

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№4(36)/2024

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ**

**Научный журнал
№ 4 (36)**



EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.
 Arshinskiy L.V.
 Berestneva O.G.
 Boukhanovsky A.V.
 Bychkov I.V.
 Woern H.
 Voevodin V.V.
 Wolfengagen V.E.
 Gornov A.Y.
 Gribova V.V.
 Groumpos P.
 Zorina T.G.
 Kazakov A.L.
 Kalimoldaev M.N.
 Karpenko A.P.
 Komendantova N.P.
 Kureichik V.V.
 Lis R.
 Marchenko M.A.
 Massel L.V.
 Moskvichev V.V.
 Ovtcharova J.
 Popov G.T.
 Sidorov D.N.
 Smirnov S.V.
 Stennikov V.A.
 Stylios C.
 Taratukhin V.V.
 Khamisov O.V.
 Hodashinsky I.A.
 Chubarov L.B.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
 Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
 Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
 Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
 Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
 Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
 Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Грибова В.В., чл.-корр. РАН, д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
 Грумπος Π., Греция, University of Patras
 Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
 Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
 Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
 Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, ПАСА
 Курейчик В.В., д.т.н., профессор, Таганрог, ЮФУ
 Лис Р., Польша, Wrocław University of Science and Technology
 Марченко М.А. д.ф.-м.н., профессор РАН, Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН
 Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, ФИЦ ИВТ
 Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
 Сидоров Д.Н., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
 Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
 Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
 Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
 Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ФИЦ ИВТ

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.
 Executive Editor
 Bakhvalova Z.A.
 Editor Gaskova D.A.
 Editor Massel A.G.
 Tech. Editor Popova M.D.
 Designer Pesterev D.V.

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор Массель Л.В. д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Выпускающий редактор
 Бахвалова З.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Редактор Гаськова Д.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Редактор Массель А.Г. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Техн. редактор Попова М.Д. Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 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»
 Адрес типографии: 664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14
 *Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021 г.
 Дата выхода 25.12.2024 г. Тираж 50 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН
 Цена свободная (12+)

Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта

Дорогов А.Ю. Коллективные классификаторы повторного входа и их реализация в классе самоподобных нейронных сетей	5
Чернавин П.Ф., Чернавин Н.П., Чернавин Ф.П. Применение моделей математического программирования для решения проблемы XOR	17
Холопов В.А., Макаров М.А., Благовещенский И.Г. Метод согласования систем координат компонентов в РТК на основе машинного зрения	26
Игумнов И.В., Куцкий Н.Н. Параметрическая оптимизация ШИМ-регулятора с нейронной сетью с помощью улучшенного метода Нелдера-Мида	37

Математическое моделирование и его применение в научных исследованиях

Базилевский М.П. Оценивание методом наименьших квадратов неэлементарных линейных регрессий с квантованными объясняющими переменными	46
Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование подсистемы управления механизмом подъема ковша шагающего экскаватора	57
Солопко И.В., Любанова А.Ш., Капулин Д.В. Моделирование теплообмена при непрерывном прессовании	65

Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

Колосок И.Н., Коркина Е.С. Применение облачных и граничных технологий при развитии интеллектуальной энергосистемы	73
Еделев А.В., Карамов Д.Н., Башарина О.Ю., Огородников В.А., Каргаполова Н.А., Акентьева М.С. Интеграция стохастических «генераторов погоды» в структурно-параметрическую оптимизацию микросетей	85
Шакиров В.А., Пионкевич В.А. Оптимизация и многокритериальный выбор конфигурации гибридной автономной энергетической системы на основе программы nPro и метода TOPSIS	98
Щукина В.М., Щукин Н.И. Формирование цифровой модели ветроэнергетической установки в составе цифрового двойника и её апробация на примере оценки эффективности применения ветроустановки в селе Онгурены	112
Калинина Ж.В., Дзюбина Т.В., Илькевич Н.И. Создание расчетной схемы газоснабжающей системы России с детализацией Восточной Сибири и Дальнего Востока	123

Информационные системы и технологии

Плеханова О.С., Асламова В.С., Асламов А.А. Обработка статистики метеорологических данных для оценки потенциала загрязнения атмосферы антропогенными выбросами в городах Ангарск, Братск, Иркутск	132
Козлов М.В., Михеев А.В. Информационное проектирование инструментария для динамического когнитивного моделирования в энергетике	146
Ермаков А.В. Аналитическая статистика научных изданий на Scilit (на примере публикаций ИСЭМ СО РАН)	159
Никулина Н.О., Старцева Е.Б., Малахова А.И. Организация подготовки практико-ориентированной выпускной квалификационной работы в ВУЗе	172

Methods, technologies and applications of artificial intelligence

- Dorogov A.Yu.** Collective re-entry classifiers and their implementation in a class of self-similar neural networks 5
- Chernavin P.F., Chernavin N.P., Chernavin F.P.** Using mathematical programming models to solve XOR Problems 17
- Kholopov V.A., Makarov M.A., Blagoveshchensky I.G.** A machine vision-based method for aligning coordinate systems of components in Robotic Technological Complexes 26
- Igumnov I.V., Kucyi N.N.** Parametric optimization of a neural network PWM controller using the improved Nelder-Mead method 37

Mathematical modeling and its application in scientific research

- Bazilevskiy M.P.** Ordinary least squares estimation of non-elementary linear regressions parameters with uniformly quantized explanatory variables 46
- Dunaev M.P., Dovudov S.U.** Simulation of the bucket lifting mechanism control subsystem of a walking excavator 57
- Solopko I.V., Lubanova A.Sh., Kapulin D.V.** Modeling of heat transfer under continuous extrusion 65

Mathematical, information and intellectual technologies in the energy sector

- Kolosok I.N., Korkina E.S.** Application of cloud and edge technologies in the development of intelligent energy system 73
- Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu., Ogorodnikov V.A., Kargapolova N.A., Akenteva M.S.** The integration of stochastic weather generators into the design of microgrids 85
- Shakirov V.A., Pionkevich V.A.** Optimization and multi-criteria selection of the configuration of a hybrid autonomous energy system based on the nPro program and TOPSIS 98
- Shchukina V.M., Shchukin N.I.** Formation of a digital model of a wind turbine as part of a digital twin and its testing using the example of assessing the efficiency of wind turbine application in Ongureni village 112
- Kalinina Zh.V., Dzyubina T.V., Ilkevich N.I.** Development of a calculation scheme of Russia's gas system with a focus on Eastern Siberia and the Far East 123

Information systems and technologies

- Plekhanova O.S., Aslamova V.S., Aslamov A.A.** Processing statistics of meteorological data to assess the potential for air pollution by anthropogenic emissions in the cities of Angarsk, Bratsk, Irkutsk 132
- Kozlov M.V., Mikheev A.V.** Information design for dynamic cognitive modeling in energy sector 146
- Ermakov A.V.** Analytical statistics of scientific publications on Scilit (using the example of publications by ISEM SB RAS) 159
- Nikulina N.O., Startseva E.B., Malakhova A.I.** Organizing a practice-oriented final qualification work preparation at the university 172

Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта

УДК 004.93'12:004.032.26

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.001

Коллективные классификаторы повторного входа и их реализация в классе самоподобных нейронных сетей

Дорогов Александр Юрьевич

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии»
Россия, Санкт-Петербург, vaksa2006@yandex.ru

Аннотация. В статье предложен новый метод обучения частных классификаторов, а также способ агрегации их прогнозов в составе комитета. Обучение основано на гипотезе итерационного повторного входа биологических нейронных сетей и использует для своей реализации метод главных компонент. Для частных классификаторов задаются области компетенций, в совокупности покрывающих обучающее множество примеров. Показано, что процесс итерационного обучения за несколько шагов сходится, обеспечивая точность распознавания 100% в области компетенции частного классификатора. Агрегация прогнозов реализуется по принципу максимальной проекции образа на собственные подпространства классов частных классификаторов. Приведены примеры использования комитета компетентных классификаторов для набора данных MNIST. Предложена модель непрерывного обучения комитета классификаторов, пригодная для построения самообучающихся систем распознавания. Рассмотрена нейросетевая реализация классификаторов в классе самоподобных нейронных сетей.

Ключевые слова: частный классификатор, комитет классификаторов, коллективное распознавание, область компетенции, повторный вход, непрерывное обучение, самоподобная нейронная сеть

Цитирование: Дорогов А.Ю. Коллективные классификаторы повторного входа и их реализация в классе самоподобных нейронных сетей / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 5-16. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.001.

Введение. Нобелевский лауреат Джеральд Морис Эдельман в 1977 году выдвинул гипотезу [1, 2] о том, что реентерабельная (reentry - повторно-вводимая) передача сигналов служит общим механизмом для накопления знаний в коре головного мозга. Повторный вход по Эдельману – это динамический процесс постоянной пространственно-временной корреляции, происходящий между функционально разделёнными нейронными областями, который опосредуется повторной передачей сигналов через параллельные нервные волокна. Механизмом этого явления считается ритмическая активность мозга. С точки зрения теории динамических систем повторный вход подобен итерационному процессу, сходящемуся к некоторому устойчивому аттрактору, обобщающему накопленные знания.

Развивая собственную теорию нейродарвинизма (Neural Darwinism) [3], Эдельман отмечал, что в коре головного мозга на один и тот же сенсорный сигнал одновременно реагируют несколько конкурирующих нейронных групп, реакция которых в дальнейшем конвергируется в более глубоких слоях коры, реализуя принцип коллективного распознавания и одновременно стимулируя процесс эволюционного развития нейронных структур коры головного мозга.

В технических приложениях метод коллективного решения задачи классификации заключается в объединении моделей одиночных классификаторов в комитет с некоторым общим принципом агрегации прогнозов частных классификаторов. В настоящей работе будут рассмотрены технические решения, объединяющие методы коллективного распознавания и усиление классификаторов за счет реализации принципа повторного входа. В заключительном разделе будет представлена нейросетевая реализация предлагаемых решений.

1. Методы коллективного распознавания. При формировании комитета классификаторов необходимо оптимизировать два критерия – качество обучения частных классификаторов и оптимальность их объединения [4, 5]. Простейшим методом агрегации частных прогнозов может быть простое голосование, которое приводит к увеличению точности коллективного решения за счет снижения степени неопределенности при сложении частных прогнозов. Общее название методов построения коллективных классификаторов выражается термином «boosting» - усиление [6]. Наиболее известными являются методы bagging и adaboost.

Метод bagging, предложенный Лео Брейманом в 1994 году [7], предполагает обучение частных классификаторов на случайных выборках, формируемых из обучающего множества. Агрегация классификаторов выполняется простым голосованием.

Метод adaboost, предложенный Йоавом Фройндом и Робертом Шапире [8] в 1995 году, предполагает обучение частных классификаторов на одной выборке с пошаговой адаптацией по ошибкам обучения как самих классификаторов, так и комитета классификаторов. Агрегация частных прогнозов выполняется взвешенным голосованием. Оптимальные веса для классификаторов рассчитываются на каждом шаге алгоритма. Одновременно видоизменяется обучающая выборка, где для каждого примера также выполняется расчет веса, который используется в процедуре обучения, например, для повторения в выборке примеров, на которых обнаружены ошибки.

В 70-х и 80-х годах советские ученые Л.А. Растрингин и Р.Х. Эренштейн в ряде работ разработали метод коллективного распознавания на основе компетентных классификаторов [9, 10, 11]. Идея таких методов базируется на том, что каждый базовый классификатор может работать хорошо в некоторой области пространства признаков (эта область интерпретируется как область компетентности классификатора), превосходя в этой области остальные классификаторы по точности и достоверности решений. Классификация образов выполняется в два этапа: первый этап связан с определением классификатора, область компетенции которого покрывает распознаваемый образ, и на втором этапе найденный классификатор используется для отнесения образа к некоторому классу. Авторы предложили несколько способов определения областей компетенции классификаторов и доказали применимость используемого подхода на примерах.

2. Компетентный классификатор повторного входа. Рассмотрим классификатор, основанный на оценке длины проекции образа на подпространства классов. Подпространства класса порождаются линейной комбинацией векторов обучающей выборки, принадлежащих одному классу. Проекцию вектора-образа легко определить, если в подпространстве класса задать ортогональный базис. Сумма квадратов коэффициентов разложения вектора образа по этому базису будет определять квадрат проекции образа на подпространство класса. Образы нормируются по энергии к единице. Классификатор относит образ к классу, для которого проекция на подпространство класса оказывается максимальной.

Среди возможных ортогональных базисов можно подобрать оптимальный базис, который обеспечивает наиболее быструю сходимость коэффициентов разложения. Известно, что таким свойством обладает ортогональный базис, полученный методом главных компонент (англ. Principal Component Analysis, PCA) [12] из ковариационной матрицы векторов класса. Эмпирическая или выборочная ковариационная матрица класса определяется выражением:

$$C = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^T (x_i - \bar{x}),$$

где m - число примеров в классе, x_i - вектор-строка представителя класса, \bar{x} - вектор-строка средних значений примеров в классе. Ковариационная матрица является симметричной и положительно определённой. Для такой матрицы можно найти собственные ортогональные вектора v такие, что

$$Cv = \lambda v.$$

Скаляр λ называется собственным числом, соответствующим собственному вектору v . Все собственные числа ковариационной матрицы положительные, и чем большее значение они имеют, тем большей значимостью обладает собственный вектор. Для построения модели классификатора отбирают наиболее значимые вектора. При распознавании вектор образа центрируется по среднему образу примеров в классе, и раскладывается по выбранным собственным векторам класса. Далее по коэффициентам разложения вычисляется длина проекции образа на подпространство класса. Вектору образа присваивается метка класса, в котором длина его проекции максимальна.

Воспользуемся теперь принципом повторного входа для обучения PCA-классификатора. В обучающей выборке выберем представительный фрагмент, который далее будем называть областью компетенции классификатора. В области компетенции произвольно выделим базовое множество примеров, которое будем использовать для построения модели PCA-классификатора. На каждом шаге эволюции по результатам классификации выполняется контроль ошибок модели на области компетенции. Примеры, на которых произошли ошибки, добавляются к базовому множеству с дифференциацией по классам и модель PCA-классификатора строится заново. Процесс многократно повторяется до полного устранения ошибок на области компетенции. В процессе эволюции размер базового множества постепенно возрастает. Темп сходимости к нулевой ошибке зависит от размера области компетенции, начального базового множеств и размерности модели (числа удерживаемых собственных векторов). Построенный классификатор будем называть компетентным.

Покажем эффективность метода обучения классификатора на примере набора данных MNIST [13]. Набор данных содержит двумерные образы рукописных цифр от 0 до 9 в виде пиксельных изображений размером 28×28 . Объем обучающей выборки равен 60000 образов, и 10000 изображений содержит тестовая выборка. На рис. 1 показана выборка с десятью представителями для каждого класса. При проведении экспериментов все примеры выборок нормировались по энергии к единичному уровню.

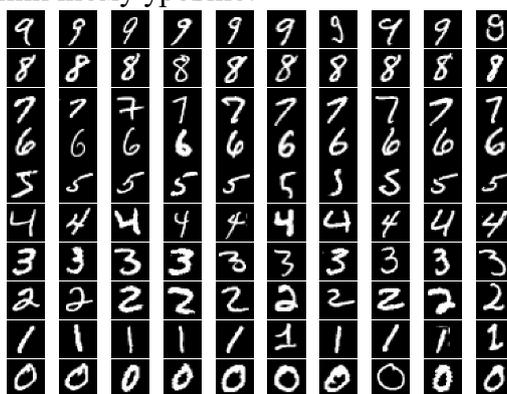


Рис. 1. Выборка из набора рукописных цифр MNIST

Для набора данных максимальный объем области компетенции, на котором эволюционный процесс ещё сходится, составляет примерно 20000 примеров. Наилучшие результаты достигаются на выборках из 5000-10000 примеров. На рис. 2 показана зависимость точности классификатора примеров с областью компетенции из 5000 примеров и начальной базовой выборки 1000 примеров.

Как видно из рисунка, итерационный процесс сходится примерно за 6 шагов. Размер моделей в этом эксперименте составлял 30 собственных векторов. В процессе эволюции базовое множество возросло с 1000 до 1385 примеров. Обученный классификатор проверялся на тестовой выборке размером 10000 примеров. На рис. 3 показана таблица ошибок классификатора. Достигнутая точность на тестовой выборке составила 94.6%.

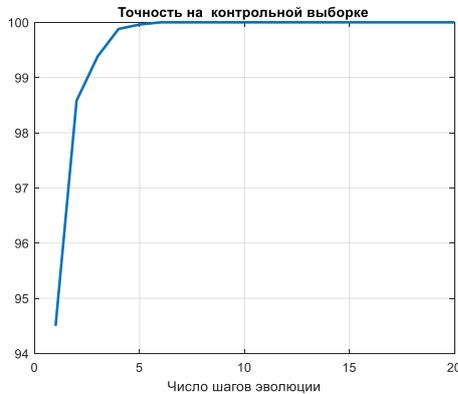


Рис. 2. Зависимость точности классификатора на области компетенции от числа шагов эволюции

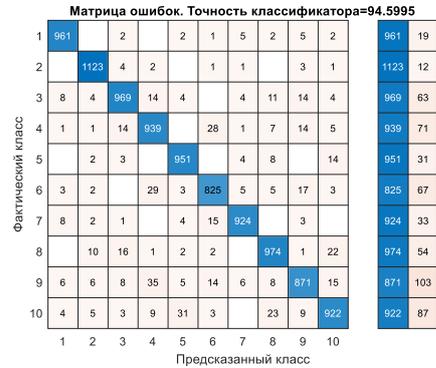


Рис. 3. Таблица ошибок PCA-классификатора повторного входа на тестовой выборке

3. Комитет компетентных классификаторов. Для построения комитета классификаторов разделим всю обучающую выборку на представительные области компетенции и на каждой области обучим PCA-классификатор с повторным входом. Для формирования агрегированного результата комитета будем использовать принцип максимума. Фактически за результат комитета будет отвечать классификатор с максимальным значением проекции образа на подпространство класса.

На рис. 4 показана матрица ошибок для полного обучающего множества, состоящего из 60000 примеров. Точность классификации на обучающей выборке составляет чуть более 99 процентов при размере комитета равным 12. На рис. 5 показана матрица ошибок этого же коллективного классификатора на полной тестовой выборке, состоящей из 10000 примеров. Точность классификации составляет примерно 97 процентов.



Рис. 4. Таблица ошибок комитета эволюционных классификаторов для обучающей выборки



Рис. 5. Таблица ошибок комитета эволюционных классификаторов для тестовой выборки

Для эксперимента использовались классификаторы повторного входа с областью компетенции 5000 примеров и начальным размером базового множества 1000 примеров. На текущий момент мировое достижение [14] по точности классификации тестового набора данных MNIST составляет 99.87%.

4. Коллективный классификатор непрерывного обучения. Природа не разделяет данные на обучающую и тестовую выборки, биологический мозг обучается непрерывным потоком поступающих данных. С этой точки зрения имеет смысл отказаться от общепринятого деления выборки на обучающую и тестовую. Принцип разделения классификаторов по областям компетенции, с агрегированием по максимуму, позволяет неограниченно наращивать размер комитета, покрывая всю выборку и обучающую, и тестовую, а также все последующие поступившие данные. На рис. 6 приведена матрица ошибок для объединённой выборки коллективного классификатора для объединённой выборки с числом примеров 70000.

В комитете использовались эволюционные классификаторы с областью компетенции 5000 примеров и начальным базовым множеством 1000 примеров. Число компетентных классификаторов для объединённой выборки из 70000 примеров составило 14. Точность коллективного классификатора составила 99.49%. Модель непрерывного обучения может быть использована для построения самообучающихся систем распознавания реального времени, за счет добавления новых классификаторов в процессе функционирования системы.

Эволюционный принцип повторного входа можно распространить также на весь комитет классификаторов. С этой целью в модели каждого компетентного классификатора запоминаются номера примеров базового множества на момент завершения обучения (т.е. достижения 100% точности на области компетенции). Алгоритм эволюции для комитета на каждом шаге фиксирует номера примеров в объединённой выборке, на которых произошли ошибки. Эти примеры разделяются по областям компетенции частных классификаторов и добавляются в списки примеров базовых множеств. Далее заново выполняется обучение частных классификаторов с обновлёнными базовыми множествами до достижения 100% точности на областях компетенции и вновь контролируются ошибки комитета классификаторов, далее итерации комитета повторяются.

Эволюционный процесс сходится к 100% процентной точности. На рис. 7 показана зависимость точности комитета классификаторов от числа шагов эволюции. Мета-параметры комитета соответствуют предыдущему примеру. Предложенная модель непрерывного эволюционного обучения комитета классификаторов обеспечивает 100 процентную точность распознавания объединённой выборки.

Матрица ошибок. Точность классификатора=99.4929

1	6900		1		1	1					6900	3
2		7874			1					2		3
3	7	5	6959	11			1	3	4			31
4	1	3	4	7096		13		1	19	4		45
5	1	3	1		6795		2	4	2	16		29
6	3		1	23		6246	10	1	27	2		67
7	5	1			1	2	6864			3		12
8		5	7		3			7255			23	38
9	4	22	4	9	2	9	5	4	6752	14		73
10	3	1	2	5	16			21	6	6904		54
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		

Фактический класс (столбцы), Предсказанный класс (строки)

Рис. 6. Таблица ошибок непрерывного классификатора на объединённой выборке

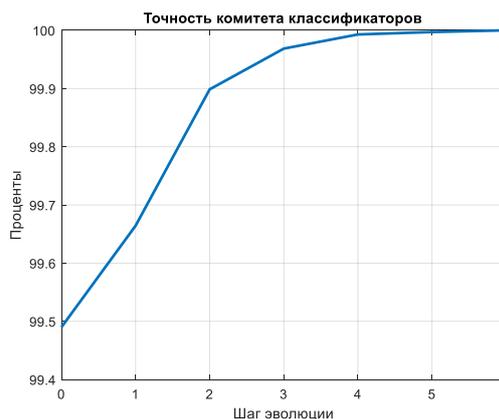


Рис. 7. Зависимость точности комитета классификаторов от числа шагов эволюции

5. Нейросетевая реализация классификаторов. Классификатор повторного входа вычисляет проекцию вектора-образа на подпространства классов. Проекция определяется через разложение вектора в усеченных ортогональных базисах. Это линейная матричная операция,

которая реализуется через вычисление скалярных произведений векторов. Переход к нейросетевой реализации связан с факторизацией линейного преобразования в параллельно-последовательную матричную форму.

5.1. Быстрая нейронная сеть. В основе построения схемы факторизации лежат классические алгоритмы быстрых преобразований. В работе [4] показано, что они являются частным случаем многослойных самоподобных нейронных сетей. На рис. 8 представлен граф быстрого преобразования Фурье размерности 8 с топологией Кули-Тьюки «с прореживанием по времени». В каждом слое выделены четыре базовых операции типа «Бабочка». Для преобразования Фурье параметры базовых операций полностью определены, однако, если допустить, что их параметры можно изменять, то мы приходим к варианту быстрых нейронных сетей (БНС) [15]. В этом контексте базовые операции уместно назвать нейронными ядрами.

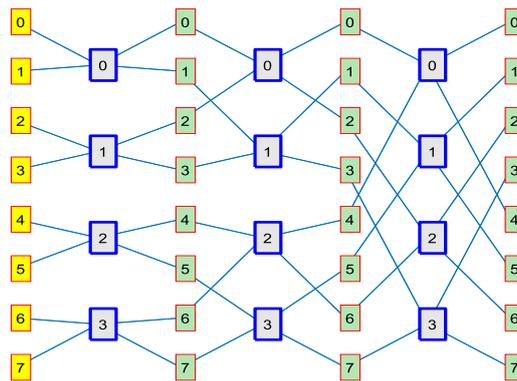


Рис. 8. Граф быстрого преобразования Фурье

Сетевая модель данной топологии и описывается набором кортежей [4]:

$$\begin{aligned}
 U^m &= \langle u_{n-1}u_{n-2} \cdots u_{m+1}u_m v_{m-1}v_{m-2} \cdots v_1v_0 \rangle, \\
 V^m &= \langle u_{n-1}u_{n-2} \cdots u_{m+1}v_m v_{m-1}v_{m-2} \cdots v_1v_0 \rangle, \\
 z^m &= \langle u_{n-1}u_{n-2} \cdots u_{m+1}v_{m-1}v_{m-2} \cdots v_1v_0 \rangle.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где z^m – порядковый номер нейронного ядра; U^m, V^m – порядковые номера рецепторов и аксонов в слое m ; u_m, v_m – локальные номера рецепторов и аксонов в пределах нейронного ядра слоя m . Каждый кортеж представляет собой поразрядную форму представления порядкового номера через разрядные переменные u_m, v_m . Основания разрядных переменных u_m, v_m определяются целыми положительными числами p_m, g_m , и по слоям могут быть заданы соответствиями:

$$\left(\begin{array}{cccccc} u_0 & u_1 & \cdots & u_{n-2} & u_{n-1} \\ p_0 & p_1 & \cdots & p_{n-2} & p_{n-1} \end{array} \right), \quad \left(\begin{array}{cccccc} v_0 & v_1 & \cdots & v_{n-2} & v_{n-1} \\ g_0 & g_1 & \cdots & g_{n-2} & g_{n-1} \end{array} \right).$$

Для ядер размерности 2×2 , имеем $p_m = 2, g_m = 2$ и все разрядные переменные принимают значения $\{0,1\}$. Координатные направления U^m и V^m в дальнейшем будем называть входной и выходной плоскостью нейронного слоя. Для терминальных плоскостей (относящихся к начальному и конечному слою сети) будем использовать обозначения U и V . Для построения быстрых алгоритмов размерность преобразования должна быть составным числом, и чем больше множителей в разложении размерности, тем выше вычислительная эффективность быстрого алгоритма. Размерности быстрой нейронной сети по входу и выходу вычисляются через произведения оснований разрядных переменных:

$$N = p_{n-1} \cdots p_1 p_0, \quad M = g_{n-1} \cdots g_1 g_0.$$

Число слоёв в быстром преобразовании равно числу сомножителей в этих произведениях. Несмотря на большое разнообразие быстрых алгоритмов, конфигурации их структур удовлетворяют системному инварианту самоподобия [15]. Как известно, таким же свойством самоподобия обладают фракталы, поэтому быстрые алгоритмы можно интерпретировать как квазифракталы. Свойство структурной фрактальности позволяет решить одновременно две задачи: реализовать быструю обработку данных и выполнить быстрое обучение преобразования. Обучение быстрого преобразования заключается в выборе значений элементов нейронных ядер, так, чтобы в столбцах матрицы преобразования содержался заданный набор эталонных функций, это могут быть, например, ортогональные собственные вектора выборочной ковариационной матрицы. В [16] показано, что для самоподобных нейронных сетей элементы матрицы быстрого преобразования могут быть выражены через произведения элементов нейронных ядер:

$$h(U, V) = w_{z^{n-1}}^{n-1}(u_{n-1}, v_{n-1}) w_{z^{n-2}}^{n-2}(u_{n-2}, v_{n-2}) \cdots w_{z^0}^0(u_0, v_0).$$

Там же доказано, что произвольная функция, заданная на дискретном интервале длиной $N = p_{n-1} \cdots p_1 p_0$, может быть представлена в мультипликативной форме:

$$f(u) = \phi_{i^0}^0(u_0) \phi_{i^1}^1(u_1) \cdots \phi_{i^{n-2}}^{n-2}(u_{n-2}) \phi_{i^{n-1}}^{n-1}(u_{n-1}).$$

где $i^m = \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_{m+1} \rangle$. Отсюда следует правило настройки нейронных ядер:

$$w_{z^m}^m(u_m, v_m) = \phi_{i^m}^k(u_m). \quad (2)$$

Здесь k – номер опорной функции. Зададим точку привязки эталонной функции в выходной плоскости числом, представленным в поразрядной форме:

$$x = \langle x_{n-1} x_{n-2} \cdots x_0 \rangle,$$

тогда номера настраиваемых ядер по слоям будут определяться выражением:

$$z^m = \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_{m+1} x_{m-1} x_{m-2} \cdots x_1 x_0 \rangle.$$

Для $m=0$ имеем $z^0 = \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_1 \rangle$, это означает, что независимо от выбора точки привязки все ядра слоя будут настраиваться, причём номер ядра определяется из условия: $z^0 = i^0$. Настройка элементов ядер этого слоя выполняется по правилу:

$$w_{z^0}^0(u_0, v_0) = \phi_{i^0}^k(u_0).$$

Очевидно, должно быть задано взаимно-однозначное соответствие $k \leftrightarrow v_0$ между номером опорной функции k и разрядной переменной v_0 . Эта разрядная переменная принимает значения $0, 1, \dots, g_0 - 1$. Отсюда следует вывод, что число эталонных функций не может быть больше, чем g_0 , а если ещё потребовать выполнения условия ортогональности ядер, то матрица такого преобразования будет содержать только одну произвольную функцию в качестве столбца. Этого явно недостаточно для реализации РСА-классификатора. В следующем разделе будет показана модификация топологии БНС, которая позволяет решить поставленную задачу.

