pecchia A. Challenges and Directions in Security Information and Event Management (SIEM). 2018 IEEE International symposium on software reliability engineering workshops (ISSREW), Memphis, TN, USA, 2018, pp. 95-99, DOI: 10.1109/ISSREW.2018.00-24.
14. Iskhakov A.Y., Mamchenko M.V., Khripunov S.P. Enhanced user authentication algorithm based on behavioral analytics in Web-based cyberphysical systems. 2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 253-258, DOI: 10.1109/SmartIndustryCon 57312.2023.10110791.
15. Çakmakçı S.D., Hutschenreuter H., Maeder C., Kemmerich T. A framework for intelligent DDoS attack detection and response using SIEM and ontology. 2021 IEEE International conference on communications workshops (ICC Workshops), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021. 9473869.
16. Manjeet M., Sharma M. A Basis on prestige gotten better SIEM for nefarious link tracking in IoT. 2022 11th International conference on system modeling & advancement in research trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 352-355, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046875.
17. Singh V.K., Callupe S.P., Govindarasu M. Testbed-based evaluation of SIEM tool for cyber kill chain model in power grid SCADA system. 2019 North American Power Symposium (NAPS), Wichita, KS, USA, 2019, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS46351.2019.9000344.
18. Ходашинский И.А. Технология усиленной аутентификации пользователей информационных процессов / И.А. Ходашинский, М.В. Савчук, И.В. Гобунов, Р.В. Мещеряков // Доклады ТУСУРа, 2011. – № 2(24). – С. 236-248.

Исхаков Андрей Юнусович. *Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИПУ РАН. Область научных интересов: информационная безопасность, идентификация и аутентификация субъектов доступа, анализ данных, интернет вещей, системы поддержки и принятия решений. AuthorID: 925433, SPIN: 3390-0291, ORCID: 0000-0002-6603-265X, iskhakovandrey@gmail.com, 117997, Россия, Москва, Профсоюзная улица, 65.*

Исхаков Сергей Юнусович. *Кандидат технических наук, начальник отдела анализа и автоматизации реагирования на компьютерные инциденты ПАО Промсвязьбанк. Основные научные интересы: информационная безопасность, проактивный поиск угроз, расследование инцидентов информационной безопасности. AuthorID: 852777, SPIN: 8178-1455, ORCID: 0000-0003-3346-9262, iskhakov.sy@gmail.com, 117997, Россия, Москва, Профсоюзная улица, 65.*

UDC 004.056.5
DOI:10.25729/ESI.2023.30.2.015

Improving the efficiency of information protection systems by categorizing security events

Andrey Y. Iskhakov[1], Sergey Y. Iskhakov[2]

[1]V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, *iay@ipu.ru*

[2]Public Joint-Stock Company Promsvyazbank, Russia, Moscow

Abstract. The article considers the basic principles of categorization of security events, formulates the requirements to it and offers a methodology for its application. Examples of event categorization options for various information protection tools are given. Possibilities of scaling the categorization system and methods of its adaptation for use in industrial automation and control systems are determined. The results of an experiment on the application of the methodology to improve the protection of automated systems on the example of a virtual cyber polygon are also presented, confirming the effectiveness of this methodology and the possibility of its application to the protection of industrial systems.

Keywords: correlation, data categorization, normalization, taxonomy, security information and event management, attack scenarios, incident

Acknowledgements: This research was funded by Russian Science Foundation, project 21-71-00125.