5.2. Самоподобные нейронные сети с дополнительными плоскостями. Дополним топологическую модель быстрого преобразования (1) дополнительными плоскостями нейронных ядер [17], номера которых определим переменной π_m , новая топологическая модель в этом случае будет описываться набором кортежей:

$$U^m = \langle u_{n-1}u_{n-2} \cdots u_{m+1}u_m v_{m-1}v_{m-2} \cdots v_1v_0 \rangle,$$

$$V^m = \langle u_{n-1}u_{n-2} \cdots u_{m+1}v_m v_{m-1}v_{m-2} \cdots v_1v_0 \rangle,$$

$$z^m = \langle u_{n-1}u_{n-2} \cdots u_{m+1}v_{m-1}v_{m-2} \cdots v_1v_0 \rangle,$$

$$\pi_m = \langle v_{n-1}v_{n-2} \cdots v_{m+2}v_{m+1} \rangle.$$

Максимальное количество дополнительных плоскостей появится в нулевом слое. Номер плоскости в нулевом слое будет определяться кортежем $\pi_0 = \langle v_{n-1}v_{n-2} \cdots v_2v_1 \rangle$. Плоскость с номером $\pi_0 = 0$ будем считать плоскостью исходной базовой топологической структуры. Число плоскостей в нулевом слое будет равно произведению оснований: $g_{n-1}g_{n-2} \cdots g_2g_1$. По мере движения к выходному слою число дополнительных плоскостей будет уменьшаться и для последнего слоя $\pi_{n-1} = \langle \rangle$, т.е. их не будет совсем, останется только одна плоскость базовой топологии. Таким образом, в новой топологии плоскость последнего слоя останется прежней, а в младших слоях появятся дополнительные плоскости. Номер ядра теперь следует уточнять его размещением в дополнительной плоскости. На рис. 9 показана новая топология, построенная на базе трёхслойной БНС с основаниями 2.

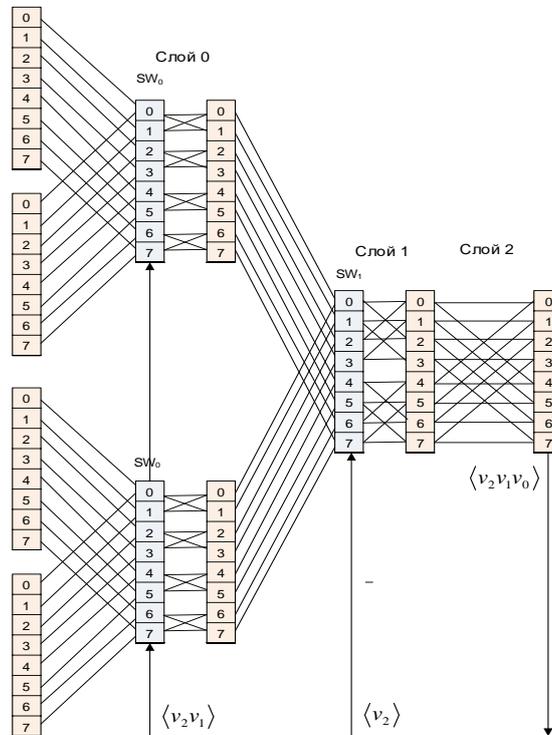


Рис. 9. Топология самоподобной нейронной сети с дополнительными плоскостями

В сети условно показаны коммутаторы (SW), которые служат для пояснения принципа работы сети. Коммутаторы управляются разрядными переменными точек выходной плоскости. Фактически коммутаторов нет, они реализуются в составе алгоритма и не препятствуют параллельной обработке входных данных. В контексте спектрального преобразования точки выходной плоскости точки ассоциируются со спектральными коэффициентами, поэтому привязка спектрального коэффициента к координатам выходной плоскости предопределяет выбор дополнительных плоскостей, которые используются для обработки входных образов. При построении полного спектрального анализатора все векторные входы сети параллельно объединяются.

Поскольку правило порождения новых плоскостей не противоречит базовой топологической модели, то для настройки ядер преобразования к эталону можно использовать прежнее правило (2), расширив его аргументом π_m для дополнительных плоскостей:

$$w_{z^m}^m \langle \pi_m \rangle (u_m, x_m) = \phi_{\pi_m}^k (u_m).$$

здесь k – номер эталонной функции, $x = \langle x_{n-1} x_{n-2} \dots x_0 \rangle$ – точка привязки,

$z^m = \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} x_{m-1} x_{m-2} \dots x_1 x_0 \rangle$ – номер настраиваемых ядер по слоям,

$\pi_m = \langle x_{n-1} x_{n-2} \dots x_{m-1} \rangle$ – номер плоскости размещения ядер.

Индекс k в правой части нумерует точку приспособления. Для $m = 0$ имеем $z^0 = i^0 = \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_1 \rangle$, а варьируемыми переменными в левой части являются номер плоскости $\pi_0 = \langle x_{n-1} x_{n-2} \dots x_1 \rangle$ и разряд x_0 .

Вместе они покрывают весь диапазон координат выходной плоскости. Этому диапазону отвечают возможные значения индекса k в правой части, отсюда следует, что каждая точка выходной плоскости может быть связана с собственной эталонной функцией, т.е. построенная сеть обладает максимально возможным числом точек привязки, покрывающих всю выходную плоскость и, таким образом, может быть использована для реализации произвольного линейного преобразования размерности $N \times M$.

В модели РСА-классификатора для каждого класса сохраняется только часть ортогональных векторов, которые обладают наибольшей значимостью. Размерность выходной плоскости следует выбрать так, чтобы значение M было не меньше, чем общее число всех векторов модели классификатора. Подобным образом можно построить все частные классификаторы комитета. Нейросетевая реализация обеспечивает максимальное распараллеливание вычислительных операций, что позволяет получить высокое быстродействие классификатора на специализированных процессорах.

Заключение. Рассмотренный метод построения коллективных классификаторов отличается от методов bagging и adaboost использованием классификаторов с заданными областями компетенции и способом получения агрегативного решения комитета.

В отличие от метода коллективного распознавания Л.А. Растригина и Р.Х. Эренштейна, области компетенции классификаторов не локализуются расчётным путём, а назначаются, исходя из условия достаточной представительности классов в базовых множествах и областях компетенции. Допустимо также частичное пересечение областей компетенции. Благодаря принципу повторного входа, частные классификаторы идеально обучаются в пределах областей их компетенций. Это позволяет сделать процедуру классификации одноступенчатой, без предварительного определения области компетенции. Предложенный способ агрегации решений частных классификаторов по принципу максимума позволяет наращивать классификатор в процессе функционирования и реализовать принцип непрерывного обучения.

Для построения ортогонального базиса подпространства класса можно использовать также сингулярное разложение матрицы, составленной из векторов обучающей выборки [18]. Эти классификаторы также обучаются по методу повторного входа, причём скорость обучения оказывается несколько выше, чем у РСА-классификаторов. Точность комитета классификаторов данного типа примерно соответствует точности комитета с РСА- классификаторами.

В статье показано, что РСА-классификаторы можно реализовать в классе линейных самоподобных нейронных сетей с дополнительными плоскостями, при этом число реализуемых эталонных функций по сравнению с БНС кардинально возрастает и покрывает все элементы выходной плоскости нейронной сети. Такое расширение топологии не нарушает принципа по-

строения обучающего алгоритма и позволяет строить и обучать РСА- классификаторы с произвольной размерностью модели. Более того, можно показать, что нейросетевые реализации сегментируются в лес независимых пирамидальных сетей [19]. Это порождает уникальное качество – возможность дообучения классификаторов к новым образам без изменения или потери ранее накопленных знаний. Алгоритмы обучения к модельным векторам являются абсолютно устойчивыми и завершаются за конечное число шагов.

Список источников

1. Edelman G. M. Group selection and phasic reentrant signaling: a theory of higher brain function. The mindful brain: cortical organization and the group-selective theory of higher brain function, Eds. Edelman G.M., Mountcastle V.B. Boston, MIT Press, 1978, pp 51–98.
2. Mountcastle V.B. An organizing principle for cerebral function: the unit model and the distributed system. The mindful brain: cortical organization and the group-selective theory of higher brain function, Eds. Edelman G.M., Mountcastle V.B. Boston, MIT Press, 1978, pp. 7-50, ISBN 0-262-05020-X.
3. Edelman G.M. Neural Darwinism: The theory of neuronal group selection. New York, Basic Books, 1987, 240 p.
4. Городецкий В.И. Методы и алгоритмы коллективного распознавания: обзор / В.И. Городецкий, С.В. Серебряков // Труды СПИИРАН. – СПб.: Наука, 2006. – Вып. 3. – т. 1.
5. Терехов С.А. Гениальные комитеты умных машин / С.А. Терехов. Научная сессия МИФИ 2007. IX Всероссийская научно-техническая конференция «НЕЙРОИНФОРМАТИКА–2007»: Лекции по нейроинформатике. Часть 2.– М.: МИФИ, 2007. – С. 11-43.
6. Eric Bauer, Ron Kohavi. An empirical comparison of voting classification algorithms: Bagging, boosting, and variants. Machine learning, 1999, vol. 36, pp. 105–139.
7. Breiman L. Bagging predictors. Department of Statistics University of California Berkeley, California. Technical Report No.421, 1994.
8. Yoav Freund, Robert E. Schapire. A decision-theoretic generalization of online learning and an application to boosting. Second european conference on computational learning theory, 1995, pp 23-37, DOI:10.1007/3-540-59119-2_166.
9. Растринин Л. А. Обучение коллектива решающих правил / Л.А. Растринин, Р.Х. Эренштейн // Адаптивные системы, 1974. – Вып. 4. – С. 8–20.
10. Растринин Л.А. Принятие решений коллективом решающих правил в задачах распознавания образов / Л.А. Растринин, Р.Х. Эренштейн // Автоматика и телемеханика, 1975. – №. 9.– С. 133–144.
11. Растринин Л.А., Метод коллективного распознавания / Л.А. Растринин, Р.Х. Эренштейн – Москва: Энергоиздат, 1981.
12. Лагутин М.В. Наглядная математическая статистика. Учебное пособие / М.В. Лагутин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 472с.
13. THE MNIST DATABASE of handwritten digits. Available at: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>
14. Adam Beyerly, Tatiana Kalganova, Ian Dear No routing needed between capsules. ArXiv:2001.09136, DOI:10.48550/arXiv.2001.09136.
15. Дорогов А.Ю. Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 1. Стратифицированные модели самоподобных нейронных сетей и быстрых преобразований / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 4(32). – С. 5-20. – DOI:10.25729/ESI.2023.32.4.001.
16. Дорогов А.Ю. Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 2. Методы обучения быстрых нейронных сетей / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 1(33). – С.5-19. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.001.
17. Дорогов А.Ю. Быстрые нейронные сети глубокого обучения / А.Ю. Дорогов. III Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (CTS'2019). Сборник докладов. Санкт-Петербург. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. – С. 275-280.
18. Воеводин В.В. Матрицы и вычисления / В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов // М.: Наука, 1984. – 320с.
19. Дорогов А.Ю. Пластичность самоподобных нейронных сетей / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 3(35). – С. 33–43. – DOI:10.25729/ESI.2024.35.3.003.

Дорогов Александр Юрьевич. Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматики и процессов управления» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ) «ЛЭТИ», главный научный сотрудник ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии». Основные направления исследований автора связаны с интеллектуальным анализом данных, цифровой об-

работкой сигналов, проектированием быстрых преобразований и нейронных сетей быстрого обучения, разработкой аналитических платформ, моделированием радио-телекоммуникационных систем. AuthorID: 17611, SPIN: 8645-5873, ORCID: 0000-0002-7596-6761, vaksa2006@yandex.ru, г. Санкт-Петербург, ул. Попова, 5.

UDC 004.93'12:004.032.26

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.001

Collective re-entry classifiers and their implementation in a class of self-similar neural networks

Alexander Yu. Dorogov

St. Petersburg State Electrotechnical University

PJSC "Information Telecommunication Technologies" ("Inteltech"),

Russia, St. Petersburg, vaksa2006@yandex.ru

Abstract. The article proposes a new method for teaching private classifiers, as well as a way to aggregate their forecasts as part of a committee. The training is based on the hypothesis of iterative re-entry of biological neural networks and uses the principal component method for its implementation. For private classifiers, the areas of competence are defined in the aggregate covering the training set of examples. It is shown that the iterative learning process converges in several steps, ensuring 100% recognition accuracy in the area of competence of the private classifier. The aggregation of forecasts is implemented according to the principle of maximum projection of the image onto its own subspaces of classes of private classifiers. Examples of the use of the committee of competent classifiers for the MNIST dataset are given. A continuous learning model of the classifier committee is proposed that is suitable for building self-learning recognition systems. The neural network implementation of classifiers in the class of self-similar neural networks is considered.

Keywords: private classifier, committee of classifiers, collective recognition, area of competence, re-entry, continuous learning, self-similar neural network

References

1. Edelman G. M. Group selection and phasic reentrant signaling: a theory of higher brain function. The mindful brain: cortical organization and the group-selective theory of higher brain function, Eds. Edelman G.M., Mountcastle V.B. Boston, MIT Press, 1978, pp 51–98.
2. Mountcastle V.B. An organizing principle for cerebral function: the unit model and the distributed system. The mindful brain: cortical organization and the group-selective theory of higher brain function, Eds. Edelman G.M., Mountcastle V.B. Boston, MIT Press, 1978, pp. 7-50, ISBN 0-262-05020-X.
3. Edelman G.M. Neural Darwinism: The theory of neuronal group selection. New York, Basic Books, 1987, 240 p.
4. Gorodeckij V.I., Serebrjakov S.V. Metody i algoritmy kollektivnogo raspoznaniya: obzor [Methods and algorithms of collective recognition: an overview]. Trudy SPIIRAN [Proceedings of SPIIRAN], 2006, no. 3, vol.
5. Terekhov S.A. Genial'nyye komitety umnykh mashin [Brilliant committees of smart machines]. Nauchnaya sessiya MIFI 2007. IX Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «NEYROINFORMATIKA–2007», Lektsii po neyroinformatik [Scientific session of MEPhI 2007. IX All-Russian Scientific and Technical Conference "NEUROINFORMATICS–2007": Lectures on neuroinformatics], 2008, part 2, Moscow, MIFI, pp. 11–43.
6. Eric Bauer, Ron Kohavi An empirical comparison of voting classification algorithms: Bagging, boosting, and variants. Machine learning, 1999, vol. 36, pp. 105–139.
7. Breiman L. Bagging predictors. Department of Statistics University of California Berkeley, California. Technical Report No. 421, 1994.
8. Yoav Freund, Robert E. Schapire A decision-theoretic generalization of online learning and an application to boosting. Second european conference on computational learning theory, 1995, pp 23-37, DOI:10.1007/3-540-59119-2_166.
9. Rastrigin L. A., Erenshiteyn R. Kh. Obucheniye kollektiva reshayushchikh pravil [Teaching a team of crucial rules]. Adaptivnyye sistemy [Adaptive systems], 1974, no. 4, c. 8–20.

10. Rastrigin L.A., Erenshteyn R.Kh. Prinyatiye resheniy kollektivom reshayushchikh pravil v zadachakh raspoznaniya obrazov [Decision-making by a team of decisive rules in image recognition tasks]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], 1975, no.9, pp. 133–144.
11. Rastrigin L.A., Erenshteyn R.Kh. Metod kollektivnogo raspoznaniya [The method of collective recognition]. Moskva, Energoizdat [Moscow, Energoizdat], 1981.
12. Lagutin M.V. Naglyadnaya matematicheskaya statistika [Visual mathematical statistics]. M., BINOM. Laboratoriya znaniy [Moscow, BINOM. Laboratory of knowledge], 2007, 472 p.
13. THE MNIST DATABASE of handwritten digits. Available at: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>
14. Adam Byerly, Tatiana Kalganova, Ian Dear No routing needed between capsules. ArXiv:2001.09136, DOI:10.48550/arXiv.2001.09136.
15. Dorogov A.Yu. Bystrye preobrazovaniya i samopodobnye neyronnye seti glubokogo obucheniya. Chast' 1. Stratifitsirovannyye modeli samopodobnykh neyronnykh setey i bystrykh preobrazovaniy [Fast transformations and self-similar deep learning neural networks. Part 1. Stratified models of self-similar neural networks and fast transformations]. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 4(32), pp.5-20, DOI:10.25729/ESI.2023.32.4.001.
16. Dorogov A.Yu. Bystrye preobrazovaniya i samopodobnye neyronnye seti glubokogo obucheniya. Chast' 2. Metody obucheniya bystrykh neyronnykh setey [Fast transformations and self-similar neural networks of deep learning. Part 2. Methods of training fast neural networks]. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 1(33), pp. 5-19. DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.001.
17. Dorogov A.Yu. Bystrye neyronnye seti glubokogo obucheniya [Fast deep learning neural networks]. III Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh (STS'2019). Sbornik dokladov. Sankt-Peterburg. SPb.: SPbGETU "LETI" [Proceedings of 2019 3rd international conference on control in technical systems [CTS 2019. Saint Petersburg, LETI], 2019, pp. 275-280.
18. Voevodin V.V., Kuznetsov Yu.A. Matritsy i vychisleniya [Matrices and calculations]. M., Nauka [Moscow, Science], 1984, p.320.
19. Dorogov A.Yu. Bystrye preobrazovaniya i samopodobnye neyronnye seti glubokogo obucheniya Chast' 3. Piramidal'nye neyronnye seti s glubokoy stepen'yu obucheniya [Fast transformations and self-similar deep learning neural networks Part 3. Pyramid neural networks with a deep learning degree]. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 3(35), pp. 33–43, DOI:10.25729/ESI.2024.35.3.003.

Dorogov Alexander Yurievich. Doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of automation and control Processes of St. Petersburg state electrotechnical university (SPbETU) "LETI", Chief researcher of PJSC "Information telecommunication technologies". The main directions of the author's research are related to data mining, digital signal processing, the design of fast transformations and neural networks of fast learning, the development of analytical platforms, modeling of radio and telecommunications systems. AuthorID: 17611, SPIN: 8645-5873, ORCID: 0000-0002-7596-6761, vaksa2006@yandex.ru, St. Petersburg, st. Popova, 5.

Статья поступила в редакцию 12.05.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 05/12/2024; approved after reviewing 11/21/2024; accepted for publication 12/17/2024.

УДК 004.855.5

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.002

Применение моделей математического программирования для решения проблемы XOR

Чернавин Павел Федорович, Чернавин Николай Павлович, Чернавин Федор Павлович

Уральский федеральный университет,

Россия, Екатеринбург, *p.f.chernavin@urfu.ru*

Аннотация. Проблема XOR является классической проблемой машинного обучения. Большинство методов машинного обучения при решении проблемы XOR дает неудовлетворительные результаты. Попытки улучшения метрик качества решающих правил за счет перехода от линейных разделителей к полиномиальным или увеличения глубины и числа деревьев ухудшает интерпретируемость решения и может приводить к переобучению. Поэтому данную проблему обычно решают нейронными сетями с использованием метода обратного распространения ошибки. В настоящий момент времени актуален поиск альтернатив нейросетевому подходу к решению задач классификации и методу обратного распространения ошибки для обучения нейронных сетей. Такой альтернативой могут быть комитетные конструкции в виде задач математического программирования. Эффективность их применения во многом зависит от структуры исходных данных. Классические комитеты единогласия, большинства и старшинства позволяют достичь высоких метрик качества решающего правила только при относительно простой структуре данных, но при ряде структур они не эффективны. Возникает закономерный вопрос о существовании комитетов с принципиально другой логикой, но соответствующей определенной структуре данных, которая заранее не известна и ее надо определить. Вопрос существования новых комитетных конструкций является отдельной научной проблемой. Предлагается дополнить множество комитетных конструкций XOR-комитетом. В статье приводится его логика, геометрическая интерпретация, математическая модель, сравнение с метриками качества решения другими методами машинного обучения. Сведение задач классификации к четко формализованным комитетным конструкциям в виде задач математического программирования предоставляет дополнительные возможности по управлению качеством решающего правила в процессе его построения, а не постфактум, как это происходит при использовании программ из стандартных библиотек для решения задач машинного обучения.

Ключевые слова: машинное обучение, проблема XOR, математическое программирование, классификация, комитетные конструкции

Цитирование: Чернавин П.Ф. Применение моделей математического программирования для решения проблемы XOR / П.Ф. Чернавин, Н.П. Чернавин, Ф.П. Чернавин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 17-25. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.002.

Введение. Проблема XOR (exclusive OR, исключаящее ИЛИ) – одна из наиболее важных классических проблем в области машинного обучения (МО). Поэтому ее решению различными способами посвящено большое количество исследований. Впервые эту проблему сформулировал создатель персептрона Фрэнк Розенблатт в 1961 году [1]. Наиболее просто данная проблема воспринимается, когда она сформулирована в геометрическом виде (рисунок 1). Пусть имеется всего 4 точки: две синих и две красных. Необходимо отделить синие точки от красных одной прямой.

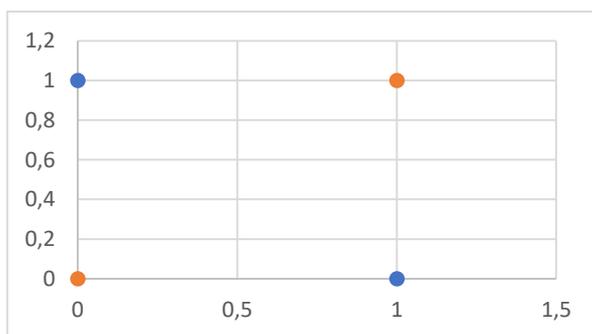


Рис.1. Общая геометрическая постановка проблемы XOR

Суть проблемы состоит в следующем. На рисунке 1 множество красных точек одной линией (в общем случае гиперплоскостью) нельзя отделить от синих точек. То есть два множества линейно неразделимы. Несмотря на кажущуюся простоту задачи, многие специалисты по искусственному интеллекту (ИИ) посвятили ей свои исследования [2-13] и их разработки, с одной стороны, способствовали развитию методов машинного обучения (МО), но и приводили к так называемой «зиме ИИ» [2, 5]. Конечно, на практике все выглядит несколько сложнее и каждую точку надо воспринимать, как некоторое подмножество генеральной выборки. Обычно рассматриваются две ситуации. Назовем их простая (рисунок 2) и сложная (рисунок 3).

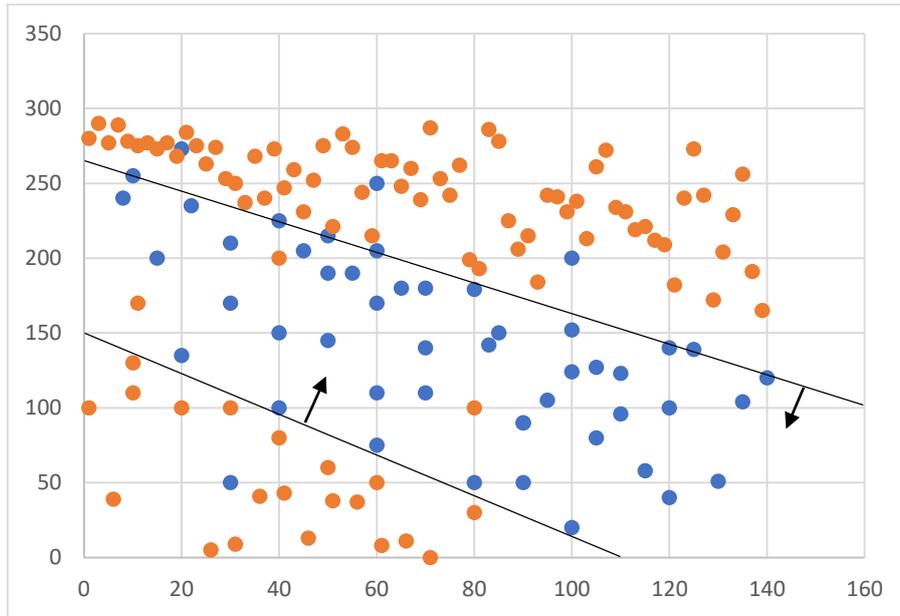


Рис. 2. Множества с простой структурой

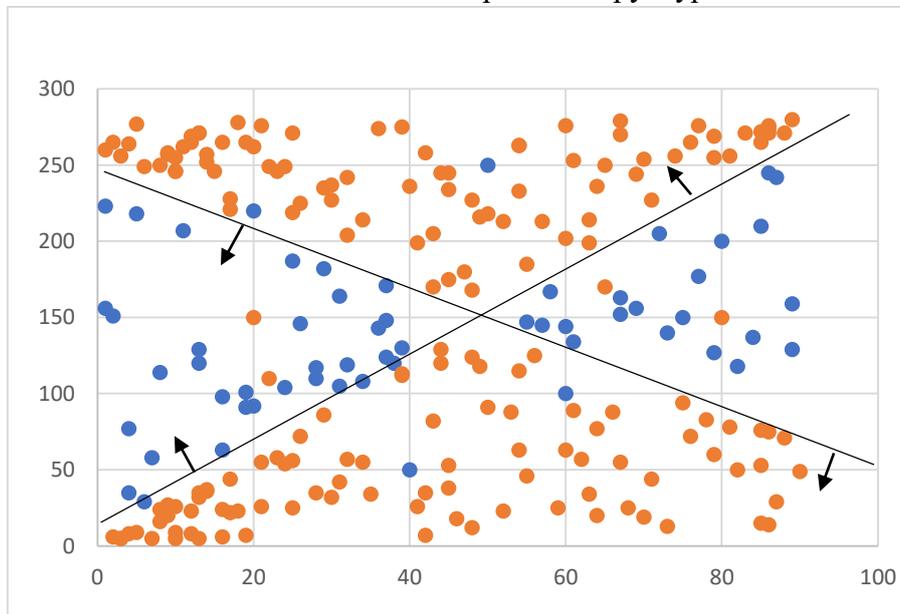


Рис. 3. Множества со сложной структурой

При описании проблемы XOR обычно используется следующая схема: объясняется суть проблемы, показывается неэффективность использования ряда методов МО (логистическая регрессия, метод опорных векторов с полиномиальным ядром, случайный лес деревьев и т.п.), далее говорится, что задача решается достаточно простой нейросетью (НС) и поясняется, как

это делается методом обратного распространения ошибки. Конечно, метод обратного распространения ошибки в настоящий момент является лидером среди методов обучения НС, но, как всякий метод, он имеет ряд существенных недостатков. Поэтому даже пионер в области Deep Learning Джеффри Хинтон считает, что надо заниматься поиском альтернатив, и предлагает свой новый метод Forward-Forward [6].

Альтернативным подходом к решению проблемы XOR может быть применение метода комитетов. Комитетный подход к решению задач классификации был предложен Аблоу С.М. в 1965 году [7, 8]. Большой вклад в развитие данного метода за рубежом был сделан в работах Осборна М. Л [9] и Такиямы Р. А. [10]. В нашей стране наиболее полное развитие метод комитетов получил в научных школах распознавания образов Мазурова В. Д. [11, 12] и Журавлева С. Ю. [13]. Различные комитетные конструкции могут быть представлены в виде задач математического программирования (МП) [14] и решаться с помощью стандартных пакетов для решения таких задач, например, IBM ILOC CPLEX. Данный пакет позволяет за приемлемое время решать задачи МП большой размерности. Сведение процесса построения комитетных конструкций к задачам МП предоставляет дополнительные возможности по управлению качеством решающего правила (РП) в процессе его построения, а не постфактум, как это происходит при использовании программ из стандартных библиотек МО [15].

Традиционно рассматриваются комитеты с логикой единогласия, большинства и старшинства. В статьях Такиямы Р.А. [10] приводится модель комитета с произвольной логикой, но эта модель в конечном итоге сводится только к комитетам единогласия и большинства (КБ). Отметим, что комитет единогласия (КЕ) существует не всегда, но имеет наиболее простую структуру. В работах Мазурова В.Д. [11] доказано, что комитет большинства существует всегда. Так как комитет старшинства (КС) можно построить итерационным способом с отсечением хотя бы одного из элементов множества точек классов на каждой итерации, то он тоже существует всегда. Одним из достоинств комитетных конструкций является то, что каждая из них имеет четкие геометрические интерпретации. Поэтому при использовании метода комитетов можно не только получить решающее правило (РП), но и понять структуру данных, что достаточно важно при решении практических задач. Модели классических комитетных конструкций в виде задач МП и их графические интерпретации приведены в [14], причем каждая из них наиболее эффективна по числу членов комитета и метрикам качества РП только при определенной структуре данных. Например, при структуре, соответствующей рисунку 3, все классические комитеты дадут достаточно посредственный результат. Поэтому возникает закономерный вопрос о существовании комитетов с принципиально другой логикой, позволяющей при минимальном числе членов комитета добиться высоких метрик качества РП. Вопрос существования таких комитетных конструкций является отдельной научной проблемой. Один из вариантов ее решения предлагается в данной статье.

Для решения проблемы XOR с простой структурой данных лучше всего использовать итерационный КС или КЕ [14]. На рисунках 2 и 3 направления голосования (градиенты функций) членов комитета показаны черными стрелками. На рисунке 2 видно, что структура множеств позволяет решить задачу классическими КЕ или КС. При структуре множеств, как на рисунке 3, классический КЕ невозможен, а КБ и КС будут избыточно сложными и не дадут хорошего качества РП. Поэтому необходимо использовать отдельную комитетную конструкцию со следующей логикой:

1. Для элементов одного из множеств все члены комитета единогласно голосуют либо за, либо против. Это множество далее будем обозначать как J_1 .
2. Для элементов другого множества мнение хотя бы одного из членов комитета не совпадает с мнением остальных. Это множество далее будем обозначать как J_2 .

Следует отметить, что при такой логике комитет единогласия является частным случаем XOR-комитета. При построении новой комитетной конструкции сразу следует учитывать, что в практических задачах построение любых комитетов без погрешности встречается довольно редко и скорее всего свидетельствует о переобучении модели. Естественно, что количество невыполнений условий комитета должно быть минимизировано. Новую комитетную конструкцию назовем XOR-комитет и приведем ее математическую модель. Так как любое наблюдение можно представить, как точку в пространстве входных признаков, то в дальнейшем слова “наблюдение” и “точка множества” будем использовать как слова-синонимы.

1. Математическая модель XOR-комитета

Далее будем использовать следующую систему обозначений:

J_1 и J_2 – разделяемые множества;

J – множество наблюдений (точек) $J = J_1 \cup J_2$;

$M1$ – мощность множества1 (количество наблюдений, точек);

$M2$ – мощность множества2 (количество наблюдений, точек) ;

I – множество параметров наблюдений;

H – множество гиперплоскостей (членов комитета, нейронов);

j, i, h – индексы соответствующих множеств;

P_{ij} – входные признаки наблюдений (константы);

L – очень большое число;

E – малое число, используемое для строгости ограничений;

K – количество гиперплоскостей (членов комитета, нейронов) ;

a_i^h – коэффициенты гиперплоскостей (переменные);

b^h – свободные члены гиперплоскостей (переменные);

v_j^h, w_j^h – расстояние от j - ой точки до h -ой гиперплоскости (переменные);

z_j^h – булевы переменные, для фиксации расположения j -ой точки относительно h -ой гиперплоскости;

y_j – булева переменная ($y=0$ – все члены голосуют за, $y=1$ – все члены голосуют против);

d_j – переменные для коррекции нижних границ комитетной конструкции;

g_j – переменные для коррекции верхних границ комитетной конструкции.

Условия разграничения множеств гиперплоскостями могут быть записаны следующим образом:

$$\sum_{i \in I} P_{ij} * a_i^h + b^h + v_j^h - w_j^h = 0 \quad h \in H, j \in J \quad (1)$$

$$0 \leq v_j^h \leq L * z_j^h \quad h \in H, j \in J \quad (2)$$

$$0 \leq w_j^h \leq L * (1 - z_j^h) \quad h \in H, j \in J \quad (3)$$

Условия (2), (3) запрещают переменным v_j^h, w_j^h одновременно быть больше нуля.

Условия для XOR-комитета, с возможностью их корректировки, могут быть записаны следующим образом:

$$\sum_{h \in H} z_j^h = K * y_j - d_j + g_j \quad j \in J_1 \quad (4)$$

$$d_j \leq K \quad j \in J_1 \quad (5)$$

$$g_j \leq K \quad j \in J_1 \quad (6)$$

$$1 - d_j \leq \sum_{h \in H} z_j^h \leq K - 1 + g_j \quad j \in J_2 \quad (7)$$

$$d_j \leq 1 \quad j \in J_2 \quad (8)$$

$$g_j \leq 1 \quad j \in J_2 \quad (9)$$

Следует отметить, что чисто теоретически без разницы, какое из множеств считать за J_1 , а другое за J_2 . На рисунке 2 видно, что для смены множеств местами (в модели) достаточно развернуть градиент одной из гиперплоскостей.

Для корректности систему ограничений для одного из множеств (например, J_1) необходимо дополнить следующими ограничениями:

$$v_j^h + w_j^h \geq E \quad h \in H, j \in J_1 \quad (10)$$

Это ограничение будет запрещать точкам одного из множеств попадать на гиперплоскости.

$$\text{Целевая функция: } \min \sum_{j \in J} (d_j + g_j) \quad (11)$$

При использовании целевой функции (11) будет максимизироваться метрика Accuracy (Аккуратность). Данная метрика качества РП хорошо воспринимается практическими специалистами и хорошо работает при сбалансированных классах. В случае сильной несбалансированности классов лучше использовать метрику AUC ROC (площадь под ROC кривой). В этом случае целевая функция будет:

$$\min \quad M2 * \sum_{j \in J_1} (d_j + g_j) + M1 * \sum_{j \in J_2} (d_j + g_j) \quad (12)$$

Подробное описание метрик Accuracy и AUC ROC, а также обоснование, что критерии (11), (12) им соответствуют, приведены в [14]. Дополнительные возможности по управлению качеством РП приведены в [15]. На основе данной модели написаны программы в кодах IBM ILOG CPLEX и на языке Python с использованием пакета MIP (Mixed Integer Programming). Программа на Python зарегистрирована в Федеральном институте промышленной собственности [16].

2. Апробирование XOR-комитета на условных примерах. Для условных примеров были использованы данные, приведенные на рисунках 2 и 3. В таблицах 1 и 2 приведены метрики качества РП, полученные классическими методами МО и различных комитетных конструкций.

Таблица 1. Результаты метрик методов МО при простой структуре множеств

Название метода	Accuracy	AUC ROC
Линейное разделение	0.586	0.543
Опорных векторов	0.621	0.591
Логистическая регрессия	0.586	0.484
Ближайших соседей	0.897	0.874
Наивный байес	0.621	0.568
Дерево решений	0.828	0.797
Нейронная сеть из двух нейронов	0.790	0.754
Нейронная сеть из трех нейронов	0.923	0.945
Комитет единогласия из двух членов	0.881	0.885
Комитет единогласия из трех членов	0.881	0.885
Комитет большинства из трех членов	0.706	0.755
Комитет старшинства из двух членов	0.748	0.755
Комитет старшинства из трех членов	0.741	0.759
XOR - комитет из двух членов	0.86	0.836
XOR - комитет из трех членов	0.839	0.834

При простой структуре множеств метрики качества решения комитета единогласия из двух членов лучше метрик нейронной сети из двух нейронов в 1 скрытом слое (активатор ReLU). При трех нейронах метрики нейронной сети становятся лучше метрик комитетов единогласия. XOR-комитет показал результаты, сопоставимые с комитетом единогласия, но несколько хуже. Значит, комитет единогласия наиболее подходит для описания структуры множества синих точек на рисунке 2, так как дает наиболее простое и хорошо интерпретируемое решение.

При сложной структуре множеств наилучшие метрики качества показывает XOR-комитет из двух членов. Нейронная сеть сопоставимые результаты показала только при архитектуре в 2 скрытых слоя (в первом слое 4 нейрона, во втором слое 2 нейрона). Все остальные методы имеют метрики качества значительно хуже.

Таблица 2. Результаты метрик методов МО при сложной структуре множеств

Название метода	Accuracy	AUC ROC
Линейное разделение	0.521	0.41
Опорных векторов	0.479	0.391
Логистическая регрессия	0.396	0.354
Ближайших соседей	0.833	0.796
Наивный байес	0.708	0.362
Дерево решений	0.771	0.834
Нейронная сеть из двух нейронов	0.848	0.911
Нейронная сеть 2 скрытых слоя 6 нейронов	0.954	0.923
Комитет единогласия из двух членов	0.852	0.867
Комитет единогласия из трех членов	0.801	0.827
Комитет большинства из трех членов	0.519	0.64
Комитет старшинства из двух членов	0.464	0.639
Комитет старшинства из трех членов	0.561	0.755
XOR - комитет из двух членов	0.966	0.954
XOR - комитет из трех членов	0.966	0.954

В реальных задачах классификации, в том числе и в проблеме XOR, данные редко имеют простую и линейно разделимую структуру. Сложные структуры данных могут быть вызваны различными факторами: наличием выбросов, смешанными признаками классов, значительными нелинейностями в пространстве признаков, а также самой природой закономерностей в данных. В таких случаях традиционные методы машинного обучения, включая линейные модели, логистическую регрессию, деревья решений и методы опорных векторов, часто демонстрируют недостаточную точность и обобщающую способность.

XOR-комитеты представляют собой один из подходов, способный обеспечить как высокую точность, так и интерпретируемость модели, что делает их полезным инструментом для работы с реальными, сложными данными. Заметим, что по сравнению с нейронной сетью используется более простая архитектура – множество было разделено с аналогичным качеством с использованием 2 гиперплоскостей, что значительно проще для анализа данных, тогда как нейронная сеть потребовала 2 слоя и 6 нейронов, что затрудняет интерпретацию решения.

В задачах, где важна интерпретируемость решений (например, в медицине или финансовом секторе), возможность визуального анализа структуры множества данных и их классификации имеет ключевое значение. XOR-комитеты позволяют построить четкую геометрическую модель, где можно наглядно увидеть влияние каждой гиперплоскости на итоговое решение, что, в свою очередь, помогает лучше понять структуру данных и механизмы классификации. В целом XOR-комитеты могут выступать как альтернативный способ решения задачи классификации и представляют практический интерес для применения в реальных задачах.

Заключение. В данной статье приведена комитетная конструкция с логикой, существенно отличающейся от классических логик единогласия, большинства и старшинства. Естественно, что любой человек не может видеть картину расположения данных в пространствах более трех, но понять их структуру по аналогии с двухмерным пространством возможно

на основе методов МО и, особенно, комитетных конструкций. Поэтому при решении конкретной задачи надо применять все доступные методы машинного обучения и сравнивать метрики качества РП, полученных на их основе. При этом надо понимать, что качество решения не сводится только к классическим метрикам Accuracy, Precision, AUC ROC т.п [15]. Обязательно надо учитывать сложность РП и интерпретируемость. Конечно, переход от линейных разделителей к полиномиальным может дать улучшение метрик качества, но увеличит ли это интерпретируемость РП? Аналогично, использование случайного леса с большим количеством деревьев обычно улучшает результат прогноза, но делает его не интерпретируемым. Все эти вопросы наиболее остро встают при сложной структуре исходных данных, поэтому поиск новых методов решения проблемы XOR остается актуальной задачей.

Список источников

1. Frank Rosenblatt Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms. Spartan books, 1962, p. 616.
2. Минский М. Перцептроны / М. Минский, С. Пейпер. – М.: Мир, 1971. – 262 с.
3. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning internal representations by error propagation. In: Parallel distributed processing, Cambridge, MA, MIT Press, 1986, vol. 1, pp. 318–362.
4. Блюм А. Обучение трехузловой нейронной сети является NP-полным. / А. Блюм, Р. Ривест // Нейронные сети, 1992. – № 5. – С. 117-127
5. Ахире Д.Б. Демистификация проблемы XOR. – URL: <https://dev.to/jbahire/demystifying-the-problem-1blk> (дата обращения: 24.02.24).
6. Jeffrey H. The forward-forward algorithm: some preliminary studies. Available at: <https://arxiv.org/abs/2212.13345>, (accessed: 02/24/24)
7. Ablow C.M., Kaylor D.J. A Committee solution of the pattern recognition problem. IEEE transactions on information theory IT-11, 1965, vol. 3, pp. 453-455.
8. Ablow C.M. & Kaylor D.J. Inconsistent homogeneous linear inequalities. Bulletin of the American mathematical society, 1965, vol. 71. no. 5, p. 724.
9. Osborne M.L. The seniority logic: a logic for a committee machine. IEEE trans. on comp, 1977, vol. C-26, no.12, pp. 1302–1306.
10. Takiyama R.A. General method for training the committee machine. Pattern recognition, 1978, vol. 10, no. 4, pp. 255–259.
11. Мазуров В.Д. Комитеты системы линейных неравенств / В.Д. Мазуров, М.Ю. Хачай // Автоматика и телемеханика, 2004. – №2. – С. 43–54.
12. Мазуров В.Д. Экзистенциальные вопросы комитетных конструкций / В.Д. Мазуров // Часть II. Вестник Южно-Уральского государственного университета, 2019. – Т.19. – №1. – С. 114–120.
13. Журавлев Ю.И. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю.И. Журавлев, В.В. Рязанов, О.В. Сенько. – М.: Фазис, 2005. – 159 с.
14. Машинное обучение на основе задач математического программирования // Чернавин П.Ф., Гайнанов Д.Н., Панкращенко В.Н. и др. – М.: Наука, 2021. – 128 с.
15. 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 .
16. Чернавин П.Ф. Комитет линейных разделителей для данных со структурой XOR. Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС). №2024618484 от 12.04.2024

Чернавин Павел Федорович. к.э.н., Уральский федеральный университет, доцент кафедры Аналитика больших данных и методы видеоанализа. 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. Уральский федеральный университет, ассистент кафедры Аналитика больших данных и методы видеоанализа. 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., Уральский федеральный университет, доцент кафедры Моделирование управляемых систем, 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.2024.36.4.002

Using mathematical programming models to solve XOR problems

Pavel F. Chernavin, Nikolai P. Chernavin, Fedor P. Chernavin

Ural federal university,

Russia, Yekaterinburg, *p.f.chernavin@urfu.ru*

Abstract. The XOR problem is a classic problem in machine learning. Most machine learning methods yield unsatisfactory results when addressing the XOR problem. Attempts to improve the quality metrics of decision rules by transitioning from linear separators to polynomial ones, or by increasing the depth and number of trees, reduce the interpretability of the solution and can lead to overfitting. Therefore, this problem is usually solved using neural networks with the backpropagation method. Currently, there is a significant interest in finding alternatives to the neural network approach for solving classification tasks and the backpropagation method for training neural networks. This article proposes solving the XOR problem based on committee constructions in the form of mathematical programming tasks. Their effectiveness largely depends on the structure of the original data, which can only be understood in the process of solving the problem. Classical committees of unanimity, majority, and seniority only achieve high-quality metrics of the decision rule when the data structure is relatively simple. Therefore, it is proposed to augment the set of committee constructions with an XOR committee. The article presents its geometric interpretation, mathematical model, program listing in IBM ILOG CPLEX package codes, and a comparison with the quality metrics of solutions by other machine learning methods. Translating the process of building committee constructions into mathematical programming tasks provides additional opportunities for controlling the quality of the decision rule during its construction, rather than post facto, as occurs when using programs from standard libraries for machine learning tasks.

Keywords: machine learning, XOR problem, mathematical programming, classification, committee constructions

References

1. Frank Rosenblatt Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms. Spartan books, 1962, p. 616.
2. Minsky M. Paper S. Perseptron [Perceptrons]. M.: Mir, 1971. 262 p.
3. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning internal representations by error propagation. In: Parallel distributed processing, Cambridge, MA, MIT Press, 1986, vol. 1, pp. 318–362.
4. Blum A., Rivest R. Obucheniye trekhuzlovoy neyronnoy seti yavlyayetsya NP-polnym [Training a three-node neural network is NP-complete]. Neyronnyye seti [Neural networks], 1992, no. 5, p. 117-127.
5. Ahire D.B. Demystifying the XOR problem. Available at: <https://dev.to/jbahire/demystifying-the-problem-1blk>, (accessed: 02/24/24).
6. Jeffrey H. The forward-forward algorithm: some preliminary studies. Available at: <https://arxiv.org/abs/2212.13345> (accessed: 02/24/24)
7. Ablow C.M., Kaylor D.J. A Committee solution of the pattern recognition problem. IEEE transactions on information theory IT-11, 1965, vol. 3, pp. 453-455.
8. Ablow C.M. & Kaylor D.J. Inconsistent homogeneous linear inequalities. Bulletin of the American mathematical society, 1965, vol. 71. no. 5, p. 724.
9. Osborne M.L. The seniority logic: a logic for a committee machine. IEEE trans. on comp, 1977, vol. C-26, no.12, pp. 1302–1306.
10. Takiyama R.A. General method for training the committee machine. Pattern recognition, 1978, vol. 10, no. 4, pp. 255–259.
11. Mazurov V.D., Khachai M.Yu. Komitety sistemy lineynykh neravenstv [Committees of the system of linear inequalities]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemekhanika], 2004, no.2, pp. 43–54.
12. Mazurov V.D. Ekzistencial'nye voprosy komitetnykh konstrukcij [Existential questions of committee constructions]. Chast' II. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta [Part II. Bulletin of the South Ural state university], 2019, v.19, no.1, pp. 114–120.
13. Zhuravlev Yu.I., Ryazanov V.V., Senko O.V. Raspoznavaniye. Matematicheskiye metody. Programmaya sistema. Prakticheskiye primeneniya [Recognition. Mathematical methods. Software system. Practical applications]. M., Phase, 2005, 159 p.

14. 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, 2021, 128 p.
15. Chernavin P.F., Chernavin N.P., Chernavin F.P. Optimizatsionnyye modeli podbora parametrov tekhnologicheskikh protsessov na osnove rezul'tatov mashinnogo obucheniya [Optimization models for selecting technological process parameters for based on machine learning results]. Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 2(30), pp. 45–56.
16. Chernavin P.F. Komitet lineynykh razdeliteley dlya dannykh so strukturoy XOR [Line separator committee for data with XOR structure]. Federal'nyy institut promyshlennoy sobstvennosti (FIPS) [Federal Institute of Industrial Property (FIPS)]. No. 2024618484 dated 04/12/2024

Chernavin Pavel Fedorovich. Ph.D., Ural federal university, associate professor of the department of Big Data analytics and video analysis methods. 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. Ural federal university, assistant of the department of Big Data analytics and video analysis methods. 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., Ural federal university, associate professor of the department of Big Data analytics and video analysis methods. 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 13.03.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 03/13/2024; approved after reviewing 11/08/2024; accepted for publication 12/17/2024.

УДК 658.5, 004.932

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.003

Метод согласования систем координат компонентов в РТК на основе машинного зрения

Холопов Владимир Анатольевич, Макаров Максим Алексеевич, Благовещенский Иван Германович

МИРЭА – Российский технологический университет,
Россия, Москва, *MakMak95@yandex.ru*

Аннотация. В статье предложен метод согласования систем координат в роботизированных технологических комплексах (РТК) с использованием машинного зрения и модели глубокого обучения, без применения специальных калибровочных объектов. Метод основан на калибровке "eye-to-hand" («глаз-к-руке») и использовании модели YOLOv5 для обнаружения и классификации объектов в рабочей зоне робота. Предложенный подход позволяет автоматически преобразовывать координаты объектов из системы координат камеры в системы координат робота и других компонентов РТК, обеспечивая точное взаимодействие между ними. Результаты моделирования подтвердили эффективность метода и его пригодность для промышленных задач. Метод обеспечивает сокращение времени переналадки и повышение гибкости РТК, что особенно важно в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства.

Ключевые слова: роботизированный технологический комплекс, РТК, машинное зрение, глубокое обучение, калибровка «eye-to-hand», автоматизация, многономенклатурное мелкосерийное производство

Цитирование: Холопов В.А. Метод согласования систем координат компонентов в РТК на основе машинного зрения / В.А. Холопов, М.А. Макаров, И.Г. Благовещенский // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 26-36. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.003.

Введение. В условиях современной автоматизации производства растут требования к гибкости и адаптивности производственных систем. Роботизированные технологические комплексы (РТК) становятся ключевыми элементами для достижения высокой производительности и качества продукции. Такие комплексы представляют собой интегрированные системы, состоящие из промышленных роботов, конвейеров, станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и других автоматизированных устройств. РТК позволяют повысить эффективность производства за счёт автоматизации и оптимизации технологических процессов, что особенно важно в конкурентных рыночных условиях.

В стремлении увеличить гибкость производства и быстро адаптироваться к изменяющимся потребностям рынка, в многономенклатурном мелкосерийном производстве всё более востребованными становятся реконфигурируемые РТК. Такие комплексы позволяют изменять положение или конфигурацию компонентов для адаптации к новым производственным задачам. Например, могут использоваться мобильные столы, которые перемещаются в пределах рабочей зоны робота. Мобильные столы могут менять своё местоположение, добавляться или убираться в зависимости от текущих потребностей, изменяя конфигурацию РТК. Это повышает гибкость системы и позволяет оперативно реагировать на изменения в номенклатуре продукции или объёмах производства.

Внедрение реконфигурируемых РТК сопровождается новыми техническими сложностями, связанными с частыми переналадками системы. Использование подвижных элементов РТК вызывает необходимость регулярного обновления данных при каждой реконфигурации, включая задачи по согласованию систем координат, определению новых траекторий для роботов-манипуляторов, синхронизации действий между различными компонентами и адаптации программного обеспечения. Каждое изменение конфигурации увеличивает время, затрачиваемое на переналадку, и может приводить к неточностям в позиционировании или сбоям в

работе системы, что снижает общую эффективность производства. Согласование систем координат компонентов комплекса является одной из наиболее критичных и трудоёмких задач в процессе переналадки, от результатов которого зависит дальнейшая точность работы всего РТК.

1. Анализ существующих методов согласования систем координат в РТК. В научной литературе представлено множество методов, направленных на решение проблемы согласования систем координат в роботизированных технологических комплексах (РТК). Методы охватывают различные подходы, включая классические методы калибровки, самокалибровку роботизированных систем, применение цифровых двойников и технологии машинного зрения.

Классические методы калибровки традиционно основываются на использовании специальных калибровочных объектов и процедур для установления преобразований между системами координат робота и камеры. Одним из таких распространенных подходов является калибровка "рука-глаз" (hand-eye calibration). Для повышения точности вычисления преобразований используются методы, основанные на анализе Прокруста [1], позволяющие учитывать одновременно вращение и трансляцию при преобразовании координат. Кроме того, в некоторых работах [2-5] применяют алгебру кватернионов и двойных кватернионов для более точного представления пространственных преобразований. Несмотря на высокую точность, эти методы зачастую сложны в реализации и требуют значительных вычислительных ресурсов, а также использования специальных калибровочных объектов.

Методы самокалибровки роботизированных систем направлены на автоматизацию процесса калибровки без необходимости использования специальных объектов. В работе [6] предложен метод самокалибровки для роботизированных систем, который использует информацию, полученную в процессе эксплуатации робота, для обновления калибровочных параметров. Алгоритм автоматически идентифицирует и накапливает информативные измерения, используя информационно-теоретические меры, и обновляет параметры по мере их наблюдения. Такой подход позволяет системе адаптироваться к изменениям без постоянной необходимости вмешательства оператора. Однако метод чувствителен к качеству данных и требует применения сложных вычислительных алгоритмов.