References

1. Fedorchenko A., Levshun D., Chechulin A., Kotenko I. Analiz metodov korrelyatsii sobytiy bezopasnosti v siem-sistemakh. Chast' 1 [An analysis of security event correlation techniques in siem-systems. Part 1]. Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings], 2016, col. 4 (47), pp. 5-27.
2. Reference incident classification taxonomy task force status and way forward. Available at: https://www.enisa.europa.eu/publications/reference-incident-classification-taxonomy/@@download/fullReport (accessed: 05/01/2023).
3. Iskhakov A.Y., Iskhakov S.Y. Modeli normalizatsii dannykh v sistemakh upravleniya sobytiyami bezopasnosti RTK [Data normalization models in security event management systems of Robotics Complexes] Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem MLSD'2020. Trudy trinadcatoj mezhdunarodnoj konferencii. Pod obshchej redakciej S.N. Vasil'eva, A.D. Cvirkuna [Management of large-scale systems development MLSD'2020. Proceedings of the Thirteenth International Conference. Edited by S.N. Vasiliev, A.D. Tsvirkun], 2020, pp. 1390-1399.
4. Rajivan P., Konstantinidis E., Ben-Asher N., Gonzalez C. Categorization of events in security scenarios: the role of context and heuristics. Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting, 2016, no. 60(1), pp. 274-278, DOI: 10.1177/1541931213601063.
5. Granadillo G., González-Zarzosa S., Diaz R. Security Information and Event Management (SIEM): Analysis, trends, and usage in critical infrastructures. Sensors, 2021, no. 21, 4759, DOI:10.3390/s21144759.
6. Kin J.-Y., Kwon H.-Y. Threat classification model for security information event management focusing on model efficiency. Computers & Security, 2022, no. 120, 102789, DOI: 10.1016/j.cose.2022.102789.
7. Shishkin V.M., Kolesnikov K.E. Issledovaniye primeneniya prognoznoy modeli v protsesse upravleniya bezopasnost'yu [Investigation of the forecasting model of application in the process of security management] Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2018, vol. 4 (12), pp. 96-104.
8. Kotenko I.V., Parashchuk I.B. Model' sistemy upravleniya informatsiyey i sobytiyami bezopasnosti [Model of security information and event management system]. Vestnik AGTU. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics], 2020, vol. 2, pp. 84-94.
9. Mikryukov A.A., Babash A.V., Sizov V.A. Klassifikatsiya sobytiy v sistemakh obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti na osnove neyrosetevykh tekhnologiy [Classifcation of events in information security systems based on neural networks]. Otkrytoye obrazovaniye [Open education], 2019, vol. 1, pp. 57-63.
10. Novikova E. S., Bekeneva Y. A., Shorov A. V., Fedotov E. S. Obzor algoritmov korrelyatsii sobytiy bezopasnosti dlya obespecheniya bezopasnosti oblachnykh vychislitel'nykh sred [A survey of security event correlation techniques for cloud computing environment security]. Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy [Information and control systems]. 2017, vol. 5 (90), pp. 95-104, DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.5.95.

11. Hossain S.M., Couturier R., Rusk J., Kent K.B. Automatic event categorizer for SIEM. Proceedings of the 31st annual international conference on computer science and software engineering (CASCON '21). IBM Corp., USA, 2021, pp. 104-112.
12. Miloslavskaya N., Furnell S. Network Security Intelligence centres for information security incident management. Brain-Inspired cognitive architectures for artificial intelligence: BICA*AI 2020. BICA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1310, 2020, pp. 270-282, DOI: 10.1007/978-3-030-65596-9_34.
13. Cinque M., Cotroneo D., Pecchia A. Challenges and Directions in Security Information and Event Management (SIEM). 2018 IEEE International symposium on software reliability engineering workshops (ISSREW), Memphis, TN, USA, 2018, pp. 95-99, DOI: 10.1109/ISSREW.2018.00-24.
14. Iskhakov A.Y., Mamchenko M.V., Khripunov S.P. Enhanced user authentication algorithm based on behavioral analytics in Web-based cyberphysical systems. 2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 253-258, DOI: 10.1109/SmartIndustryCon 57312.2023.10110791.
15. Çakmakçı S.D., Hutschenreuter H., Maeder C., Kemmerich T. A framework for intelligent DDoS attack detection and response using SIEM and ontology. 2021 IEEE International conference on communications workshops (ICC Workshops), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021. 9473869.
16. Manjeet M., Sharma M. A Basis on prestige gotten better SIEM for nefarious link tracking in IoT. 2022 11th International conference on system modeling & advancement in research trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 352-355, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046875.
17. Singh V.K., Callupe S.P., Govindarasu M. Testbed-based evaluation of SIEM tool for cyber kill chain model in power grid SCADA system. 2019 North American Power Symposium (NAPS), Wichita, KS, USA, 2019, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS46351.2019.9000344.
18. Hodashinskiy I. A., Savchuk M. V., Gorbunov I. V., Mescheryakov R.V. Meshcheryakov R.V. Tekhnologiya usilennoy autentifikatsii pol'zovateley informatsionnykh protsessov [Strong authentication technology of the users of information processes]. Doklady TUSURa [Proceedings of TUSUR University], 2011, vol. 2(24), pp. 236-248.

Andrey Y. Iskhakov. *Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher at the ICS RAS. Research interests: information security, identification and authentication of access subjects, data analysis, Internet of things, decision support and decision-making systems. AuthorID: 925433, SPIN: 3390-0291, ORCID: 0000-0002-6603-265X, iskhakovandrey@gmail.com, 65 Profsoyuznaya str., Moscow, Russia.*

Sergey Y. Iskhakov. *Candidate of Sciences (Engineering), Head of the Department for Analysis and Automation of Computer Incident Response at Promsvyazbank. Main scientific interests: information security, proactive threat detection, investigation of information security incidents. AuthorID: 852777, SPIN: 8178-1455, ORCID: 0000-0003-3346-9262, iskhakov.sy@gmail.com, 65 Profsoyuznaya str., Moscow, Russia.*

Статья поступила в редакцию 01.05.2023; одобрена после рецензирования 10.05.2023; принята к публикации 10.05.2023.
The article was submitted 05/01/2023; approved after reviewing 05/10/2023; accepted for publication 05/10/2023.