Применение цифровых двойников в РТК открывает новые возможности для моделирования и оптимизации процессов интеграции и настройки компонентов в виртуальной среде. Цифровые двойники позволяют создавать виртуальные копии реальных объектов или систем, что способствует снижению времени и затрат на реальную настройку системы [7]. В работе [8] обсуждаются технологии разработки цифровых двойников изделий, что позволяет проводить предварительную настройку и тестирование процессов интеграции компонентов РТК. Однако создание точных моделей всех компонентов и необходимость значительных вычислительных ресурсов являются серьезными вызовами.

Несмотря на прогресс в области машинного зрения и глубокого обучения, точное определение положения объектов в пространстве и их согласование с системой координат робота без проведения сложной калибровки остается сложной задачей. Это связано с тем, что преобразование координат из системы координат камеры в систему координат робота требует высокой точности в определении параметров преобразования и учета множества факторов, таких, как калибровка камеры, геометрия системы и возможные искажения. Кроме того, интеграция методов машинного зрения в процесс согласования систем координат без использования специальных калибровочных объектов требует дальнейших исследований [9-11].

На основании проведенного анализа был сделан вывод, что существующие методы согласования систем координат в РТК либо требуют значительных временных и ресурсных затрат, либо не обеспечивают необходимой гибкости и оперативности, особенно в условиях ре-

конфигурируемых систем. Традиционные методы калибровки требуют значительных временных и трудовых затрат, так как они выполняются вручную оператором, используют специальные калибровочные объекты и требуют сложных вычислений. Использование таких методов приводит к увеличению времени переналадки системы и снижает общую эффективность производства. В условиях многономенклатурного мелкосерийного производства, где частые изменения конфигурации являются нормой, такие задержки становятся критическими.

Данная работа посвящена разработке метода согласования систем координат компонентов РТК, объединяющего в себе преимущества машинного зрения, моделей глубокого обучения и автоматизации процессов калибровки. Для этого были проанализированы существующие методы согласования систем координат, разработан алгоритм на основе метода калибровки “eye-to-hand” («глаз-к-руке») без использования специальных калибровочных объектов с применением методов машинного зрения и модели глубокого обучения YOLOv5. Для апробации метода была создана виртуальная экспериментальная модель РТК и собраны данные для оценки точности позиционирования и времени переналадки системы.

2. Описание метода согласования систем координат компонентов в РТК на основе машинного зрения. Полный цикл работы метода согласования систем координат компонентов РТК представлен на рисунке 1.

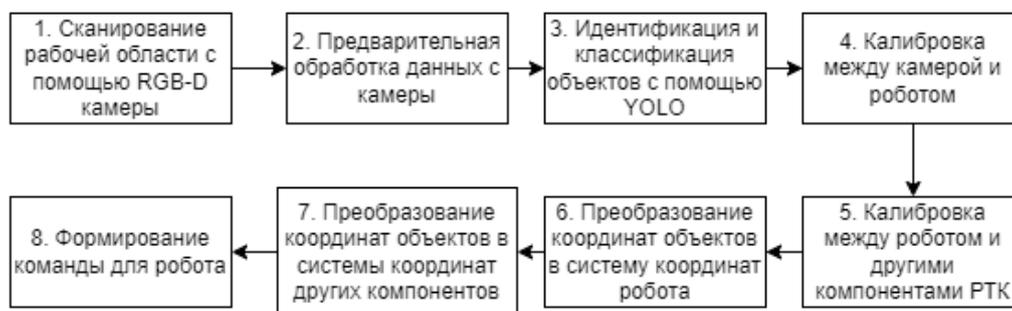


Рис. 1. Метод согласования систем координат компонентов РТК

Первоначально рабочее пространство сканируется с помощью RGB-D камеры, установленной над рабочей зоной робота. Такая установка обеспечивает стабильное положение камеры и полный обзор области, где робот взаимодействует с объектами. Полученные от камеры данные проходят предварительную обработку. Изображения фильтруются с помощью фильтра Гаусса для удаления шумов, а карты глубины обрабатываются билатеральным фильтром. Коррекция оптических искажений осуществляется с настройкой параметров внутренней калибровки камеры, что повышает точность последующего анализа. Далее производится идентификация и классификация объектов с использованием модели YOLOv5, обученной на пользовательском наборе данных, включающем объекты, с которыми взаимодействует робот. Классы объектов включают заготовки и детали различных типов, оснастку и инструменты, компоненты РТК, а также элементы безопасности. Входными данными для модели служат отфильтрованные RGB-изображения, а выходными – координаты ограничивающих рамок объектов и их классы. Это позволяет системе определить, какие объекты присутствуют в рабочей зоне и где они находятся на изображении. После идентификации и классификации объектов возникает необходимость преобразовать их координаты из системы координат камеры в систему координат робота, а затем в системы координат других компонентов РТК, с которыми робот должен взаимодействовать. Для этого используется метод калибровки "eye-to-hand" без применения специальных калибровочных объектов.

2.1. Калибровка между камерой и роботом. Для обеспечения точного взаимодействия робота с объектами необходимо согласовать системы координат камеры и робота. Робот-манипулятор выполняет серию заранее определённых движений, перемещая схват в различные

положения и ориентации в рабочей зоне. Камера фиксирует эти положения, получая соответствующие изображения и карты глубины. Синхронизация данных между системой управления робота и камерой обеспечивается с помощью временных меток, что позволяет точно сопоставить каждое положение робота с соответствующим изображением.

С использованием модели YOLOv5 на полученных изображениях определяется положение схвата робота в пиксельных координатах u_{center}, v_{center} . Из карты глубины извлекается значение глубины z_{camera} в соответствующей точке:

$$z_{camera} = D(u_{center}, v_{center}) \quad (1)$$

Затем, используя параметры внутренней калибровки камеры – фокусные расстояния f_x, f_y и координаты оптического центра c_x, c_y , вычисляются координаты схвата робота-манипулятора в декартовой системе координат камеры по следующим формулам:

$$\begin{cases} x_{camera} = \frac{(u_{center} - c_x) \cdot z_{camera}}{f_x} \\ y_{camera} = \frac{(v_{center} - c_y) \cdot z_{camera}}{f_y} \\ z_{camera} = z_{camera} \end{cases} \quad (2)$$

Для каждого положения схвата робота-манипулятора собираются пары соответствующих точек в пространстве: координаты в системе координат камеры $x_{camera}, y_{camera}, z_{camera}$ и соответствующие им координаты в системе координат робота $x_{robot}, y_{robot}, z_{robot}$, полученные из системы управления роботом.

Собранные пары точек используются для вычисления матрицы преобразования $T_{camera_to_robot}$, описывающей отношение между системами координат камеры и робота. Матрица $T_{camera_to_robot}$ является гомогенной матрицей 4x4, включающей матрицу вращения и вектор трансляции:

$$T_{camera_to_robot} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Вычисление матрицы осуществляется путём решения задачи наименьших квадратов, что позволяет определить параметры вращения R и трансляции t между системами координат с минимальной ошибкой. Оценка точности калибровки производится путём применения полученной матрицы к контрольным точкам и сравнения преобразованных координат с соответствующими координатами в системе координат робота. Если среднеквадратичная ошибка не превышает допустимого порога, матрица считается корректной и может быть использована для преобразования координат объектов.

2.2. Калибровка между роботом и другими компонентами РТК. Калибровка между роботом и другими компонентами РТК, такими, как станок с ЧПУ, мобильный стол или конвейерная линия, проводится аналогичным образом. Робот перемещает свой схват к заранее определённым опорным точкам, расположенным в рабочей зоне компонента РТК, координаты которых известны в локальной системе координат этого компонента. Эти опорные точки могут находиться непосредственно на поверхности оборудования или в области, где робот взаимодействует с компонентом. Координаты схвата фиксируются в системе координат робота для каждого положения схвата при соприкосновении с опорными точками на компоненте РТК. Затем вычисляется матрица преобразования $T_{robot_to_component}$ с использованием пар соответствующих точек координат:

$$\begin{bmatrix} x_{machine} \\ y_{machine} \\ z_{machine} \\ 1 \end{bmatrix} = T_{robot_to_component} \begin{bmatrix} x_{robot} \\ y_{robot} \\ z_{robot} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Оценка точности производится путём сравнения преобразованных координат с известными координатами в системе компонента РТК. Если точность соответствует требованиям, матрица используется для дальнейших преобразований.

2.3. Преобразование координат объектов. После успешной калибровки осуществляется преобразование координат обнаруженных объектов. Сначала определяется центр объекта на изображении по координатам ограничивающей рамки $u_{min}, v_{min}, u_{max}, v_{max}$:

$$\begin{cases} u_{center} = \frac{u_{min}+u_{max}}{2} \\ v_{center} = \frac{v_{min}+v_{max}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

Глубина в точке извлекается из карты глубины по формуле (1). Координаты объекта в системе координат камеры вычисляются по формулам (2).

Затем координаты объекта преобразуются в систему координат робота с использованием матрицы $T_{camera_to_robot}$:

$$\begin{bmatrix} x_{robot} \\ y_{robot} \\ z_{robot} \\ 1 \end{bmatrix} = T_{camera_to_robot} \begin{bmatrix} x_{camera} \\ y_{camera} \\ z_{camera} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Для преобразования координат объектов, выраженных в системе координат робота, в систему координат компонента РТК, используется матрица $T_{robot_to_component}$ (4). Объединенное преобразование может быть выражено общей матрицей:

$$T_{camera_to_component} = T_{camera_to_robot} \cdot T_{robot_to_component} \quad (7)$$

Полученные координаты используются роботом для планирования траектории движения к объекту с учетом кинематических ограничений и возможных препятствий в рабочей зоне.

3. Разработка экспериментальной модели. Для проверки предложенного метода была разработана виртуальная модель РТК с использованием среды 3D-моделирования производства «R-про». Модель (рисунок 2) включает:

- шестиосевой промышленный робот-манипулятор с точностью позиционирования схвата в модели 0.1 мм. и рабочей зоной, охватывающей область взаимодействия с конвейером и станком с ЧПУ;
- два мобильных промышленных стола;
- станок с ЧПУ с интерфейсом для передачи команд и статуса в модель робота;
- RGB-D камера, установленная над рабочей зоной в конфигурации "eye-to-hand", с разрешением 1920x1080 пикселей, полем зрения 90 градусов по горизонтали и диапазоном измерения глубины от 0.5 м до 5 м.

Для реализации метода использовался язык программирования Python с библиотеками OpenCV и PyTorch. Данные с RGB-D камеры обрабатывались в следующей последовательности: сначала изображения и карты глубины считывались и проходили предварительную обработку, затем осуществлялись обнаружение, классификация и получение координат объектов, после чего координаты объектов преобразовывались и передавались системе управления роботом (рисунок 3).

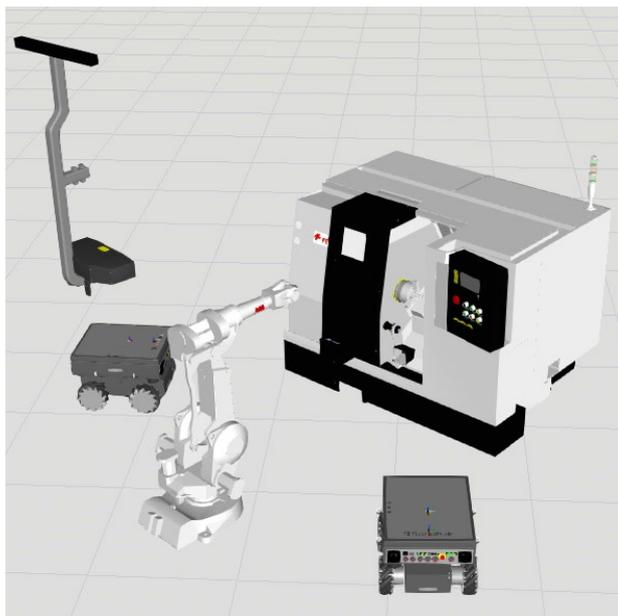


Рис. 2. Модель РТК

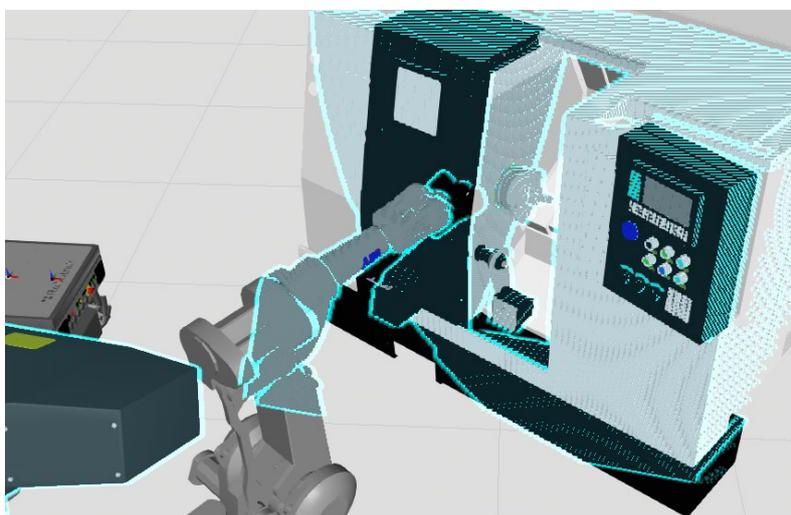


Рис. 3. Пример визуализации работы RGB-D камеры в модели РТК

На листинге 1 представлены получение и предварительная обработка данных с камеры. Сначала считываются RGB-изображения и соответствующие им карты глубины. Для удаления шумов и улучшения качества изображений применяются фильтры: к RGB-изображениям – фильтр Гаусса, к картам глубины – билатеральный фильтр. Также проводится коррекция оптических искажений с использованием параметров внутренней калибровки камеры.

Листинг 1. Получение и предварительная обработка данных с камеры

```
import cv2
import numpy as np
camera_matrix = np.array([[fx, 0, cx],
                          [0, fy, cy],
                          [0, 0, 1]])
dist_coeffs = np.array([k1, k2, p1, p2, k3])
rgb_image = cv2.imread('rgb_image.png')
depth_map = cv2.imread('depth_map.png', cv2.IMREAD_UNCHANGED)
rgb_undistorted = cv2.undistort(rgb_image, camera_matrix, dist_coeffs)
depth_undistorted = cv2.undistort(depth_map, camera_matrix, dist_coeffs)
rgb_filtered = cv2.GaussianBlur(rgb_undistorted, (5, 5), 0)
depth_filtered = cv2.bilateralFilter(depth_undistorted, 9, 75, 75)
```

После предварительной обработки данные готовы для анализа. На рисунке 4 показаны результаты этой обработки: отфильтрованное RGB-изображение и соответствующая ему карта глубины.

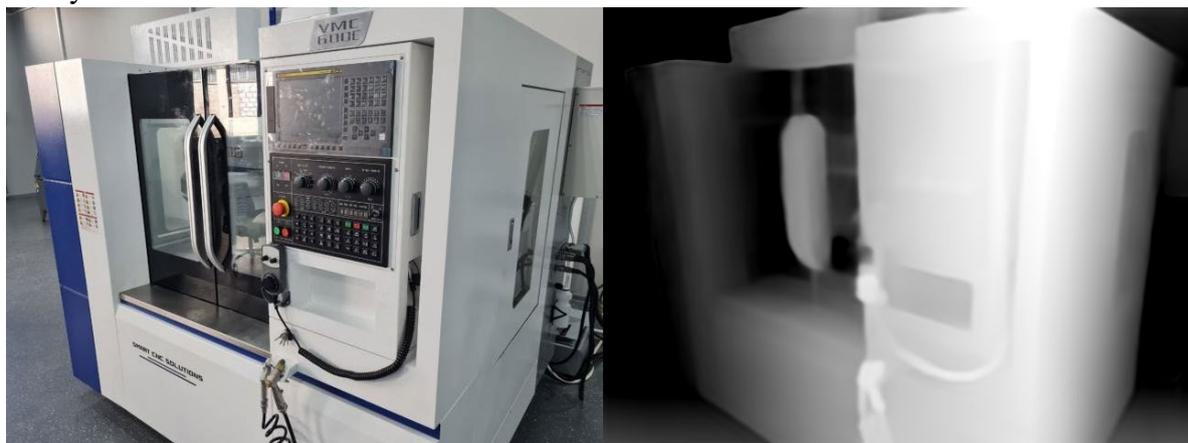


Рис. 4. Пример полученного изображения и карты глубины после фильтрации

Далее осуществляется обнаружение и классификация объектов (рисунок 5) с помощью модели глубокого обучения YOLOv5, обученной на пользовательском наборе данных (листинг 2).



Рис. 5. Пример работы YOLOv5

Листинг 2. Применение модели YOLOv5, обученной на пользовательском наборе данных

```
import torch
model = torch.hub.load('ultralytics/yolov5', 'custom', path='best.pt')
results = model(rgb_filtered)
detections = results.pandas().xyxy[0]
for index, row in detections.iterrows():
    xmin = int(row['xmin'])
    ymin = int(row['ymin'])
    xmax = int(row['xmax'])
    ymax = int(row['ymax'])
    class_name = row['name']
    confidence = row['confidence']
    print(f"Обнаружен объект {class_name} с уверенностью {confidence:.2f} в координатах ({xmin}, {ymin}), ({xmax}, {ymax})")
```

После идентификации объектов необходимо определить их пространственные координаты. Для каждого обнаруженного объекта вычисляются координаты центра ограничивающей

рамки на изображении (4). Затем из карты глубины извлекается значение глубины в этой точке (1). Используя параметры внутренней калибровки камеры, координаты объекта в пиксельной системе преобразуются в метрические координаты системы координат камеры (2).

Полученные координаты объектов в системе координат камеры необходимо преобразовать в систему координат робота. Для этого применяется ранее вычисленная матрица преобразования $T_{camera_to_robot}$ (5). Эти координаты используются для формирования команд управления роботом (листинг 3).

Листинг 3. Формирование команд управления роботом

```

move_command = f"MOVE_TO X:{x_robot:.2f} Y:{y_robot:.2f} Z:{z_robot:.2f}"
def send_command_to_robot(command):
    robot_ip = "192.168.1.100"
    robot_port = 5000
    sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    try:
        sock.connect((robot_ip, robot_port))
        sock.send(command.encode("utf-8"))
        response = sock.recv(1024).decode("utf-8")
        print(f"Ответ от робота: {response}")
    except Exception as e:
        print(f"Ошибка при отправке команды: {e}")
    finally:
        sock.close()
send_command_to_robot(move_command)

```

Таким образом, весь процесс – от получения данных с камеры до передачи команд роботу – автоматизирован и не требует постоянного вмешательства оператора.

Результаты. Для проверки эффективности предложенного метода была разработана модель робототехнического комплекса (РТК), в которой были проведены виртуальные эксперименты. Робот-манипулятор выполнял задачу установки заготовки с мобильного стола в виртуальный станок с ЧПУ. Положение заготовки определялось с помощью, симулированной RGB-D камеры, интегрированной в модель РТК и модели YOLOv5, обученной на пользовательском наборе данных. Точность позиционирования схвата робота-манипулятора оценивалась путем измерения отклонения фактического положения рабочего органа от целевого положения по каждой из осей (таблица 1).

Пространственное отклонение в каждом испытании не превышало 3.90 мм, а среднее пространственное отклонение составило 3.76 мм. Это отклонение соответствует требованиям ряда промышленных задач и подтверждает адекватность предложенного метода в рамках модели РТК.

Для сравнения был реализован классический метод калибровки "глаз-к-руке" с использованием маркеров. Точность позиционирования схвата робота оценивалась аналогично.

Таблица 1. Результаты измерений точности позиционирования в модели

Номер испытания	Отклонение по X (мм)	Отклонение по Y (мм)	Отклонение по Z (мм)	Пространственное отклонение (мм)
1	1.9	2.2	2.6	3.90
2	2.1	2.0	2.4	3.76
3	1.8	2.3	2.1	3.60
4	2.2	1.9	2.5	3.84
5	2.0	2.1	2.3	3.70
Среднее	2.0	2.1	2.4	3.76

Результаты показали, что среднее пространственное отклонение при использовании классического метода составило 2.23 мм, что на 1.53 мм меньше, чем при использовании предложенного метода. Для некоторых приложений РТК такая точность является достаточной. Для систем, где требуется более высокая точность, возможно применение дополнительной калибровки или доработка метода для повышения точности позиционирования.

Было проведено сравнение времени, затрачиваемого на переналадку системы, с использованием классического и предложенного методов. Время переналадки при использовании предложенного метода было оценено в 5 минут, тогда как при использовании метода с маркерами оно увеличивается до 15 минут. Это связано с тем, что классический метод требует установки и калибровки с использованием маркеров, что занимает дополнительное время и требует участия оператора. Сокращение времени переналадки системы является существенным преимуществом в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства.

Время, затрачиваемое на обработку изображений и вычисление координат объектов в модели, составило в среднем 0.1 секунды на кадр, что позволило системе работать в режиме реального времени с частотой обновления 10 Гц.

Полученные в работе результаты подтверждают работоспособность предложенного метода. Метод без использования специальных калибровочных объектов обеспечивает достаточную для ряда технологических процессов точность позиционирования схвата робота и сокращает время переналадки системы.

Заключение. Предложенный метод согласования систем координат компонентов в РТК, основанный на использовании машинного зрения, метода калибровки «глаз-к-руке» и модели глубокого обучения, делает возможным согласование систем координат компонентов без использования специальных калибровочных объектов, что повышает гибкость системы. Также уменьшается трудоемкость процесса переналадки за счёт отсутствия необходимости поверять позиции компонентов РТК вручную, что особенно актуально в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства. Несмотря на снижение точности по сравнению с методом с использованием маркеров, преимущества в скорости наладки делают предложенный метод актуальным для РТК, где время и гибкость являются критичными факторами.

Для использования предложенного метода в системах, требующих более высокой точности позиционирования, требуются дальнейшие разработки и исследования. Возможные направления для улучшений включают эксперименты с другими моделями глубокого обучения, совершенствование алгоритмов калибровки, использование дополнительных датчиков и камер.

Список источников

1. Wu J., Sun Y., Wang M., Liu M. Hand-eye Calibration: 4D procrustes analysis approach. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2020, vol. 69, no. 6, pp. 2966–2981, DOI:10.1109/TIM.2019.2930710.
2. Shen C., Wang X., Zhang G., Huang S., Gu P. Calibration algorithm in robotic remanufacturing measurement system based on 3D laser scanner. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7384, pp. 73840P, DOI:10.1117/12.836188.
3. Wang G., Pan J., Liang B., Sun Z. A method of robot base frame calibration by using dual quaternion algebra. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 74865–74873, DOI:10.1109/ACCESS.2018.2882502.
4. Krakhmalev O. Coordinate transformation in the methods of calibration of industrial robots. *Advances in automobile engineering*, 2018, 07, DOI:10.4172/2167-7670.1000181.
5. Zhang J., Yu H., Deng H., Chai Z., Ma M., Zhong X. A robust and rapid camera calibration method by one captured image. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, vol. 68, no. 7, pp. 2294–2303, DOI:10.1109/TIM.2018.2884583.
6. Maye J., Furgale P., Siegwart R. Self-supervised calibration for robotic systems. *2013 IEEE Intelligent vehicles symposium (IV)*, 2013, pp. 473–480, DOI:10.1109/IVS.2013.6629513.
7. Automate.org. Digital Twins and virtual commissioning in industry 4.0. Available at: <https://www.automate.org/robotics/tech-papers/digital-twins-and-virtual-commissioning-in-industry-4-0> (accessed: 09/15/2024).

8. Благовещенский И.Г. Цифровой двойник изделия: технологии разработки / И.Г. Благовещенский, В.Г. Благовещенский, В.А. Холопов и др. // Роговские чтения. Секция «Автоматизация технологических процессов и производств»: сборник докладов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 30 ноября 2023 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – С. 154–161. – EDN QGMICS.
9. Shahria M.T., Sunny M.S.H., Zarif M.I.I., Ghommam J., Ahamed S.I., Rahman M.H. A comprehensive review of vision-based robotic applications: current state, components, approaches, barriers, and potential solutions. *Robotics*, 2022, vol. 11, no. 6, 139 p., DOI:10.3390/robotics11060139.
10. Ruiz-del Solar J., Loncomilla P. Applications of deep learning in robot vision. *Deep learning in computer vision*, pp. 211–232, DOI:10.1201/9781351003827-8.
11. Благовещенский В.Г. Применение на производстве нейронной сети YOLO для определения качества пищевой продукции / В.Г. Благовещенский, И.Г. Благовещенский, В.А. Холопов и др. // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности: сборник научных докладов IV Международной специализированной конференции-выставки, Москва, 26 апреля 2023 года. – Москва: РОСБИОТЕХ, 2023. – С. 66–72. – EDN ОННQER.

Холопов Владимир Анатольевич. К.т.н., доцент, заведующий кафедрой промышленной информатики МИРЭА – Российского технологического университета. Основные направления исследований связаны с автоматизацией технологических процессов и производств в промышленности. AuthorID: 467287, SPIN:6007-8117, ORCID:0000-0003-2108-8462, Holopov@gmail.com, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, 78.

Макаров Максим Алексеевич. Старший преподаватель кафедры промышленной информатики МИРЭА – Российского технологического университета. Основные направления исследований связаны с автоматизацией технологических процессов и производств в промышленности, нейронными сетями и робототехникой. AuthorID:1018754, SPIN:1359-7222, MakMak95@yandex.ru, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, 78.

Благовещенский Иван Германович. Д.т.н., профессор кафедры промышленной информатики МИРЭА – Российского технологического университета. Основные направления исследований связаны с автоматизацией технологических процессов и производств в промышленности и искусственным интеллектом. AuthorID:978052, SPIN:7057-5071, Igblagov@mail.ru, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, 78.

UDC 658.5, 004.932

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.003

A machine vision-based method for aligning coordinate systems of components in Robotic Technological Complexes

Vladimir A. Kholopov, Maxim A. Makarov, Ivan G. Blagoveshchensky

MIREA - Russian technological university,

Russia, Moscow, *MakMak95@yandex.ru*

Abstract. This paper proposes a method for aligning coordinate systems in robotic technological complexes (RTCs) using machine vision and a deep learning model, without the use of special calibration objects. The method is based on "eye-to-hand" calibration and employs the YOLOv5 model for object detection and classification in the robot's working area. The proposed approach allows for automatic transformation of object coordinates from the camera coordinate system to the coordinate systems of the robot and other RTC components, ensuring precise interaction between them. Simulation results confirmed the effectiveness of the method and its suitability for industrial applications. The method reduces reconfiguration time and enhances the flexibility of RTCs, which is especially important in multi-nomenclature small-batch production environments.

Keywords: robotic technological complex, RTC, machine vision, deep learning, eye-to-hand calibration, automation, multi-nomenclature small-batch production

References

1. Wu J., Sun Y., Wang M., Liu M. Hand-eye Calibration: 4D procrustes analysis approach. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2020, vol. 69, no. 6, pp. 2966–2981, DOI:10.1109/TIM.2019.2930710.

2. Shen C., Wang X., Zhang G., Huang S., Gu P. Calibration algorithm in robotic remanufacturing measurement system based on 3D laser scanner. Proceedings of SPIE, 2009, vol. 7384, pp. 73840P, DOI:10.1117/12.836188.
3. Wang G., Pan J., Liang B., Sun Z. A method of robot base frame calibration by using dual quaternion algebra. IEEE Access, 2018, vol. 6, pp. 74865–74873, DOI:10.1109/ACCESS.2018.2882502.
4. Krakhmalev O. Coordinate transformation in the methods of calibration of industrial robots. Advances in automobile engineering, 2018, 07, DOI:10.4172/2167-7670.1000181.
5. Zhang J., Yu H., Deng H., Chai Z., Ma M., Zhong X. A robust and rapid camera calibration method by one captured image. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, vol. 68, no. 7, pp. 2294–2303, DOI:10.1109/TIM.2018.2884583.
6. Maye J., Furgale P., Siegwart R. Self-supervised calibration for robotic systems. 2013 IEEE Intelligent vehicles symposium (IV), 2013, pp. 473–480, DOI:10.1109/IVS.2013.6629513.
7. Automate.org. Digital Twins and virtual commissioning in industry 4.0. Available at: <https://www.automate.org/robotics/tech-papers/digital-twins-and-virtual-commissioning-in-industry-4-0> (accessed: 09/15/2024).
8. Blagoveshchensky I.G., Blagoveshchensky V.G., Kholopov V.A., et al. Tsifrovoy dvoynik izdeliya: tekhnologii razrabotki [Digital twin of a product: development technologies]. Rogovskiye chteniya. Sektsiya «Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv», sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, Moskva, 30 noyabrya 2023g., Kursk, ZAO “Universitetskaya kniga” [Rogov Readings. Section "Automation of Technological Processes and Productions", Proceedings of the scientific and practical conference with international participation, Moscow, November 30, 2023, Kursk, JSC "University Book"], 2023, pp. 154–161, EDN QGMICS.
9. Shahria M.T., Sunny M.S.H., Zarif M.I.I., Ghommam J., Ahamed S.I., Rahman M.H. A comprehensive review of vision-based robotic applications: current state, components, approaches, barriers, and potential solutions. Robotics, 2022, vol. 11, no. 6, 139 p., DOI:10.3390/robotics11060139.
10. Ruiz-del Solar J., Loncomilla P. Applications of deep learning in robot vision. Deep learning in computer vision, pp. 211–232, DOI:10.1201/9781351003827-8.
11. Blagoveshchensky V.G., Blagoveshchensky I.G., Kholopov V.A., et al. Primeneniye na proizvodstve neyronnoy seti YOLO dlya opredeleniya kachestva pishchevoy produktsii [Application of the YOLO neural network in production for determining the quality of food products]. Fabrika budushchego: perekhod k peredovym tsifrovym, intellektual'nym proizvodstvennym tekhnologiyam, robotizirovannym sistemam dlya otrasley pishchevoy promyshlennosti, sbornik nauchnykh dokladov IV Mezhdunarodnoy spetsializirovannoy konferentsii-vystavki, Moskva, 26 aprelya 2023 goda. Moskva, ROSBIOTEKH, 2023 [Factory of the Future, transition to advanced digital, intelligent production technologies, robotic systems for the food industry, sectors: Collection of scientific reports of the IV International specialized conference-exhibition, Moscow, April 26, 2023. Moscow, ROSBIOTECH, 2023], pp. 66–72, EDN OHHQER.

Kholopov Vladimir Anatolyevich. Ph.D, associate professor, head of the department of industrial informatics at MIREA - Russian technological university. The main directions of research are related to the automation of technological processes and productions in industry. AuthorID:467287, SPIN:6007-8117, ORCID:0000-0003-2108-8462, Holopov@gmail.com, 119454, Moscow, 78, Vernadskogo Avenue, Moscow.

Makarov Maxim Alekseevich. Senior lecturer of the department of industrial informatics at MIREA - Russian technological university. The main directions of research are related to the automation of technological processes and productions in industry, neural networks and robotics. AuthorID:1018754, SPIN:1359-7222, MakMak95@yandex.ru, 119454, Moscow, 78, Vernadskogo Avenue, Moscow.

Blagoveshchensky Ivan Germanovich. Doctor of technical sciences, professor of the department of industrial informatics, MIREA - Russian technological university. The main directions of research are related to the automation of technological processes and production in industry and artificial intelligence. AuthorID:978052, SPIN:7057-5071, Igblagov@mail.ru, 119454, Moscow, 78, Vernadskogo Avenue, Moscow.

Статья поступила в редакцию 09.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 11/09/2024; approved after reviewing 12/17/2024; accepted for publication 12/17/2024.

УДК 681.5.015.23: 004.85

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.004

Параметрическая оптимизация ШИМ-регулятора с нейронной сетью с помощью улучшенного метода Нелдера-Мида

Игумнов Иннокентий Васильевич, Куцкий Николай Николаевич

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, rtif555@gmail.com

Аннотация. Целью данной статьи является устранение в алгоритме обучения нейронных сетей недостатков, к которым относятся неточное определение направление движения, медленное схождение к экстремуму и необходимость применения достаточно большого количества начальных симплексов. Предлагается внедрение в алгоритм обучения нейронных сетей дополнительного направления поиска, применительно к решению задачи параметрической оптимизации искусственных нейронных сетей (ИНС), содержащихся в звеньях с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) автоматических систем регулирования (АСР). Ввиду того, что ИНС используются в АСР, задачи обучения и параметрической оптимизации являются равнозначными и в конечном итоге сводятся к определению весовых коэффициентов ИНС. Для достижения означенной цели поставлены и решены задачи: 1) проанализированы существующие подходы, применяемые в методах прямого поиска для улучшения их характеристик; 2) проведены эксперименты по применению наиболее распространённых подходов, в контексте задачи параметрической оптимизации систем с ШИМ-регуляторами; 3) предложены рекомендации по их применению. Это позволяет разрешить проблемы скорости, количества начальных симплексов, возникающие при решении задачи параметрической оптимизации АСР с устройством, осуществляющим ШИМ с использованием ИНС, что обуславливает актуальность представленной статьи.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, параметрическая оптимизация, искусственная нейронная сеть, обучение нейронной сети, метод Нелдера-Мида, интегральный критерий, квазиградиент

Цитирование: Игумнов И.В. Параметрическая оптимизация ШИМ-регулятора с нейронной сетью с помощью улучшенного метода Нелдера-Мида / И.В. Игумнов, Н.Н. Куцкий // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 37-45. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.004.

Введение. В последние годы ИНС находят широкое применение в промышленности в качестве отдельных элементов систем управления, в том числе и импульсных. Как известно, ввиду существенной нелинейности подобных систем при решении задачи параметрической оптимизации в системах с ШИМ-элементом возникает необходимость обобщенного дифференцирования [1], а применение аналитических методов невозможно.

Наиболее распространённые в литературе метод Error Back Propagation (ЕВР) [2, 3], требующий наличия первой производной, и методы второго порядка, такие, как Levenberg Marquardt (LM) или Neuron by Neuron (NBN) [4], требующий наличия второй производной, вызывают значительные трудности при применении их для решения подобной задачи, что сказывается на снижении качества обучения нейронной сети. По этой причине в статье обращено внимание на методы прямого поиска.

Алгоритм обучения нейронной сети (ОНС) [5], построенный на основе метода Нелдера-Мида, не требует вычисления производных первого и второго порядка, и, в свою очередь, является приемлемым для решения задачи параметрической оптимизации в импульсных автоматических системах. Однако алгоритм ОНС также не лишен недостатков, таких, как достаточно низкая сходимость и значительные трудозатраты на отсеивание начальных симплексов [6]. Главным его недостатком, как и всех алгоритмов, построенных на основе метода Нелдера-Мида, является то, что он недостаточно точно определяет направление движения [4], используя только простые геометрические преобразования для задач больших размерностей.

Один из наиболее распространённых способов устранения этого недостатка в алгоритмах, построенных на основе метода Нелдера-Мида – это добавление в их структуру дополнительного направления поиска [4-9]. Целью данной статьи является показать положительный эффект от внедрения его в алгоритм ОНС при параметрической оптимизации ШИМ-элемента, имеющего в своем составе ИНС.

Структурная схема исследуемой системы. Представим структурную схему исследуемой автоматической системы (рисунок 1).

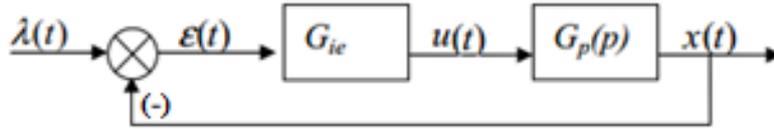


Рис. 1. Структурная схема автоматической системы

Здесь $G_p(p)$ – оператор объекта регулирования; $u(t)$ – выход ШИМ-элемента; G_{ie} – оператор ШИМ-элемента с нейронной сетью; $p=d/dt$ – оператор дифференцирования; $\lambda(t)$ – задающее воздействие; $x(t)$ – регулируемая величина; $\varepsilon(t)$ – ошибка регулирования.

Процессы, протекающие в АСР, можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \lambda(t) - x(t); \\ u(t) &= G_{ie} \cdot \varepsilon(t); \\ x(t) &= G_p(p) \cdot u(t). \end{aligned} \tag{1}$$

Характеристика ШИМ-элемента представлена в виде:

$$u(t) = \begin{cases} +1, & \text{при } \varepsilon[kT] > 0 \text{ и при } kT \leq t < kT + t_k \\ -1, & \text{при } \varepsilon[kT] < 0 \text{ и при } kT \leq t < kT + t_k \\ 0, & \text{при } kT + t_k \leq (k+1)T \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} t_k &= \gamma_k T, \\ k &= 1, 2, \dots, \end{aligned} \tag{3}$$

где T – период цикла работы ШИМ-элемента; t_k – длительность (ширина) k -го импульса; γ_k – скважность k -го импульса, которая находится с помощью нейронной сети [5, 6, 10], изображенной на рисунке 2.

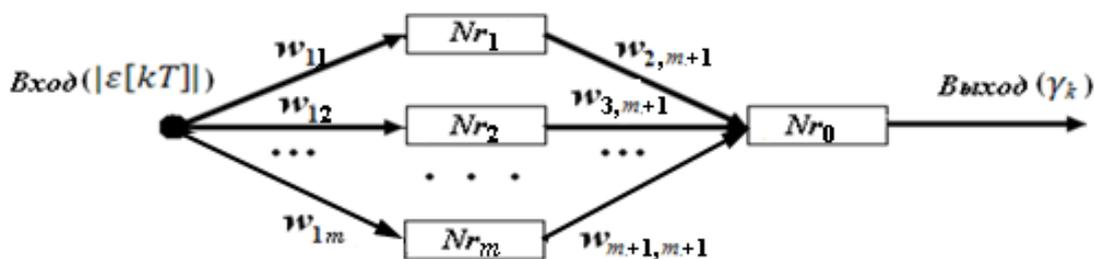


Рис. 2. Архитектура нейронной сети

Здесь Nr_i – нейроны скрытого слоя ($i=1..m$), $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1m}, w_{2,m+1}, w_{3,m+1}, \dots, w_{m+1,m+1}$ – весовые коэффициенты, образующие матрицу весовых коэффициентов W . Данная ИНС сформирована на основе модуляционной характеристики вида [5, 6]:

$$\gamma_k = q_1 |\varepsilon[kT]|^1 + q_2 |\varepsilon[kT]|^2 + q_3 |\varepsilon[kT]|^3 + \dots + q_m |\varepsilon[kT]|^m = \sum_{j=1}^m q_j |\varepsilon[kT]|^j \tag{4}$$

В качестве оценки работы автоматической системы принят интегральный критерий вида:

$$I(W) = \int_0^{\infty} F(x(t, W), \varepsilon(t, W)) dt. \quad (5)$$

Здесь $x(t, W)$ – выходная координата системы, $\varepsilon(t, W)$ – ошибка системы, F – некоторая выпуклая функция.

Алгоритм оптимизации. Для пояснения дальнейшего, кратко представим основные этапы алгоритма ОНС [5].

На первом этапе формируется набор начальных симплексов, у которых координаты n точек (в нашем случае количество весовых коэффициентов) путем целенаправленного перебора подобраны таким образом, чтобы выход нейронной сети с учетом ее архитектуры зависел от значения отдельного синаптического веса: в первой точке – от первого синаптического веса; во второй точке – от второго и так далее. Исходя из [5], в $n+1$ точке значения всех синаптических весов приравниваются к нулю. Также в точках симплекса используется варьирование знака синаптических весов всего множества их возможных значений.

На втором этапе, в каждом симплексе для всех его точек вычисляется значение критерия; в данном случае обозначено, как I_{ij} , где $i=1, 2, \dots$ – номер симплекса, $j=1, 2, \dots$ – точка i -го симплекса. Затем определяется \hat{I} – характеристическое число симплекса как $\hat{I} = \min(I_{ij})$. Далее

рассматриваются только те симплексы, для которых $\frac{\hat{I}}{\min(\hat{I})} \leq \mu$, (где $\mu < 10$, и выбирается из результатов предварительных исследований).

На третьем этапе с отобранными симплексами выполняются операции метода Нелдера-Мида: сортировка, отражение, растяжение, сжатие, усечение, проверка условия сходимости алгоритма [5]. После окончания поиска точка с наименьшим значением критерия I является решением по данному симплексу.

На четвертом этапе сравниваются значения критерия I по каждому симплексу, среди них выбирается точка с наименьшим значением, и ее координаты синаптических весов и считаются оптимальными.

Улучшенный метод Нелдера-Мида с квазиградиентом. Далее рассмотрим подходы [7-9, 11-15], применяемые для методов прямого поиска, для оценки их возможностей применения в алгоритме ОНС.

Один из наиболее распространенных в теории оптимального управления подход – это внедрение квазиградиента, базирующегося на применении золотого сечения [11], который использует дополнительную точку, полученную на основе уже имеющихся точек симплекса, для построения квазиградиента. Последовательность действий метода, реализующего данный подход, можно представить следующим образом [11]:

Шаг 1: Выбрать n -вершин начального симплекса: X_1, X_2, \dots, X_n .

Шаг 2: Определить дополнительную точку X_s , координаты которой составлены из n вершин симплекса. Координаты выбранной точки – это диагональ матрицы X из n вершин симплекса.

$$X_s = \text{diag} \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X_s = [x_{1,1}, x_{2,2}, \dots, x_{n,n}] \quad (7)$$

Шаг 3: Расчёт направления квазиградиента на основе выбранной точки X_s и других n точек симплекса.

$$G_i = \begin{cases} i \bmod 2 = 0; \frac{f(x_{i-1}) - f(x_s)}{x_{i-1,i} - x_{si}} \\ i \bmod 2 = 1; \frac{f(x_{i+1}) - f(x_s)}{x_{i+1,i} - x_{si}} \end{cases} \quad (8)$$

Шаг 4: Вычислить на основе точки B с наибольшим значением критерия в симплексе новую точку R' , отражённую по направлению квазиградиента. Параметр σ представляет собой размер шага, и численно равен коэффициенту отражения.

$$R' = B - \sigma G \quad (9)$$

Шаг 5: Если значение критерия в R' меньше, чем в точке L с наименьшим его значением в симплексе, это означает, что вектор BR' является успешным, тогда осуществляется операция растяжения и получается E' . При этом критерий успешности аналогичен вышесказанному, за исключением того, что сравниваются значения критерия в точке R' и E'

$$E' = (1 - \gamma)B - \gamma R', \quad (10)$$

где γ – коэффициент растяжения.

При сравнительном анализе классического метода Нелдера-Мида и метода с квазиградиентом следует, что последний из указанных вычисляет отражённую точку по квазиградиенту и расширенную точку только в случае, если классическая операция отражения не успешна, в остальных случаях с практической точки зрения они идентичны.

Симплексный метод с приближенно-вычисленным градиентом. Далее рассмотрен еще один из подходов – использование в качестве дополнительного направления приближенно-вычисленного (численного) градиента [7, 9, 11, 12]. Он базируется на численном определении производной при малых приращениях аргументов. Вычисляя, таким образом, частные производные по всем переменным критерия, получаем приближенное направление градиента, что и будет считаться дополнительным направлением поиска. Далее, поступая аналогично указанному выше методу (формула 9), получаем точку для дальнейшего движения симплекса. В качестве точки нахождения градиента в алгоритмах, построенных на основе метода Нелдера-Мида, чаще всего применяется центр тяжести симплекса, либо точка с наименьшим значением критерия. Существует множество разновидностей данного подхода, но ввиду ограниченности объема статьи и общности полученных результатов в этой статье они дальше рассматриваться не будут.

Результаты исследования. Для иллюстрации обучения ИНС (параметрической оптимизации) конкретизируем элементы автоматической системы (рис. 1). Оператор объекта регулирования $G_{об}(p)$ представлен в виде, с помощью которого можно описать значительное количество промышленных объектов:

$$G_{об}(p) = \frac{k_{им} k_{об}}{p (T_{об1} p + 1)(T_{об2} p + 1)} e^{-\tau_{об} p} \quad (11)$$

где $k_{об}$ – коэффициент передачи объекта, $k_{им}$ – коэффициент передачи исполнительного механизма; $T_{об1}$, $T_{об2}$ – постоянные времени объекта, $\tau_{об}$ – время запаздывания.

Элемент ШИМ имеет в своем составе нейронную сеть (рис. 2), состоящую из трех нейронов в скрытом слое с сигмоидальной функцией активации и одного в выходном слое [11]. В качестве критерия оптимизации выбран широко распространённый интегрально-квадратичный критерий:

$$I(W) = \int_0^L \varepsilon^2(t, W) dt. \quad (12)$$

где L – интервал интегрирования.

Исследования проведены в достаточно большом диапазоне параметров объекта, при этом $\frac{\tau_{об}}{T_{об}} > 1$, что, как известно, при применении ПИД-регуляторов не может обеспечить удовлетворительного качества процессов, протекающих в автоматических системах, и, в конечном итоге, вынуждает применять дискретные регуляторы, в частности, ШИМ-регуляторы. В качестве иллюстрации приведены результаты исследования при $k_{им} = 0,01$; $k_{об} = 1$; $T_{об1} = 10$; $T_{об2} = 40$; $\tau_{об} = 50$; $T = 25$, и при задающем воздействии $\lambda(t) = 0,5 \cdot 1(t)$.

Параметры алгоритмов ОНС при всех экспериментах, исходя из предварительных исследований [5, 6, 14, 15]: коэффициент отражения $\alpha = 1$, коэффициент растяжения $\gamma = 2$, коэффициент сжатия $\beta = 0,5$.

По итогам работы алгоритмов, в том числе и с квазиградиентом, получены следующие значения интегрального критерия (таблица 1).

Таблица 1. Значения интегрального критерия, количества итераций и процента симплексов, обеспечивающих сходимость к глобальному экстремуму при использовании различных алгоритмов

Алгоритм	Значение критерия	Количество итераций	% симплексов, обеспечивающих сходимость к глобальному экстремуму
ОНС	27,05	154	7
ОНС с квазиград.	31,27	112	20
ОНС с числ. вычисл. град.	29,42	133	15

Из представленной таблицы следует, что алгоритм ОНС с добавлением квазиградиента и численного градиента уступает алгоритму ОНС в значении найденного экстремума, при этом превосходя его по другим параметрам, подобная картина наблюдается при увеличении количества весов, из этого следует необходимость проведения дальнейшего исследования. Ввиду общности полученных результатов для большинства экспериментов (исследования проводились для нейронных сетей, имеющих от 3 до 128 синаптических весов) и для большей наглядности уменьшено количество настраиваемых параметров (весов) до трех, а оставшиеся установлены такими же, как в экстремуме, полученные с помощью алгоритма ОНС. Далее на рисунках 3-5 представлены операции, выполняемые на определенной итерации алгоритма.

Из анализа приведенных рисунков следует, что при использовании квазиградиентов и численных градиентов практически не выполняется операция внешнего сжатия, которая играет определенную роль в алгоритме ОНС, вместо нее выполняются другие операции, что увеличивает быстродействие алгоритма, но приводит к снижению значения критерия оптимизации. Это наиболее наглядно при возвращении к нейронной сети, расположенной в начале этого раздела статьи (таблица 2, где обозначены операции: О – отражение, К – квазиградиент, Р – растяжение, С – внутреннее сжатие, Вн. С. – внешнее сжатие, У – усечение).

Для устранения вышесказанного в статье предлагается в алгоритмы ввести правило, что в случае неуспешности классической операции отражения сравниваться между собой будут точки, полученные после операции сжатия и отражения по дополнительному направлению, и уже среди них выбирается точка с наименьшим значением критерия.

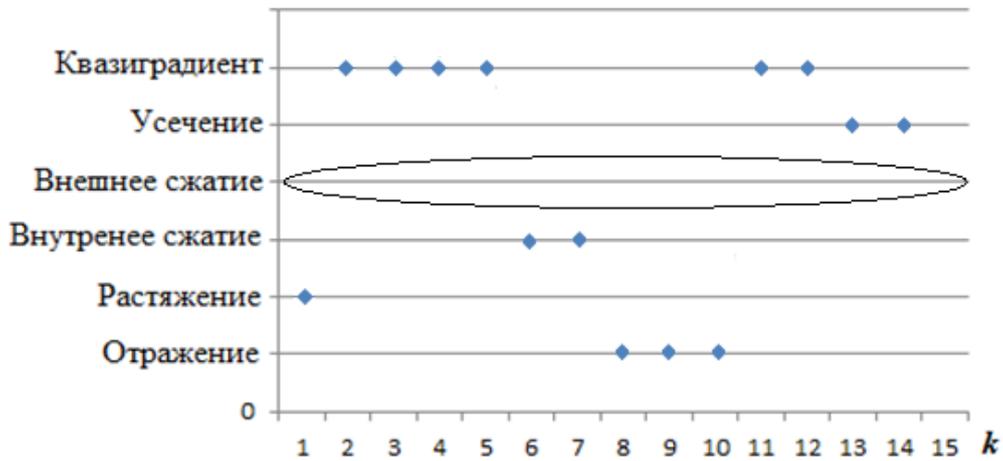


Рис. 3. Операции, выполняемые на определенной итерации алгоритма с квазиградиентом

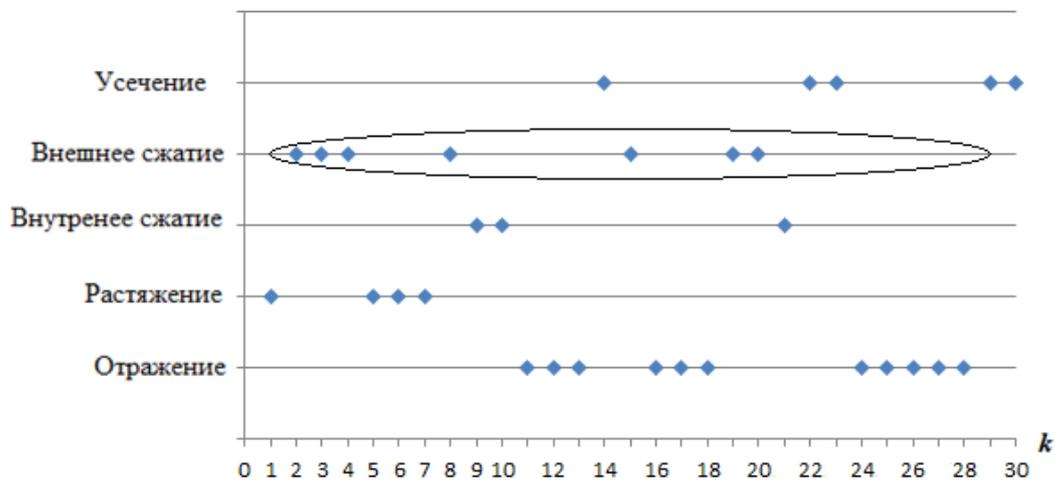


Рис. 4. Операции, выполняемые на определенной итерации алгоритма ОНС

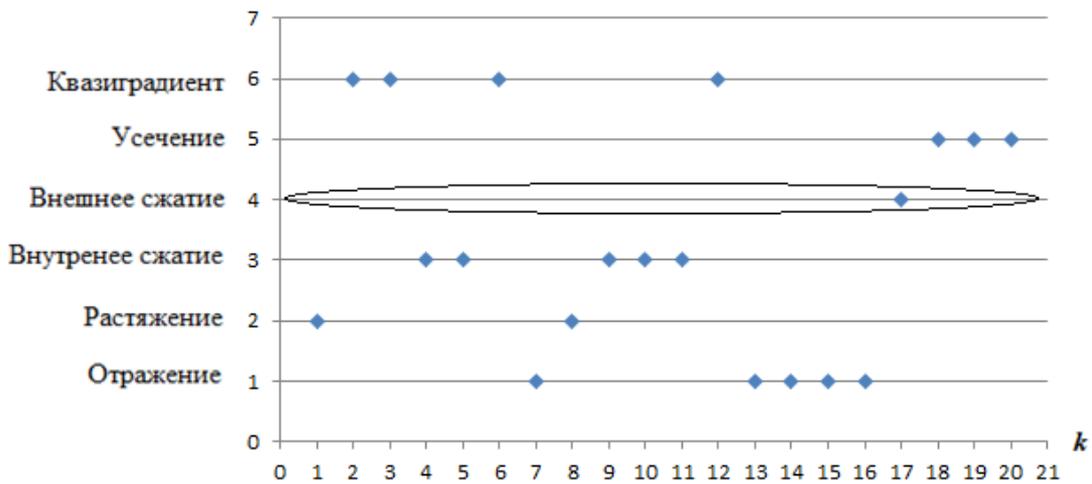


Рис. 5. Операции, выполняемые на определенной итерации алгоритма с численным вычислением градиента

Таблица 2. Количество операции, выполняемых алгоритмами

Алгоритм	О	К	Р	С	Вн. С.	У	Кол-во итераций
ОНС	65	-	20	16	36	17	154
ОНС с квазиградиентом	23	43	9	21	2	14	112
ОНС с числ. вычисл. градиентом	33	37	18	19	7	19	133

По итогам работы алгоритмов с вышеуказанным дополнением на полностью необученной нейронной сети получены следующие параметры (таблица 3).

Таблица 3. Значения интегрального критерия, количества итераций и процента симплексов, обеспечивающих сходимость к глобальному экстремуму при использовании различных алгоритмов

Алгоритм	Значение критерия	Количество итерации	% симплексов, обеспечивающих сходимость к глобальному экстремуму
ОНС	27,05	154	7
ОНС с квазиградиентом	29,34	121	18
ОНС с числ. вычисл. град.	27,05	140	12

Исходя из таблицы 3, дополнительное направление на основе численного вычисления градиента обеспечивает схождение к глобальному экстремуму за меньшее количество итераций, при большем проценте начальных симплексов, обеспечивающих сходимость, при решении задачи обучения нейронной сети автоматической импульсной системы.

Заключение. Решена задача параметрической оптимизации для ИНС, входящих в состав ШИМ-элементов с достаточной для практики точностью. Алгоритм ОНС с внедрением квазиградиента, на основе приближенного вычисления градиента, и с предложенными в этой статье изменениями может быть рекомендован при решении подобных задач, выдвигаемых практикой автоматической регуляции в импульсных системах с ШИМ-элементом, имеющих в своем составе ИНС.

Список источников

1. Розенвасер Е.Н. Линейная теория цифрового управления в непрерывном времени / Е.Н. Розенвасер. – М.: Наука, 1994. – 462 с.
2. Sadek S., Al-Hamadi A., Michaelis B., Sayed U. Efficient region-based image querying. *Journal of computing*, 2010, v. 2, no. 6, pp. 225–232.
3. Wilamowski B. M., Hao Yu, Improved computation for levenberg-Marquardt training. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 2010, v. 21, no. 6, pp. 930–937.
4. Gao F., Han L. Implementing the Nelder-Mead Simplex algorithm with adaptive parameters. *Computational optimization and applications*, 2010, v. 3, no. 12, pp. 112–118.
5. Игумнов И.В. Нейросетевая реализация и настройка ШИМ-элементов в автоматических системах / И.В. Игумнов, Н.Н. Куцый // Новосибирск: Вестник НГТУ, 2015. – № 3(60) – С. 23-32.
6. Игумнов И.В. Алгоритм параметрической оптимизации автоматических систем с ШИМ-элементом, имеющим в своем составе нейронную сеть/ И.В. Игумнов, Н.Н. Куцый // М: Мехатроника, автоматизация, управление, 2017. – №4(18). – С. 227–232.
7. Кибзун А.И. Стохастический квазиградиентный алгоритм минимизации функции квантили / А.И. Кибзун, Е.Л. Матвеев // М: Автоматика и телемеханика, 2010. – №6. – С. 64–78.
8. Nam Pham, Bogdan M., Piamowski L., Improved Nelder Mead's Simplex method and applications, *electrical and computer engineering. US Journal of computing*, 2011, v. 3, no. 3, pp. 512–518.
9. Nazareth L., Tseng P., Gilding the lily: a variant of the Nelder-Mead algorithm based on golden-section search. *Comput. Optim. Appl.*, 2002, v. 22, no. 1, pp. 133–144.
10. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 496 с.
11. Jiri Vala, Petra Jarosova Optimization approaches to some problems of building design. *Applications of mathematics*, 2018, v. 63, no. 3, pp. 305–331.
12. Saputra W.P. Comparing quasi newton BFGS and Nelder Mead algorithm for Box-Cox transformation. *Applications of mathematics*, 2015, v. 53, no. 5, p.p. 207–214.
13. Goerz M.H., Whale K.B., Kochi C.P., Hybrid optimization schemes for quantum control EPJ Quantum Technology. 2015, v. 21, no. 2, p.p. 199-216, DOI:10.1140/epjqt/s40507-015-0034-0.
14. Niegodajew P, Elsner W., Maciej M., Kowalczyk L. Power plant optimisation – effective use of the Nelder-Mead approach. *MDPI Process*, 2020, v. 357, no. 8, pp. 128-141.

15. Yoshihiko O., Masaki Y., Masaki O. Effective hyperparameter optimization using Nelder-Mead method in deep learning. IPSJ transactions on computer vision and applications, 2017, v.9(20), pp.124-136, DOI:10.1186/s41074-017-0030-7.

Игумнов Иннокентий Васильевич. Кандидат технических наук, доцент центра программной инженерии, институт информационных технологий и анализа данных, Иркутский национальный исследовательский технический университет, SPIN:6423-5450, AuthorID:1239837, rtif555@gmail.com., 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Куцый Николай Николаевич. Доктор технических наук, профессор лаборатории сетевых систем и ИТ-инфраструктуры, институт информационных технологий и анализа данных, Иркутский национальный исследовательский технический университет, AuthorID:694296, SPIN:7425-6740, kucyinn@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

UDC 681.5.015.23: 004.85

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.004

Parametric optimization of a neural network PWM controller using the improved Nelder-Mead method

Innokentiy V. Igumnov, Nicolai N. Kucyi

National research Irkutsk state technical university,
Russia, Irkutsk, rtif555@gmail.com

Abstract. The purpose of this article is to eliminate the shortcomings in the neural network training algorithm, which include insufficiently accurate determination of the direction of movement [4], slow convergence to an extremum, and the need to use a sufficiently large number of initial simplexes. It is proposed to introduce an additional search direction into the neural network training algorithm, in relation to solving the problem of parametric optimization of artificial neural networks (ANN) contained in links with pulse width modulation (PWM) of automatic control systems. Due to the fact that ANNs are used in PWM, the tasks of training and parametric optimization are equivalent and ultimately come down to determining the weighting coefficients of the ANN. To achieve this goal, the following tasks were set and solved: 1) existing approaches used in direct search methods to improve their characteristics are analyzed; 2) conducting experiments on the use of the most common approaches, in the context of the problem of parametric optimization of systems with PWM controllers; 3) development of recommendations for their use. Ultimately, the above makes it possible to resolve the problems of speed and the number of initial simplexes that arise when solving the problem of parametric optimization of automatic control systems with a device that performs PWM using ANN. Based on the above, we can talk about the relevance of the presented article.

Keywords: artificial neural network, pulse-width modulation, neural network training, Nelder-Mead method, integral criterion, quasi-gradient

References

1. Rozenvaser E.N. Linejnaja teorija cifrovogo upravlenija v nepreryvnom vremeni [Linear theory of conventional control under constant time conditions]. Moscow, Nauka, 1994, 462 p.
2. Sadek S., Al-Hamadi A., Michaelis B., Sayed U. Efficient region-based image querying. Journal of computing, 2010, v. 2, no. 6, pp. 225–232.
3. Wilamowski B. M., Hao Yu, Improved computation for levenberg-Marquardt training. IEEE Trans. on Neural Networks, 2010, v. 21, no. 6, pp. 930–937.
4. Gao F., Han L. Implementing the Nelder-Mead Simplex algorithm with adaptive parameters. Computational optimization and applications, 2010, v. 3, no. 12, pp. 112–118.
5. Igumnov I.V., Kucyj N.N. Nejrosetevaja realizacija i nastrojka ShIM-jelementov v avtomaticheskikh sistemah [Neural network implementation and configuration PWM elements in automatic systems]. Novosibirsk, Vestnik NGTU [Novosibirsk, Bulletin of NSTU], 2015, no 3(60), pp. 23–32.

6. Igumnov I.V., Kucyj N.N. Algoritm parametricheskoj optimizacii avtomaticheskikh sistem s ShIM-jelementom, imejushhim v svoem sostave nejronnuju seti [The algorithm of parametric optimization of automated systems with PWM element that incorporates artificial neural network]. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, automation, control], 2017, vol. 18, no. 4, pp. 227–232.
7. Kibzun A.I., Matveev E.L. Stohasticheskij kvazigradientnyj algoritm minimizacii funkicii kvantili [Stochastic quasi-gradient algorithm for minimizing the quantile function]. Moscow, Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemechanics], 2012, no. 2, pp. 64–78.
8. Nam Pham, Bogdan M., Ilamowski L., Improved Nelder Mead's Simplex method and applications, electrical and computer engineering. US Journal of computing, 2011, v. 3, no. 3, pp. 512–518.
9. Nazareth L., Tseng P., Gilding the lily: a variant of the Nelder-Mead algorithm based on golden-section search. Comput. Optim. Appl, 2002, v. 22, no. 1, pp. 133–144.
10. Galushkin A.I. Nejrionnye seti: osnovy teorii [Neural networks: basic theory]. Moskow, Gorjachaja linija-Telekom [Moscow, Hotline-Telecom], 2017, 496 pp.
11. Jiri Vala, Petra Jarosova Optimization approaches to some problems of building design. Applications of mathematics, 2018, v. 63, no. 3, pp. 305–331.
12. Saputra W.P. Comparing quasi newton BFGS and Nelder Mead algorithm for Box-Cox transformation. Applications of mathematics, 2015, v. 53, no. 5, p.p. 207–214.
13. Goerz M.H., Whale K.B., Kochi C.P., Hybrid optimization schemes for quantum control EPJ Quantum Technology. 2015, v. 21, no. 2, p.p. 199-216, DOI:10.1140/epjqt/s40507-015-0034-0.
14. Niegodajew P, Elsner W., Maciej M., Kowalczyk Ł. Power plant optimisation – effective use of the Nelder-Mead approach. MDPI Process, 2020, v. 357, no. 8, pp. 128-141.
15. Yoshihiko O., Masaki Y., Masaki O. Effective hyperparameter optimization using Nelder-Mead method in deep learning. IPSJ transactions on computer vision and applications, 2017, v.9(20), pp.124-136, DOI:10.1186/s41074-017-0030-7.

Innokentiy Vasilevich Igumnov. Candidate of technical sciences, associate professor of the software engineering center, Irkutsk national research technical university, SPIN:6423-5450, AuthorID:1239837, rtif555@gmail.com, 664074, Irkutsk, Lermontov Street, 83.

Nicolai Nicolaevich Kucyi. Doctor of technical sciences, professor of the laboratory of network technologies, Irkutsk national research technical university, AuthorID:694296, SPIN:7425-6740, kucyinn@mail.ru, 664074, Irkutsk, Lermontov Street, 83.

Статья поступила в редакцию 02.04.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 04/02/2024; approved after reviewing 04/17/2024; accepted for publication 12/17/2024.

Математическое моделирование и его применение в научных исследованиях

УДК 519.862.6

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.005

Оценивание методом наименьших квадратов параметров неэлементарных линейных регрессий с равномерно квантованными объясняющими переменными

Базилевский Михаил Павлович

Иркутский государственный университет путей сообщения,

Россия, Иркутск, *mik2178@yandex.ru*

Аннотация. Статья посвящена разработке новой структурной спецификации регрессионных моделей. Ранее автором были введены в рассмотрение неэлементарные линейные регрессии, в которых объясняющие переменные преобразуются с помощью таких неэлементарных операций, как минимум, максимум и модуль. В данной статье для преобразования объясняющих переменных в регрессионной модели предлагается использовать операции округления их значений до ближайшего целого числа в меньшую сторону (пол) или в большую сторону (потолок). В математике и цифровой обработке сигналов такой процесс преобразования называется квантованием. Рассмотрен известный равномерный квантователь с границей округления 0,5. Предложена неэлементарная линейная регрессия с квантованными объясняющими переменными. Определены области возможных значений шагов квантования для модели с одной объясняющей переменной. На основе этого разработан алгоритм приближенного оценивания с помощью метода наименьших квадратов параметров предложенной структурной спецификации. С использованием искусственно сгенерированных статистических данных в пакете Gretl проведены вычислительные эксперименты, подтвердившие корректность приведенных математических рассуждений. Все полученные в ходе экспериментов неэлементарные линейные регрессии с квантованными переменными оказались адекватнее классических линейных регрессий.

Ключевые слова: регрессионный анализ, неэлементарная линейная регрессия, округление, пол, потолок, квантование, квантователь, метод наименьших квадратов, мультиколлинеарность

Цитирование: Базилевский М.П. Оценивание методом наименьших квадратов параметров неэлементарных линейных регрессий с равномерно квантованными объясняющими переменными / М.П. Базилевский // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 46-56. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.005.

Введение. Для выявления скрытых знаний в статистических данных в настоящее время весьма эффективны методы регрессионного анализа [1]. Эта область машинного обучения активно развивается в последние годы и не ограничивается только лишь оцениванием параметров, известных широкому кругу специалистов линейных регрессионных моделей методом наименьших квадратов (МНК). Так, например, в [2] предложен подход к построению нечетких регрессионных моделей, в [3] разработан эффективный алгоритм динамического оценивания параметров регрессий с помощью метода наименьших модулей, в [4] предложен метод, устойчивый к наличию экстремальной стационарной координатной помехи, в [5] сформулирован алгоритм оценки модели полиномиальной логит-регрессии.

Реальные статистические зависимости между выходной и входными переменными редко носят линейный характер, поэтому актуальной задачей является поиск новых, вполне интерпретируемых нелинейных математических форм связи между исследуемыми факторами. Такие формы иначе называют структурными спецификациями регрессионных моделей. Среди таких новых спецификаций хотелось бы выделить неэлементарные линейные регрессии [6], содержащие в уравнении модели бинарные операции \min и \max . Позднее эти регрессии были обобщены [7] с использованием тернарных, кватернарных, ..., l -арных операций \min и \max .

Частным случаем такой спецификации можно считать производственную функцию Леонтьева. В [8] введены модульные линейные регрессии, в которых объясняющие переменные преобразуются с помощью операции модуль, и предложен алгоритм точного оценивания их параметров методом наименьших модулей, а в [9] – алгоритм приближенного МНК-оценивания.

Операции \min , \max и модуль носят дискретный характер. К ним же относится операция «антье» $[x]$ – целая часть вещественного числа x . Цель данной статьи состоит в создании новой спецификации регрессионных моделей, включающей операции «антье», а также алгоритма оценивания её параметров с помощью МНК.

1. Регрессии с квантованными объясняющими переменными. Впервые операцию $[x]$ ввёл К. Ф. Гаусс более 200 лет назад. Как отмечено в [10], эта операция округляет x до ближайшего целого числа в меньшую сторону. Например, $[6.2] = 6$, $[6.5] = 6$, $[6.9] = 6$. Операции округления x до ближайшего целого в большую сторону не существовало, пока в начале 60-х годов К. Э. Айверсон [11] не ввел названия «пол» (floor) и «потолок» (ceiling). Эти операции обозначаются $\lfloor x \rfloor$ и $\lceil x \rceil$ соответственно и строго определяются по следующим правилам:

$$\lfloor x \rfloor = \max \{n \mid n \leq x, n - \text{целое}\}, \lceil x \rceil = \min \{n \mid n \geq x, n - \text{целое}\}.$$

Таким образом, операция пол $\lfloor x \rfloor$ – округление x до ближайшего целого числа в меньшую сторону, т.е. $\lfloor x \rfloor = \lfloor x \rfloor$, а операция потолок $\lceil x \rceil$ – округление в большую сторону. Подробное описание свойств этих функций можно найти в работах [10, 12].

В этой связи функция округления x до ближайшего целого числа может быть записана в виде:

$$f(x) = \lfloor x + 0,5 \rfloor. \quad (1)$$

Например, $f(6,2) = \lfloor 6,2 + 0,5 \rfloor = \lfloor 6,7 \rfloor = 6$, $f(6,9) = \lfloor 6,9 + 0,5 \rfloor = \lfloor 7,4 \rfloor = 7$.

Обобщением функции (1) является так называемый равномерный квантователь (quantizer):

$$f(x) = k \left\lfloor \frac{x}{k} + 0,5 \right\rfloor, \quad (2)$$

где $k > 0$ – шаг квантования.

Тот же самый квантователь (2) можно записать через операцию потолок:

$$f(x) = k \left\lceil \frac{x}{k} - 0,5 \right\rceil.$$

Квантование в математике и цифровой обработке сигналов [13, 14] – процесс преобразования входных значений в выходные в меньшем объеме. Разница между входным значением и его квантованным значением называется ошибкой квантования.

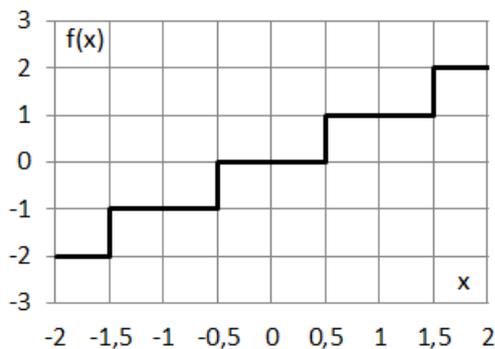
Графики квантователя (2) при $k = 1$ и при $k = 0,2$ на промежутке $x \in [-2, 2]$ представлены на рис. 1 (а), (б).

Как видно по рис. 1, при $k = 1$ расстояние между соседними квантованными значениями (уровнями) равно 1, а при $k = 0,2$ соответственно 0,2. При $k \rightarrow 0$ ступенчатые графики на рис. 1 трансформируются в обычные прямые линии.

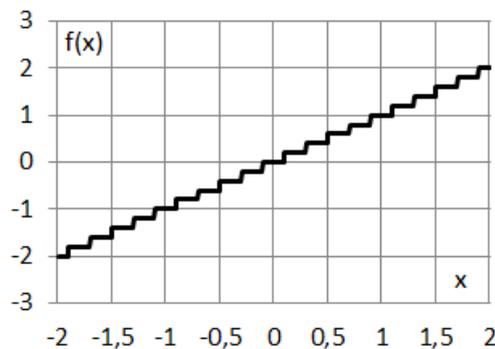
Функции (2) в настоящее время активно применяются при квантовании нейронных сетей (см., например, [15]). Интересная идея обсуждается в работе [16], в которой авторы предлагают следующее обобщение функции (2):

$$f(x) = k \left\lfloor \frac{x}{k} + b \right\rfloor, \quad (3)$$

где b – граница округления.



(а) $k=1$



(б) $k=0,2$

Рис. 1. Графики функции (2)

В [17] проведены теоретические исследования методов глубокого обучения нейронных сетей с использованием квантователя (2).

Используя квантователь (3), введем в рассмотрение неэлементарные линейные регрессии (НЛР) с квантованными объясняющими переменными:

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j k_j \left\lfloor \frac{x_{ij}}{k_j} + b_j \right\rfloor + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где y_i – наблюдаемое значение выходной переменной y под номером i ; x_{ij} – наблюдаемое значение входной переменной x_j под номером i ; n – общее количество наблюдаемых значений; l – общее количество входных переменных; $\alpha_j, j = \overline{0, l}$ – неизвестные параметры; $k_j > 0$ – неизвестный шаг квантования входной переменной x_j ; b_j – неизвестная граница округления входной переменной x_j ; ε_i – ошибка аппроксимации в i -м наблюдении.

Модель (4), как и все известные НЛР, относится к нелинейным по оцениваемым параметрам. Несколько упростим её. Будем рассматривать НЛР (4) с границами округления $b_j = 0,5, j = \overline{1, l}$, т.е. НЛР, в которой квантование переменных подразумевает округление до ближайшего целого значения:

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j k_j \left\lfloor \frac{x_{ij}}{k_j} + 0,5 \right\rfloor + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Шаги квантования $k_j, j = \overline{1, l}$ в НЛР (5) по определению положительны. Определимся с областью возможных значений шагов квантования. Сделаем это сначала для модели с одной объясняющей переменной вида:

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 k_1 \left\lfloor \frac{x_{i1}}{k_1} + 0,5 \right\rfloor + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Если в НЛР (6) операция $\left\lfloor \frac{x_{i1}}{k_1} + 0,5 \right\rfloor$ будет принимать одно и то же значение $\theta \in \mathbb{Z}$ для любого наблюдения i , то из-за вхождения в модель свободного члена α_0 возникнет совершенная мультиколлинеарность, из-за которой становится невозможно единственным образом идентифицировать МНК-оценки. Определим возможные значения шага квантования k_1 , при которых в регрессии (6) возникает совершенная мультиколлинеарность. Известно [10], что $\left\lfloor x \right\rfloor = \theta$ тогда и только тогда, когда

$$\theta \leq x < \theta + 1.$$

Тогда совершенная мультиколлинеарность в НЛР (6) возникает тогда, когда шаг квантования k_1 удовлетворяет системе линейных неравенств

$$\theta \leq \frac{x_{i1}}{k_1} + 0,5 < \theta + 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad k_1 > 0, \quad \theta \in \mathbb{Z}. \quad (7)$$

Пусть переменная x_1 принимает как положительные, так и отрицательные значения.

Очевидно, что при бесконечно больших значениях шага квантования k_1 , операция $\left\lfloor \frac{x_{i1}}{k_1} + 0,5 \right\rfloor$ будет равна нулю для любого i . Определим, начиная с какого значения k_1 это будет происходить. Для этого подставим в систему (7) $\theta = 0$. Получим

$$-0,5k_1 \leq x_{i1} < 0,5k_1, \quad i = \overline{1, n}, \quad k_1 > 0. \quad (8)$$

Очевидно, что всегда найдется число k_1 такое, что множество решений системы (8) не пусто. Из (8) следует, что операция $\left\lfloor \frac{x_{i1}}{k_1} + 0,5 \right\rfloor$ в любом наблюдении обращается в нуль, если

$$k_1 > \max \{ |2x_{11}|, |2x_{21}|, \dots, |2x_{n1}| \}. \quad (9)$$

Заметим, что неравенство (9) справедливо тогда, когда в операции $\max \{ |2x_{11}|, |2x_{21}|, \dots, |2x_{n1}| \}$ сработала компонента с положительным наблюдением переменной x_1 , иначе строгий знак неравенства в (9) нужно заменить на нестрогий.

Таким образом, верхнее ограничение на шаг квантования k_1 для НЛР (6), как следует из вышесказанного, имеет вид

$$k_1 \leq \max \{ |2x_{11}|, |2x_{21}|, \dots, |2x_{n1}| \} \quad \text{или} \quad k_1 < \max \{ |2x_{11}|, |2x_{21}|, \dots, |2x_{n1}| \}.$$

Далее будем использовать только первое неравенство с нестрогим знаком.

К сожалению, внутри промежутка $0 < k_1 \leq \max \{ |2x_{11}|, |2x_{21}|, \dots, |2x_{n1}| \}$ могут быть точки, удовлетворяющие системе (7), т.е. точки, в которых в модели (6) возникает совершенная мультиколлинеарность. Рассмотрим возможные случаи.

Случай № 1. Среди значений переменной x_1 есть как положительные, так и отрицательные. В таком случае множество решений системы (7) пусто для любого $\theta \neq 0$, поэтому внутри промежутка $0 < k_1 \leq \max \{ |2x_{11}|, |2x_{21}|, \dots, |2x_{n1}| \}$ отсутствуют точки с совершенной мультиколлинеарностью. Сюда же можно отнести случай, когда среди значений переменной x_1 есть хотя бы 1 нуль.

Случай № 2. Все значения переменной x_1 положительны. В этом случае система (7) может иметь решения при $\theta > 0$, которые можно записать в виде:

$$\max \left\{ \frac{x_{11}}{\theta + 0,5}, \dots, \frac{x_{n1}}{\theta + 0,5} \right\} < k_1 \leq \min \left\{ \frac{x_{11}}{\theta - 0,5}, \dots, \frac{x_{n1}}{\theta - 0,5} \right\}, \theta > 0, \theta \in \square. \quad (10)$$

Поэтому из промежутка $0 < k_1 \leq \max \{|2x_{11}|, |2x_{21}|, \dots, |2x_{n1}|\}$ нужно исключить точки, удовлетворяющие ограничениям (10).

Случай № 3. Все значения переменной x_1 отрицательны. В этом случае система (7) при $\theta < 0$ может иметь следующие решения:

$$\max \left\{ \frac{x_{11}}{\theta + 0,5}, \dots, \frac{x_{n1}}{\theta + 0,5} \right\} \leq k_1 < \min \left\{ \frac{x_{11}}{\theta - 0,5}, \dots, \frac{x_{n1}}{\theta - 0,5} \right\}, \theta < 0, \theta \in \square. \quad (11)$$

Следовательно, из промежутка $0 < k_1 \leq \max \{|2x_{11}|, |2x_{21}|, \dots, |2x_{n1}|\}$ нужно исключить точки, удовлетворяющие ограничениям (11).

В зависимости от конкретной ситуации, исходя из вышеуказанного, можно определить область возможных значений шага квантования k_1 в модели (6). Тогда для любой точки из этой области легко вычисляются МНК-оценки параметров α_0 и α_1 регрессии. Поэтому, взяв некоторое количество точек из области возможных значений параметра k_1 , оценив в каждой из них линейную относительно параметров α_0 и α_1 модель, и выбрав регрессию с минимальной величиной суммы квадратов ошибок, получим близкие к оптимальным оценки НЛР (6). Мера такой близости зависит от величины шага разбиения области значений параметра k_1 : чем меньше шаг, тем ближе оценки к оптимальным, но тем выше вычислительная сложность задачи. Таким образом, на основании вышеизложенного можно сформулировать следующий алгоритм приближенного МНК-оценивания параметров НЛР (5).

Шаг 1. Сформировать области возможных значений шагов квантования входных переменных. При этом:

- если среди значений j -й переменной есть как положительные, так и отрицательные, либо хотя бы одно нулевое значение, то область имеет вид

$$0 < k_j \leq \max \{|2x_{1j}|, |2x_{2j}|, \dots, |2x_{nj}|\}; \quad (12)$$

- если все значения j -й переменной положительны, то ограничение (12) требуется дополнить условиями

$$\max \left\{ \frac{x_{1j}}{\theta + 0,5}, \dots, \frac{x_{nj}}{\theta + 0,5} \right\} < k_j \leq \min \left\{ \frac{x_{1j}}{\theta - 0,5}, \dots, \frac{x_{nj}}{\theta - 0,5} \right\}, \theta > 0, \theta \in \square; \quad (13)$$

- если все значения j -й переменной отрицательны, то ограничение (12) следует дополнить условиями

$$\max \left\{ \frac{x_{1j}}{\theta + 0,5}, \dots, \frac{x_{nj}}{\theta + 0,5} \right\} \leq k_j < \min \left\{ \frac{x_{1j}}{\theta - 0,5}, \dots, \frac{x_{nj}}{\theta - 0,5} \right\}, \theta < 0, \theta \in \square.$$

Шаг 2. Выбрать в каждой области некоторое количество точек.

Шаг 3. Используя выбранные точки вместо шагов квантования переменных в (5), оценить с помощью МНК параметры всех возможных линейных регрессий (5).

Шаг 4. Выбрать лучшую модель, например, по величине коэффициента детерминации R^2 .

2. Вычислительные эксперименты. Вычислительные эксперименты проводились с использованием искусственно сгенерированных статистических данных, представленных в первых трех столбцах таблицы 1. Для оценивания параметров НЛР по предложенному алгоритму в эконометрическом пакете Gretl был написан специальный скрипт на языке hansl. При этом для округления значений использована встроенная функция floor.

Эксперимент № 1. Сначала по этим данным с помощью МНК была построена парная линейная регрессия вида:

$$\tilde{y} = -1,3139 + 1,4491x_1, \quad (14)$$

для которой $R^2 = 0,3994$.

Таблица 1. Статистические данные

y	x_1	x_2	$2,6 \left\lfloor \frac{x_1}{2,6} + \frac{1}{2} \right\rfloor$	$4,05 \left\lfloor \frac{x_2}{4,05} + \frac{1}{2} \right\rfloor$	$3,6 \left\lfloor \frac{x_1}{3,6} + \frac{1}{2} \right\rfloor$	$2,1 \left\lfloor \frac{x_2}{2,1} + \frac{1}{2} \right\rfloor$
2,61	7,1	6,33	7,8	8,1	7,2	6,3
12,96	7,3	15,145	7,8	16,2	7,2	14,7
4,15	4,8	9,462	5,2	8,1	3,6	10,5
13,79	7,1	11,902	7,8	12,15	7,2	12,6
8,55	5,9	9,523	5,2	8,1	7,2	10,5
5,11	5,3	12,636	5,2	12,15	3,6	12,6
14,26	11,3	10,375	10,4	12,15	10,8	10,5
1,27	2,9	6,016	2,6	4,05	3,6	6,3
6,34	8,3	6,117	7,8	8,1	7,2	6,3
14,33	6,6	14,366	7,8	16,2	7,2	14,7

Затем с помощью разработанного алгоритма оценивались параметры НЛР (6) с квантованной переменной x_1 . Поскольку все значения этой переменной положительны, то на первом шаге алгоритма область возможных значений шага квантования k_1 определялась из неравенств (12), (13). Перебирая различные комбинации переменной θ в (13), оказалось, что эта система неравенств решений не имеет. Тогда область возможных значений шага квантования

$$0 < k_1 \leq 22,6. \quad (15)$$

На втором шаге алгоритма на промежутке (15) равномерно были выбраны точки (начальное значение – 0,01, шаг – 0,01). На третьем шаге с помощью МНК оценивались параметры уже линейных регрессий (6). На рис. 2 представлен график зависимости полученных коэффициентов детерминации R^2 оцененных регрессий от шага квантования k_1 . Заметим, что промежуток (15) был взят несколько шире.

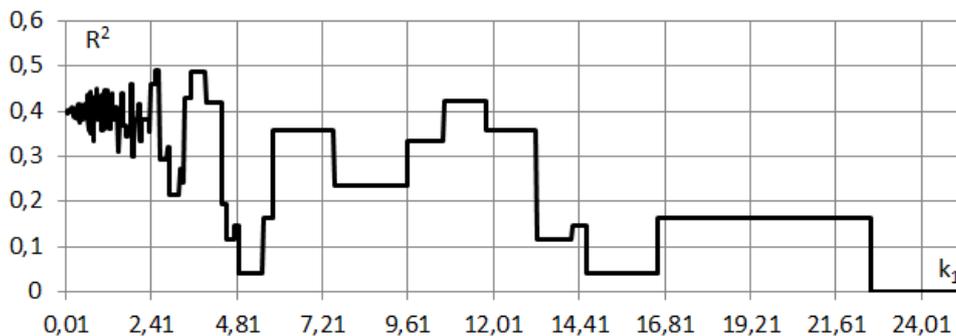


Рис. 2. Зависимость R^2 от k_1

По рис. 2 видно, что когда шаг квантования k_1 мал, то коэффициент детерминации НЛР (6) близок к коэффициенту линейной регрессии (14). На промежутке $0 < k_1 \leq 2,4$ частота изменения R^2 очень высока, а, начиная со значения 2,4, она постепенно снижается. Амплитуда же, наоборот, сначала низкая, а потом постепенно разрастается. При $k_1 > 22,6$ коэффициент детерминации равен 0, поскольку возникает совершенная мультиколлинеарность. Ни в каких других точках он в нуль не обращается. Полученные результаты подтверждают корректность вышеописанных математических рассуждений. Своё наибольшее значение 0,49021 коэффициент R^2 достигает на промежутке $2,52 \leq k_1 \leq 2,63$. При $k_1 = 2,6$ НЛР (6) имеет вид:

$$\tilde{y} = -2,7366 + 1,6381 \left[\frac{x_1}{2,6} + 0,5 \right].$$

Значения квантователя $2,6 \left[\frac{x_1}{2,6} + 0,5 \right]$ представлены в четвертом столбце табл. 1. Тем самым, при квантовании переменной x_1 удалось повысить качество линейной регрессии (14) по коэффициенту детерминации с 0,3994 до 0,49021.

Эксперимент № 2. Аналогичным образом строились зависимости y от x_2 . Оцененная с помощью МНК парная линейная регрессия имеет вид

$$\tilde{y} = -3,092 + 1,1219x_2, \tag{16}$$

а её коэффициент $R^2 = 0,5358$.

Область возможных значений шага квантования k_2 также определялась из неравенств (12), (13). Но в этот раз оказалось, что система (13) имеет решения

$$\theta = 1, \quad 10,097 < k_2 \leq 12,032.$$

Поэтому область возможных значений шага квантования

$$k_2 \in (0, 10,097] \cup (12,032, 30,29). \tag{17}$$

На промежутке (17) равномерно были выбраны точки (начальное значение – 0,01, шаг – 0,01). График зависимости полученных коэффициентов детерминации R^2 оцененных линейных регрессий от шага квантования k_2 представлен на рис. 3.

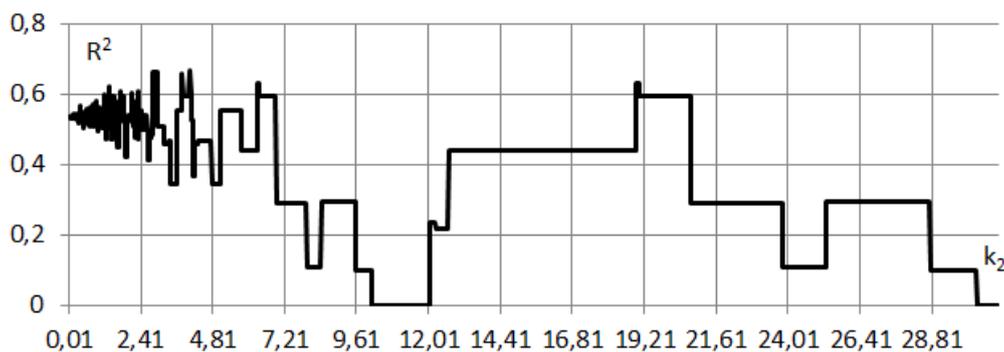


Рис. 3. Зависимость R^2 от k_2

По рис. 3 видно, что коэффициент детерминации оказался равен 0 в точках, не принадлежащих промежутку (17). Полученные результаты вновь согласуются с описанной выше математической теорией. Своё наибольшее значение 0,66779 коэффициент R^2 достигает на промежутке $4,02 \leq k_2 \leq 4,07$. При $k_2 = 4,05$ НЛР имеет вид:

$$\tilde{y} = -2,9445 + 1,0714 \left\lfloor \frac{x_2}{4,05} + 0,5 \right\rfloor.$$

Значения квантователя $4,05 \left\lfloor \frac{x_2}{4,05} + 0,5 \right\rfloor$ представлены в пятом столбце табл. 1. Тем самым, при квантовании переменной x_2 удалось повысить качество линейной регрессии (16) по коэффициенту детерминации с 0,5358 до 0,6678.

Эксперимент № 3. Строились зависимости y от x_1 и x_2 . Сначала была получена модель множественной линейной регрессии вида:

$$\tilde{y} = -9,9341 + 1,2194x_1 + 0,9963x_2, \quad (18)$$

для которой $R^2 = 0,811975$.

Для построения НЛР (5) с квантованными переменными x_1 и x_2 были использованы те же области возможных шагов квантования (15) и (17). На этих промежутках равномерно были выбраны точки (начальное значение – 0,1, шаг – 0,1). Решив переборную задачу, была получена следующая НЛР:

$$\tilde{y} = -11,679 + 1,406 \left\lfloor \frac{x_1}{3,6} + 0,5 \right\rfloor + 1,038 \left\lfloor \frac{x_2}{2,1} + 0,5 \right\rfloor,$$

для которой $R^2 = 0,924549$.

Значения квантователей $3,6 \left\lfloor \frac{x_1}{3,6} + 0,5 \right\rfloor$ и $2,1 \left\lfloor \frac{x_2}{2,1} + 0,5 \right\rfloor$ представлены в шестом и седьмом столбцах табл. 1. Как видно, при квантовании переменных x_1 и x_2 удалось повысить качество линейной регрессии (18) по коэффициенту детерминации с 0,811975 до 0,924549.

Заключение. В статье предложены и исследованы неэлементарные линейные регрессии с квантованными объясняющими переменными. Результаты исследований позволили разработать алгоритм приближенного МНК-оценивания параметров предложенных моделей. Применение разработанного алгоритма при обработке искусственно сгенерированных статистических данных показало, что при квантовании объясняющих переменных качество регрессионных моделей может ощутимо улучшаться.

К сожалению, разработанный и описанный в статье алгоритм не гарантирует нахождения оптимальных МНК-оценок и шагов квантования переменных в неэлементарной линейной регрессии. Однако области возможных значений неизвестных параметров удалось идентифицировать однозначно, поэтому при разбиении этих областей как можно большим количеством точек будет получаться решение, мало отличающееся от оптимального. Таким образом, разработанный в статье математический и алгоритмический аппарат можно успешно применять для решения реальных прикладных задач анализа данных в различных предметных областях. Для этого, в первую очередь, возникает необходимость в разработке вместо скрипта пакета Gretl специализированного программного обеспечения, имеющего интерфейс. Научный интерес вызывает проведение сравнительного анализа качества решения конкретных задач моделирования с использованием разработанных ранее неэлементарных линейных регрессий (с операциями минимум, максимум и модуль) и новых спецификаций (с операциями пол и потолок).

Список источников

1. Arkes J. Regression analysis: a practical introduction. London, Routledge, 2023, 412 p.
2. Исмагилов И.И. Классификация регрессионных моделей и метод построения линейных нечётких регрессий / И.И. Исмагилов, Г. Алсаид // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы, 2023. – № 2. – С. 130-138.
3. Голованов А.А. Регрессионный анализ данных на основе метода наименьших модулей в динамических задачах оценивания / А.А. Голованов, А.Н. Тырсин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2023. – Т. 89. – № 5. – С. 71-80.
4. Бочаров Д.А. Метод линейной регрессии, устойчивый к экстремальным стационарным помехам / Д.А. Бочаров // Сенсорные системы, 2020. – Т. 34. – № 1. – С. 44-56.
5. Farghali R.A., Qasim M., Kibria B.G., Abonazel M.R. Generalized two-parameter estimators in the multinomial logit regression model: methods, simulation and application. Communications in statistics-simulation and computation, 2023, vol. 52, no. 7, pp. 3327-3342, DOI:10.1080/03610918.2021.1934023.
6. Базилевский М.П. Метод построения неэлементарных линейных регрессий на основе аппарата математического программирования / М.П. Базилевский // Проблемы управления, 2022. – № 4. – С. 3-14.
7. Базилевский М.П. Обобщение неэлементарных линейных регрессий / М.П. Базилевский // Моделирование и анализ данных, 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 85-98.
8. Базилевский М.П. Оценивание модульных линейных регрессионных моделей с помощью метода наименьших модулей / М.П. Базилевский, А.Б. Ойдопова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2023. – № 45. – С. 130-146.
9. Базилевский М.П. Программное обеспечение для оценивания модульных линейных регрессий / М.П. Базилевский // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 3 (31). – С. 136-146.
10. Грэхем Р. Конкретная математика. Основание информатики: пер. с англ. / Р. Грэхем, Д. Кнут, О. Паташник. – М.: Мир, 1998. – 703 с.
11. Iverson K.E. A programming language. Proceedings of the May 1-3: Spring joint computer conference, 1962, pp. 345-351.
12. Трапезников С.С. Целая и дробная часть числа / С.С. Трапезников, Г.С. Изергина // Краевая научно-практическая конференция «Прикладные и фундаментальные вопросы математики». – Пермь, 2014. – 30 с.
13. Марьев А.А. Методы и устройства цифровой обработки сигналов. Дискретизация. Квантование. Цифровой анализ сигналов / А.А. Марьев. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – 132 с.
14. Малыгин И.Г. Высокоскоростной алгоритм передачи видеoinформации о чрезвычайных ситуациях на объектах транспорта / И.Г. Малыгин, О.А. Королев // Морские интеллектуальные технологии, 2021. – Т. 1. – № 1. – С. 64-70.
15. Louizos C., Reisser M., Blankevoort T. et al. Relaxed quantization for discretized neural networks. arXiv preprint, 2018, available at: <https://arxiv.org/pdf/1810.01875>(accessed: 05/12/2024).
16. Li Z., Guo C., Zhu Z. et al. Efficient adaptive activation rounding for post-training quantization. arXiv preprint, 2022, available at: <https://arxiv.org/pdf/2208.11945> (accessed: 05/12/2024).
17. Li H., De S., Xu Z. et al. Training quantized nets: a deeper understanding. Advances in neural information processing systems, 2017, vol. 30, available at: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/file/1c303b0eed3133200cf715285011b4e4-Paper.pdf> (accessed: 05/12/2024).

Базилевский Михаил Павлович. Доцент, к.т.н., Иркутский государственный университет путей сообщения, AuthorID:679277, SPIN:4347-5028, ORCID:0000-0002-3253-5697, mik2178@yandex.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского д. 15.

UDC 519.862.6

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.005

Ordinary least squares estimation of non-elementary linear regressions parameters with uniformly quantized explanatory variables

Mikhail P. Bazilevskiy

Irkutsk state transport university,

Russia, Irkutsk, *mik2178@yandex.ru*

Abstract. This article is devoted to the development of a new structural specification of regression models. Previously, the author introduced non-elementary linear regressions, in which explanatory variables are transformed using such non-elementary operations as minimum, maximum and modulus. In this article, to transform explanatory variables in a regression model, it is proposed to use the operations of rounding their values to the nearest integer downwards (floor) or up (ceiling). In mathematics and digital signal processing, this conversion process is called quantization. The well-known uniform quantizer with a rounding boundary of 0.5 is considered. A non-elementary linear regression with quantized explanatory variables is proposed. The ranges of possible values of quantization steps size for a model with one explanatory variable are determined. Based on this, an algorithm has been developed for approximate estimation using the ordinary least squares method of the proposed structural specification parameters. Using artificially generated statistical data in the Gretl package, computational experiments were carried out that confirmed the correctness of the above mathematical reasoning. All non-elementary linear regressions with quantized variables obtained during the experiments turned out to be more adequate than classical linear regressions.

Keywords: regression analysis, non-elementary linear regression, rounding, floor, ceiling, quantization, quantizer, ordinary least squares method, multicollinearity.

References

1. Arkes J. Regression analysis: a practical introduction. London: Routledge, 2023, 412 p.
2. Ismagilov I.I., Alsaied Gh. Klassifikatsiya regressionnykh modeley i metod postroeniya lineynykh nechetkikh regressiy [Classification of regression models and a method for constructing linear fuzzy regressions]. Innovatsionnaya ekonomika: informatsiya, analitika, prognozy [Innovative economy: information, analysis, prognoses], 2023, no. 2, pp. 130-138.
3. Golovanov A.A., Tyrsin A.N. Regressionnyy analiz dannykh na osnove metoda naimen'shikh moduley v dinamicheskikh zadachakh otsenivaniya [Regression analysis of data based on the method of least absolute deviations in dynamic estimation problems]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials], 2023, vol. 89, no. 5, pp. 71-80.
4. Bocharov D.A. Metod lineynoy regressii, ustoychivyy k ekstremal'nym stacionarnym pomekham [A linear regression method robust to extreme stationary clutter]. Sensornye sistemy [Sensory Systems], 2020, vol. 34, no. 1, pp. 44-56.
5. Farghali R.A., Qasim M., Kibria B.G., Abonazel M.R. Generalized two-parameter estimators in the multinomial logit regression model: methods, simulation and application. Communications in statistics-simulation and computation, 2023, vol. 52, no. 7, pp. 3327-3342, DOI:10.1080/03610918.2021.1934023.
6. Bazilevskiy M.P. Metod postroeniya neelementarnykh lineynykh regressiy na osnove apparata matematicheskogo programmirovaniya [A method for constructing nonelementary linear regressions based on mathematical programming]. Problemy upravleniya [Control sciences], 2022, no. 4, pp. 3-14.
7. Bazilevskiy M.P. Obobshchenie neelementarnykh lineynykh regressiy [Generalization of non-elementary linear regressions]. Modelirovanie i analiz dannykh [Modeling and Data Analysis], 2023, vol. 13, no. 2, pp. 85-98.
8. Bazilevskiy M.P., Oydopova A.B. Otsenivanie modul'nykh lineynykh regressionnykh modeley s pomoshch'yu metoda naimen'shikh moduley [Estimation of modular linear regression models using the least absolute deviations]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya [Bulletin of Perm national research polytechnic university. Electrotechnics, informational technologies, control systems], 2023, no. 45, pp. 130-146.
9. Bazilevskiy M.P. Programnoe obespechenie dlya otsenivaniya modul'nykh lineynykh regressiy [Software for estimating modular linear regressions]. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 3 (31), pp. 136-146.
10. Graham R.L., Knuth D.E., Patashnik O. Konkretnaya matematika. Osnovanie informatiki [Concrete mathematics. A foundation for computer science]. Moscow, Mir [Worlds], 1998, 703 p.

11. Iverson K.E. A programming language. Proceedings of the May 1-3: Spring joint computer conference, 1962, pp. 345-351.
12. Trapeznikov S.S., Izergina G.S. Tselaya i drobnaya chast' chisla [Integer and fractional part of a number]. Kraevaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Prikladnye i fundamental'nye voprosy matematiki» [Regional scientific and practical conference «Applied and fundamental issues of mathematics»], Perm, 2014, 30 p.
13. Mar'ev A.A. Metody i ustroystva tsifrovoy obrabotki signalov. Diskretizatsiya. Kvantovanie. Tsifrovoy analiz signalov [Methods and devices of digital signal processing. Sampling. Quantization. Digital signal analysis]. Rostov-na-Donu – Taganrog, YuFU Publ., 2020, 132 p.
14. Malygin I.G., Korolev O.A. Vysokoskorostnoy algoritm peredachi videoinformatsii o chrezvychaynykh situatsiyakh na ob"ektakh transporta [High-speed algorithm for transmitting video information about emergency situations on transport objects]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies], 2021, vol. 1, no. 1, pp. 64-70.
15. Louizos C., Reisser M., Blankevoort T. et al. Relaxed quantization for discretized neural networks. arXiv preprint, 2018, available at: <https://arxiv.org/pdf/1810.01875> (accessed: 05/12/2024).
16. Li Z., Guo C., Zhu Z. et al. Efficient adaptive activation rounding for post-training quantization. arXiv preprint, 2022, available at: <https://arxiv.org/pdf/2208.11945> (accessed: 05/12/2024).
17. Li H., De S., Xu Z. et al. Training quantized nets: a deeper understanding. Advances in neural information processing systems, 2017, vol. 30, available at: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/file/1c303b0eed3133200cf715285011b4e4-Paper.pdf> (accessed: 05/12/2024).

Bazilevskiy Mikhail Pavlovich. Associate professor, candidate of technical sciences, Irkutsk state transport university, AuthorID:679277, SPIN:4347-5028, ORCID:0000-0002-3253-5697, mik2178@yandex.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevskogo St., 15.

Статья поступила в редакцию 13.05.2024; одобрена после рецензирования 27.11.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 05/13/2024; approved after reviewing 11/27/2024; accepted for publication 12/17/2024.

УДК 621.314.3

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.006

Моделирование подсистемы управления механизмом подъема ковша шагающего экскаватора

Дунаев Михаил Павлович, Довудов Сарфароз Умедович

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, *mdunaev10@mail.ru*

Аннотация. В статье представлена функциональная схема подсистемы управления механизмом подъема ковша шагающего экскаватора. Разработаны структурно-параметрические модели электроприводов переменного тока экскаватора с системой импульсно-фазового управления и системой частотно-импульсного управления. Проведено моделирование электроприводов переменного тока экскаватора с системой импульсно-фазового управления и системой частотно-импульсного управления в среде Matlab/Simulink. Приведено сравнение результатов моделирования систем управления.

Ключевые слова: подсистема управления, механизм подъема, электропривод, моделирование

Цитирование: Дунаев М.П. Моделирование подсистемы управления механизмом подъема ковша шагающего экскаватора / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 57-64 – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.006.

Введение. Производственные комплексы по добыче минерального сырья, включающие мощные шагающие экскаваторы разных типов, составляют важную часть современного промышленного оборудования производственных и транспортных систем [1]. Производительность промышленного оборудования производственных систем во многом зависит от качества управления электроприводами (ЭП) переменного тока, являющимися основой силового электрооборудования шагающих экскаваторов (ШЭ) и управляемыми с помощью современных полупроводниковых приборов – IGBT-транзисторов и силовых полупроводниковых модулей [2-4].

В настоящее время самыми востребованными способами управления ЭП переменного тока механизма подъема ковша шагающего экскаватора по праву можно считать способы управления с применением непосредственных преобразователей частоты (НПЧ), реализующих импульсно-фазовое управление (ИФУ), и двухзвенных преобразователей частоты (ДПЧ) с широтно-импульсным управлением (ШИУ), которые могут обеспечить необходимые параметры управления электроприводами переменного тока механизма подъема ковша шагающего экскаватора [5-8].

Тем не менее у способа управления непосредственными преобразователями частоты с ИФУ можно отметить ряд недостатков, касающихся его эффективности: сравнительно низкое быстродействие системы управления, сравнительно низкий коэффициент мощности, значительные искажения формы напряжения питающей сети [9]. Способ двухзвенных преобразователей частоты с ШИУ также имеет ряд недостатков, а именно: сравнительно низкий коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя и значительные потери мощности при включении и выключении полупроводниковых ключей автономного инвертора напряжения (АИН), входящего в состав двухзвенных преобразователей частоты [10-18].

Повышению эффективности ЭП переменного тока может способствовать применение в двухзвенных преобразователях частоты АИН с частотно-импульсным управлением [19-22].

Однако следует отметить, что этот способ управления электроприводами переменного тока механизма подъема ковша шагающего экскаватора до сих пор полностью не изучен.

Моделирование электропривода механизма подъема ковша шагающего экскаватора. На рис.1 приведена разработанная функциональная схема электроприводов подъема ковша шагающего экскаватора переменного тока, где обозначено: БЗС – блок задания угловой

скорости, РС – регулятор скорости, РТ – регулятор тока, БТО – блок токоограничения, НПЧ – непосредственный преобразователь частоты, АД – два асинхронных двигателя, МП – механизм подъема ковша, ДТ – датчик тока, ДС – датчик скорости.

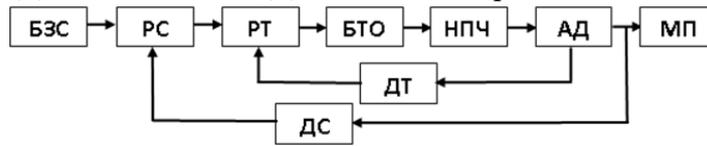


Рис. 1. Функциональная схема электропривода подъема шагающего экскаватора переменного тока

Структурно-параметрическая модель подсистемы управления электроприводами механизмом подъема ковша шагающего экскаватора с непосредственным преобразователем частоты, реализованная в системе Matlab/Simulink, представлена на рисунке 2, а переходные процессы показаны на рисунке 3.

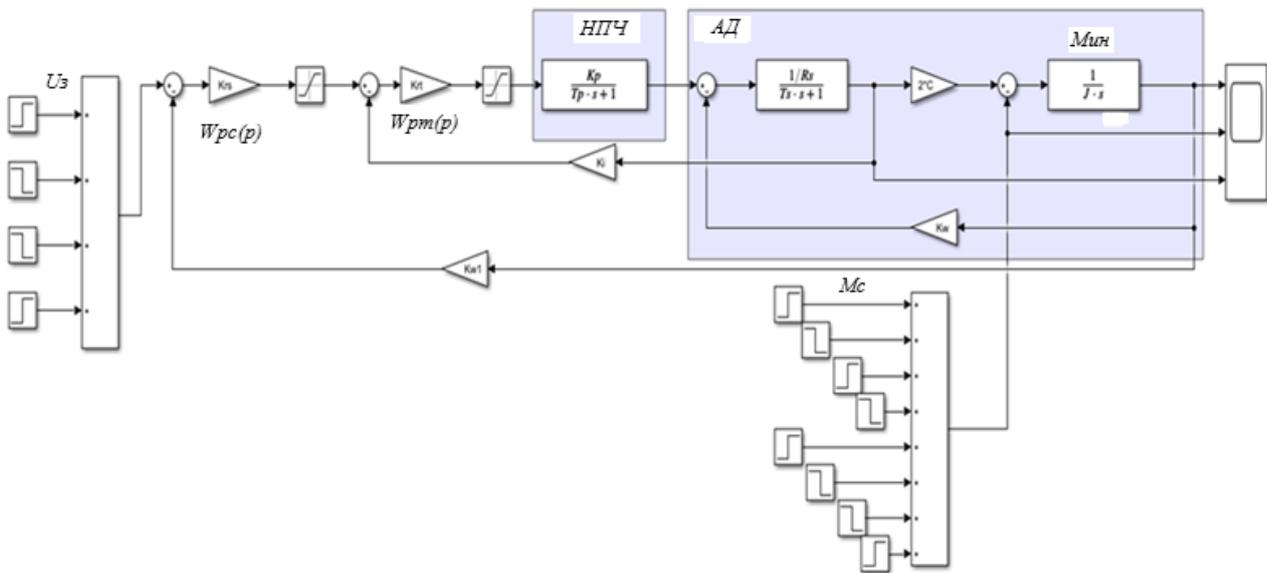


Рис. 2. Структурно-параметрическая модель электропривода подъема ковша шагающего экскаватора с непосредственным преобразователем частоты

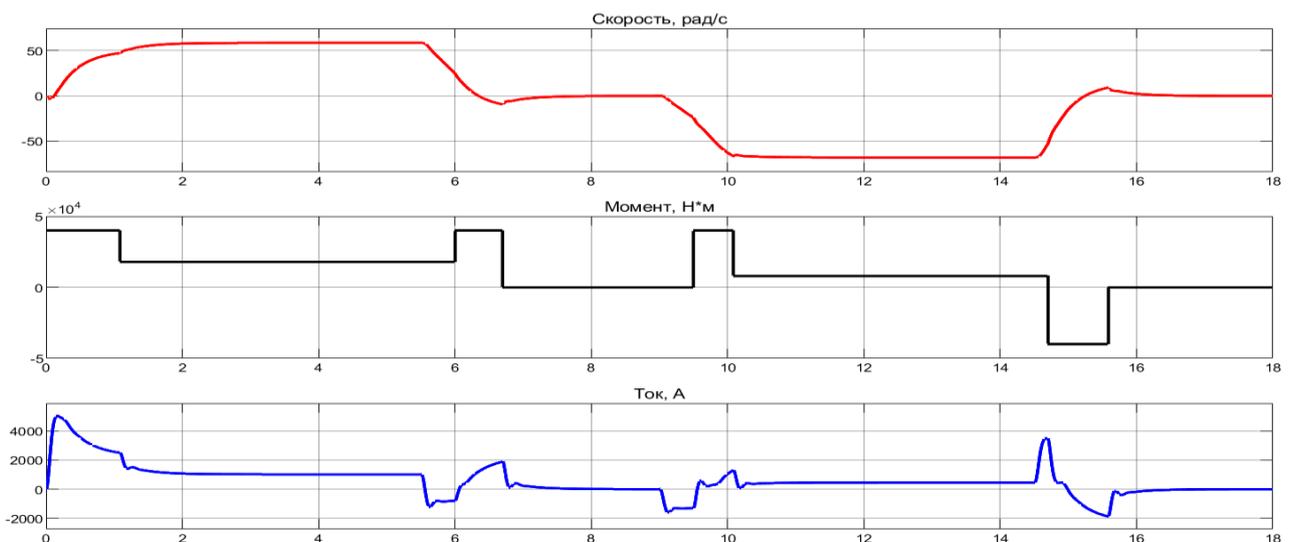


Рис. 3. Переходные процессы в модели электропривода механизма подъема ковша шагающего экскаватора с непосредственным преобразователем частоты

Для получения максимальной производительности работы электроприводов подъема ковша шагающего экскаватора переменного тока проведем замену блока непосредственного преобразователя частоты на двухзвенных преобразователях частоты с частотно-импульсным управлением.

Структурно-параметрическая модель подсистемы управления электроприводом механизма подъема ковша шагающего экскаватора с частотно-импульсным управлением, реализованная в системе Matlab/Simulink, представлена на рисунке 4, а переходные процессы показаны на рисунке 5.

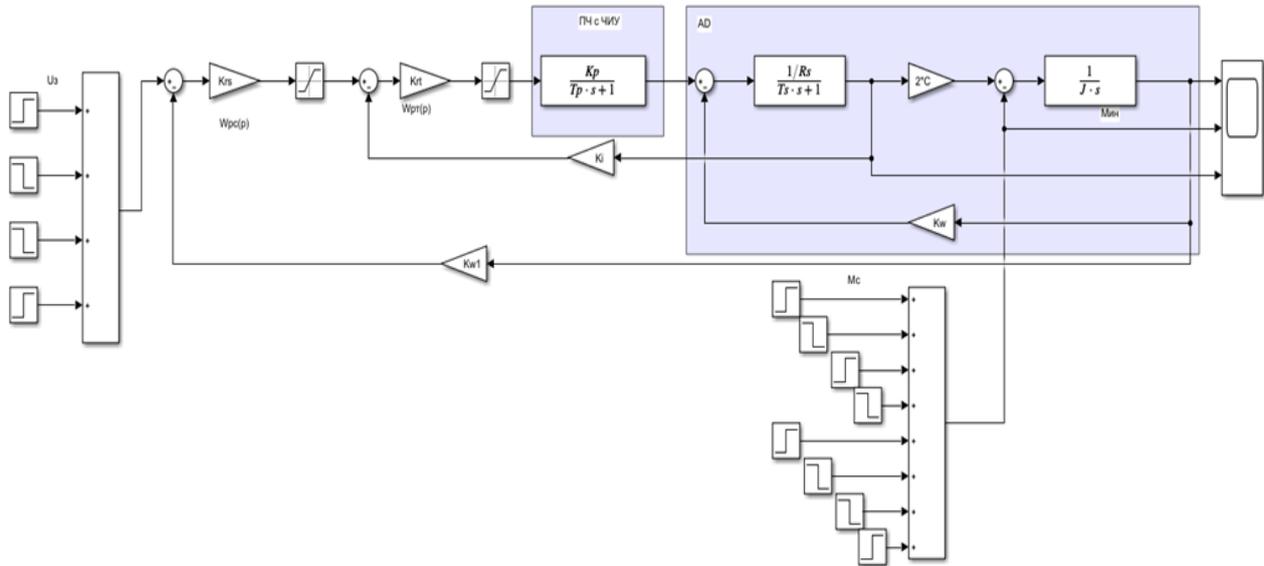


Рис. 4. Структурно-параметрическая модель электропривода подъема ковша шагающего экскаватора с частотно-импульсным управлением

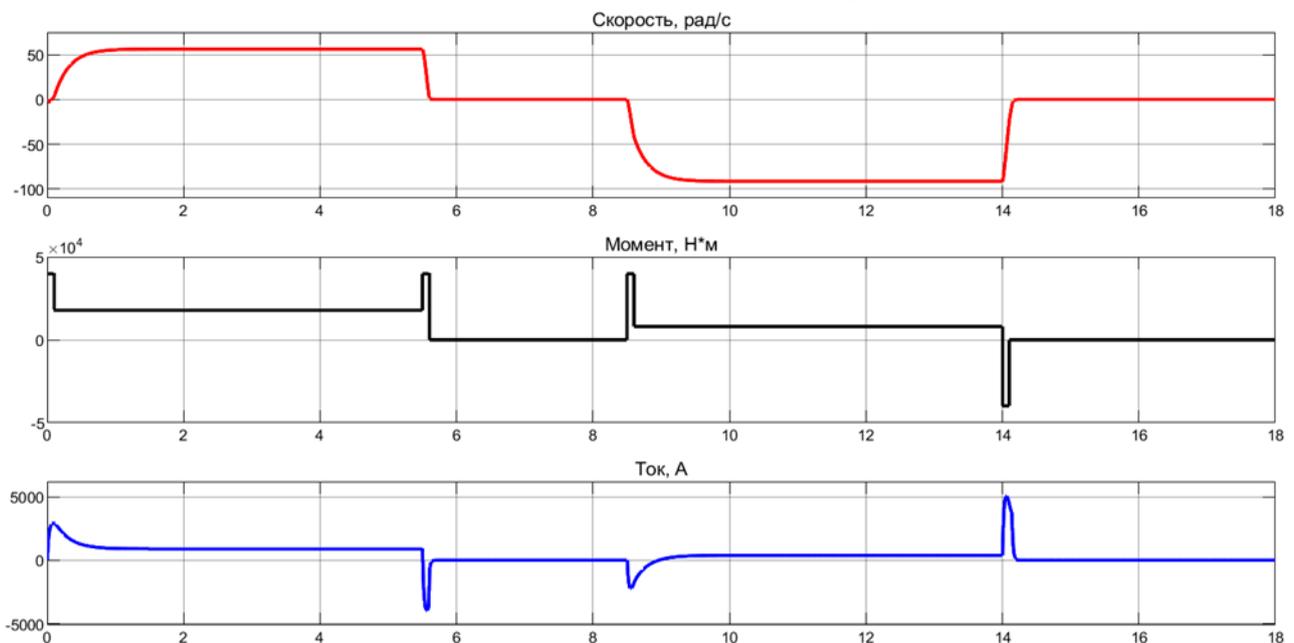


Рис. 5. Переходные процессы в модели электропривода механизма подъема ковша шагающего экскаватора с частотно-импульсным управлением

Сравнение результатов моделирования угловой скорости электропривода механизма подъема шагающего экскаватора с непосредственным преобразователем частоты (рисунок 3) и двухзвенного преобразователя частоты с частотно-импульсным управлением (рисунок 5) показывает, что способ частотно-импульсного управления за счет ускорения динамических процессов в механизме подъема обеспечивает сокращение цикла работы ШЭ на 1,8 с, что увеличивает производительность работы шагающего экскаватора на 11 %.

Формализованное описание способа частотно-импульсного управления можно представить следующим образом. Модулируемый сигнал при частотно-импульсном управлении (ЧИУ) является синусоидальным и определяется уравнением (1):

$$y(t) = k_p \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{\sin} \cdot t), \quad (1)$$

где k_p – регулировочный коэффициент паузы; f_{\sin} – частота модулируемого сигнала.

Максимальная длительность паузы при ЧИУ наблюдается на краях полупериода и её можно определить соотношением (2):

$$t_{\text{пауз.макс}} = \frac{T_{\sin}}{u \cdot f_{\sin}}, \quad (2)$$

где T_{\sin} – период сигнала при ЧИУ; u – регулировочный коэффициент по напряжению.

Количество импульсов при ЧИУ, приходящихся на четверть периода модулируемого сигнала, определяется как соотношение (3):

$$n = m + 1, \quad (3)$$

Длительность пауз для каждого периода определяется выражением (4):

$$t_{\text{пауза.i}} = t_{\text{пауз.макс}} - k_p \cdot \sin\left(\frac{i \cdot n}{360}\right) \cdot t_{\text{пауз.макс}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{пауз.макс}}$ – максимальная длительность паузы и i – номер периода при ЧИУ.

Длительность импульса для получения кратного периода определяется следующим выражением (5):

$$t_{\text{импульса}} = \frac{1}{4 \cdot f_{\sin}} - \sum_{i=0}^n t_{\text{пауза.i}}. \quad (5)$$

Длительность импульса при ЧИУ остается постоянной, а длительность паузы и периодов изменяется по синусоидальному закону.

Длительности i -тых периодов можно рассчитать по выражению (6):

$$T_{\text{период.i}} = t_{\text{импульса}} + t_{\text{пауза.i}}. \quad (6)$$

Расчетные точки для четверти периода определяются формулами (7) и (8):

$$T_1 = \sum_{i=0}^m (T_{\text{период.i}}) + (t_{\text{импульса}}), \quad (7)$$

$$T_2 = \sum_{i=0}^m (T_{\text{период.i}}). \quad (8)$$

Используя формулы (7) и (8), можно описать цикл для формирования импульсов управления при ЧИУ. Чтобы получить график формирования импульсов при ЧИУ на полный период, удобно использовать программный пакет Matlab/Simulink.

Исследования, проведенные с помощью модели электропривода механизма подъема ковша шагающего экскаватора с ЧИУ (рисунок 6), показали высокие статические и динамические характеристики данной системы: статическая ошибка $\delta=10\%$; время переходного процесса при пуске $t_{\text{пн}}=0,51\text{ с}$; максимальное перерегулирования $\sigma_{\text{макс}} < 4,3\%$.

На рисунке 6 показана имитационная модель ЭП механизма подъема шагающего экскаватора, использующего двухзвенный преобразователь частоты с ЧИУ.

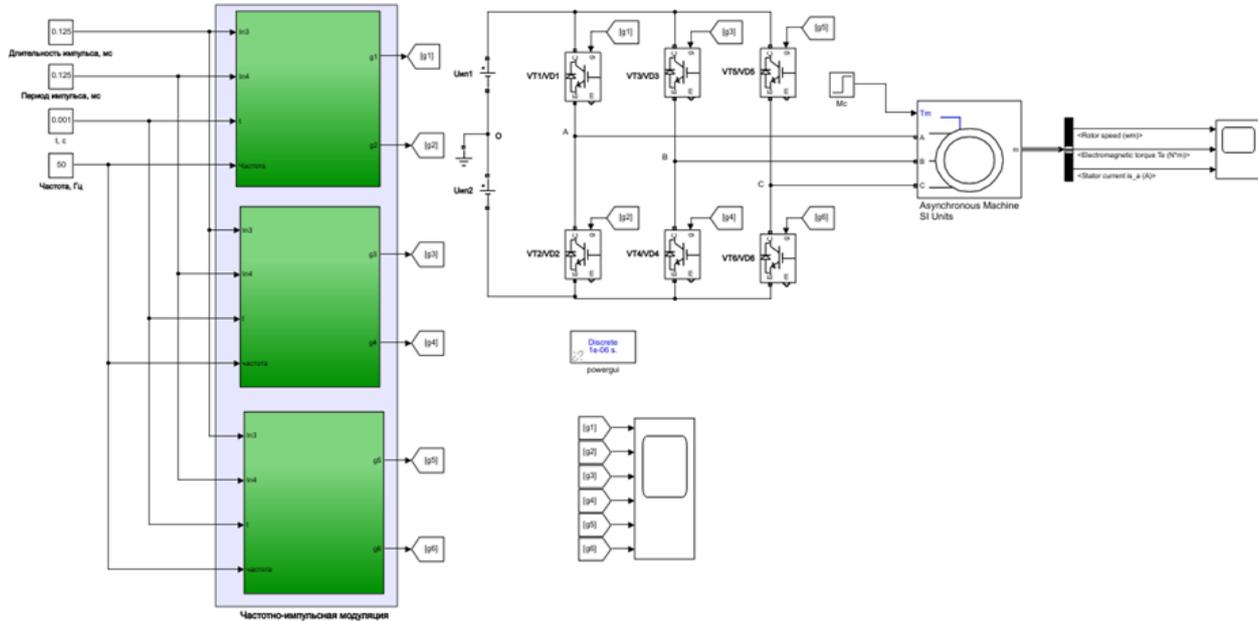


Рис. 6. Модель электропривода механизма подъема шагающего экскаватора, использующего двухзвенный преобразователь частоты с ЧИУ

Характеристики, полученные при моделировании работы электропривода механизма подъема шагающего экскаватора, использующего двухзвенный преобразователь частоты с ЧИУ (рисунок 7), свидетельствуют об устойчивости работы данного оборудования. Пуск электропривода механизма подъема шагающего экскаватора производится на холостом ходу и завершается за 0,3 с. После того, как угловая скорость достигает установившегося значения, происходит наброс нагрузки и скорость уменьшается на 4,5 %, оставаясь при этом стабильной.

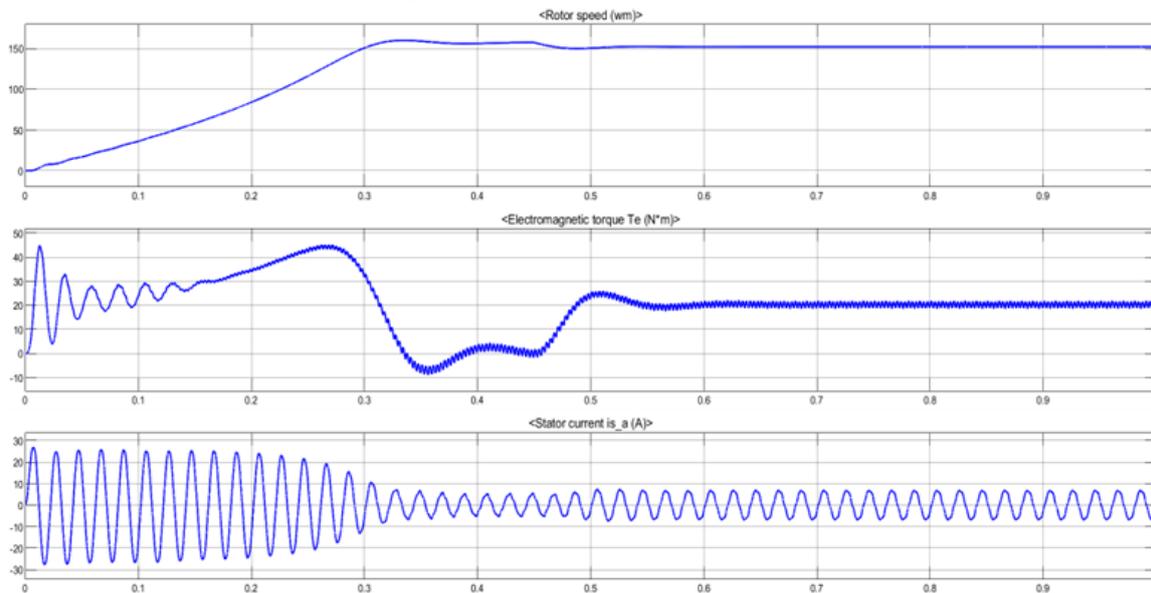


Рис. 7. Диаграммы сигналов имитационной модели электропривода механизма подъема шагающего экскаватора с ЧИУ

Исследования на имитационной модели (рисунок 6) показали, что применение двухзвенного преобразователя частоты с ЧИУ приводит к снижению динамических потерь в электроприводе механизма подъема ШЭ по сравнению с электроприводом, использующего двухзвенный преобразователь частоты с ШИУ на 40 %, т.к. мощность динамических потерь прямо пропорциональна частоте коммутации [3, 12].

Заключение. Проанализировано современное состояние разработок в области электропривода переменного тока механизма подъема ковша шагающего экскаватора и предложен способ повышения производительности шагающего экскаватора. Разработана функциональная модель электропривода переменного тока механизма подъема ковша шагающего экскаватора, использующего двухзвенный преобразователь частоты с ЧИУ, позволяющая определять динамические характеристики электропривода механизма подъема ковша шагающего экскаватора. Реализована имитационная модель электропривода механизма подъема ковша шагающего экскаватора с ЧИУ в среде Matlab/Simulink. Показано, что использование двухзвенного преобразователя частоты с ЧИУ за счет ускорения динамических процессов в механизме подъема обеспечивает сокращение цикла работы шагающего экскаватора на 1,8 с, что увеличивает производительность его работы на 11 %.

Список источников

1. Кругликов О.В. Разработка, производство и применение энергоэффективных электрических машин и приводов / О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров, С.В. Пискунов // *Электротехника*, 2015. – № 3. – С. 4-8.
2. Жемеров Г.Г. Расчет мощности потерь и температуры структуры транзисторно-диодных модулей при компьютерном моделировании преобразователей / Г.Г. Жемеров, В.В. Ивахно, О.И. Ковальчук. // *Электротехника и электромеханика*, 2011. – № 4. – С. 21-28. – ISSN 2074-272X.
3. Дунаев М.П. Моделирование потерь мощности в преобразователе частоты / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // *Электротехнические системы и комплексы*, 2021. – № 2(51). – С. 45-51.
4. Герман-Галкин С.Г. Широтно-импульсные преобразователи / С.Г. Герман-Галкин. – Л.: Энергия, 1979. – 96 с.
5. Ahcene Bouzida, Radia Abdelli, Ouadah M'hamed Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. 8th International conference on modelling, identification and control (ICMIC-2016) Algiers, Algeria- November 15-17, 2016, pp 768-773.
6. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of semiconductor switching losses under hard switching using Matlab/Simulink Subsystem. *Electrical, control and communication engineering*, 2013, vol. 2, iss. 1, pp. 20-26.
7. Plakhtii O.A., Nerubatskyi V.P., Hordiienko D.A. et al. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 2020, (2): 82-88, DOI:10.33271/nvngu/2020-82.
8. Kaixin Wei, Chengning Zhang, Xuelian Gong, Tieyu Kang. The IGBT Losses analysis and calculation of inverter for two-seat electric aircraft application. *Energy procedia*, 2017, vol. 105, pp. 2623-2628, ISSN 1876-6102.
9. Дунаев М.П. Резонансные инверторы для управления электроприводами / М.П. Дунаев. – Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2004. – 103 с.
10. Bai Baodong and Chen Dezhi, Inverter IGBT loss analysis and calculation 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Cape Town, 2013, pp. 563-569, DOI:10.1109/ICIT.2013.6505733.
11. Feix G., Dieckerhoff S., Allmeling J., Schonberger J. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses, 2009 13th European conference on power electronics and applications, Barcelona, 2009, pp. 1-8.
12. Дунаев М.П. Сравнение энергоэффективности схем автономных инверторов напряжения с синусоидальной широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // *Электротехнические системы и комплексы*, 2021. – № 4(53). – С. 50-55.
13. Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. Energy characteristics the autonomous voltage inverter with the pulse-frequency modulation. International scientific conference "FarEastCon" / 6-9 October 2020, Far Eastern Federal university, Vladivostok.
14. Blinov A. et al. Loss calculation methods of half-bridge square-wave inverters. *Elektronika ir elektrotehnika*, 2011, 113(7), DOI:10.5755/j01.eee.113.7.604.
15. Alemi P., Lee D. Power loss comparison in two- and three-level PWM converters. 8th International conference on power electronics - ECCE Asia, Jeju, 2011, pp. 1452-1457.

16. Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Вестник ИрГТУ, 2020. – №2. – С. 345-355.
17. Shirahama H., Muto T. A novel power loss calculation method for power converters by transforming switching-loss into impulse-waveforms. 2018 21st International conference on electrical machines and systems (ICEMS), Jeju, 2018, pp. 2226-2229.
18. Zhu Y, Xiao M, Su X. et al. Modeling of conduction and switching losses for IGBT and FWD based on SVPWM in automobile electric drives. Applied sciences. 2020, 10(13):4539, DOI:10.3390/app10134539
19. Дунаев М.П. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией / М.П. Дунаев, С.У. Довудов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. – № 2(18). – С.134-143.
20. Sharifov B., Gulyamov K., Yunusov R., et al. The mathematical model of pulse width modulation frequency converter. Proceedings of the 2021 Ural-siberian smart energy conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13–15 November 2021, Novosibirsk, 2021, pp. 81-84.
21. Dovudov S.U., Dunaev M.P., Zhiravetska A. et al. Analysis and comparison of energy indices of dc-dc pulse converters. Przegląd elektrotechniczny, 2022, vol. 98, no 6, pp. 99-103.
22. Dunaev, M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. of losses in autonomous inverter circuits with pulse-width and pulse-frequency modulation. Computational technologies, 2022, vol. 27, no 5, pp. 5-13.

Дунаев Михаил Павлович. Доктор технических наук, профессор, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, AuthorID:315898, ORCID:0000-0002-1523-5553, mdunaev10@mail.ru, 664074, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия.

Довудов Сарфароз Умедович. Ассистент Иркутского национального исследовательского технического университета, ORCID:0000-0001-5600-4615, dsu_1991@mail.ru, 664074, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия.

UDC 621.314.3

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.006

Simulation of the bucket lifting mechanism control subsystem of a walking excavator

Mikhail P. Dunaev, Sarfaroz U. Dovudov

National research irkutsk state technical university,
Russia, Irkutsk, *mdunaev10@mail.ru*

Abstract. The article presents a functional diagram of the control subsystem of the electric drive of a walking excavator. Structural-parametric models of AC electric drives of an excavator with a pulse-phase control system and a pulse-frequency control system have been developed. Simulation of AC electric drives of an excavator with a pulse-phase control system and a pulse-frequency control system in the Matlab/Simulink environment was carried out. A comparison of the results of modeling control systems is given.

Keywords: control subsystem, lifting mechanism, electric drive, simulation

References

1. Kruglikov O.V., Makarov L.N., Piskunov S.V. Razrabotka, proizvodstvo i primeneniye energoeffektivnykh elektricheskikh mashin i privodov [Development, production and application of energy efficient electrical machines and drives]. Elektrotehnika [Electrical Engineering], 2015, no. 3. pp. 4-8.
2. Zhemerov G.G., Ivakhno V.V., Koval'chuk O.I. Raschetmoshchnosti poter' i temperatury struktury tranzistornodiodnykh moduley pri komp'yuternom modelirovanii preobrazovateley [Calculation of power losses and temperature of the structure of transistor-diode modules in computer modeling of converters]. Elektrotehnika i elektromekhanika [Electrical engineering and electromechanics], 2011, no. 4, pp. 21-28, ISSN 2074-272X.
3. Dunaev M.P., Dovudov S.U. Modelirovaniye poter' moshchnosti v preobrazovatele chastoty [Simulation of losses in frequency converter]. Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы [Electrical systems and complexes], 2021, no. 2(51), pp. 45-51.
4. German-Galkin S.G. Shirotno-impul'snyye preobrazovateli [Pulse-width converters]. L., Energy, 1979. 96 p.

5. Ahcene Bouzida, Radia Abdelli, Ouadah M'hamed Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. 8th International conference on modelling, identification and control (ICMIC-2016) Algiers, Algeria- November 15-17, 2016, pp 768-773.
6. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of semiconductor switching losses under hard switching using Matlab/Simulink Subsystem. Electrical, control and communication engineering, 2013, vol. 2, iss. 1, pp. 20-26.
7. Plakhtii O.A., Nerubatskyi V.P., Hordiienko D.A. et al. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu, 2020, (2): 82-88, DOI:10.33271/nvngu/2020-82.
8. Kaixin Wei, Chengning Zhang, Xuelian Gong, Tieyu Kang. The IGBT Losses analysis and calculation of inverter for two-seat electric aircraft application. Energy procedia, 2017, vol. 105, pp. 2623-2628, ISSN 1876-6102. Dunaev M.P. Rezonansnyye inventory dlya upravleniya elektroprivodami [Resonant inverters controlling electric drives]. Irkutsk. IrGTU, 2004, 103 p.
9. Dunaev M.P. Rezonansnye inventory dlâ upravleniâ élektroprivodami [Resonant inverters for controlling electric drives]. Irkutsk, Izd-vo IrGTU, 2004. - 103 p.
10. Bai Baodong and Chen Dezhi, Inverter IGBT loss analysis and calculation 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Cape Town, 2013, pp. 563-569, DOI:10.1109/ICIT.2013.6505733.
11. Feix G., Dieckerhoff S., Allmeling J., Schonberger J. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses, 2009 13th European conference on power electronics and applications, Barcelona, 2009, pp. 1-8.
12. Dunaev, M.P., Dovudov S.U. Sravneniye energoeffektivnosti skhem avtonomnykh inverterov napryazheniya s sinusoidal'noy shirotno-impul'snoy i chastotno-impul'snoy modulyatsiyey [Comparison of energy efficiency of autonomous voltage inverters with sine wave pulse width and pulse frequency modulation circuits]. Elektrotehnicheskkiye sistemy i komplekсы [Electrical systems and complexes], 2021, no. 4(53), pp. 50-55.
13. Dunaev, M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. Energy characteristics the autonomous voltage inverter with the pulse-frequency modulation. International scientific conference "FarEastCon" / 6-9 October 2020, Far Eastern Federal university, Vladivostok.
14. Blinov A. et al. Loss calculation methods of half-bridge square-wave inverters. Elektronika ir elektrotehnika, 2011, 113(7), DOI:10.5755/j01.eee.113.7.604.
15. Alemi P., Lee D. Power loss comparison in two- and three-level PWM converters. 8th International conference on power electronics - ECCE Asia, Jeju, 2011, pp. 1452-1457.
16. Dovudov S.U., Dunayev M.P. Analiz energeticheskikh pokazateley impul'snykh preobrazovateley [Analysis of energy indicators of pulse converters]. Vestnik IrGTU [ISTU Bulletin], 2020, vol. 24, no 2, pp. 345-355.
17. Shirahama H., Muto T. A novel power loss calculation method for power converters by transforming switching-loss into impulse-waveforms. 2018 21st International conference on electrical machines and systems (ICEMS), Jeju, 2018, pp. 2226-2229.
18. Zhu Y, Xiao M, Su X. et al. Modeling of conduction and switching losses for IGBT and FWD based on SVPWM in automobile electric drives. Applied sciences. 2020, 10(13):4539, DOI:10.3390/app10134539
19. Dunaev M. P., Dovudov S. U Modelirovaniye odnofaznogo dvukhurovnevoogo avtonomnogo invertora napryazheniya s chastotno-impul'snoy modulyatsiyey [Simulation of a single-phase two-level autonomous voltage inverter with pulse frequency modulation]. Informatsionnyye i matematicheskkiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 2 (18), pp. 134-143
20. Sharifov B., Gulyamov K., Yunusov R., et al. The mathematical model of pulse width modulation frequency converter. Proceedings of the 2021 Ural-siberian smart energy conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13–15 November 2021, Novosibirsk, 2021, pp. 81-84.
21. Dovudov S.U., Dunaev M.P, Zhiravetska A. et al. Analysis and comparison of energy indices of dc-dc pulse converters. Przegląd elektrotechniczny, 2022, vol. 98, no 6, pp. 99-103.
22. Dunaev M.P., Dovudov S.U., Arshinskiy L.V. of losses in autonomous inverter circuits with pulse-width and pulse-frequency modulation. Computational technologies, 2022, vol. 27, no 5, pp. 5-13.

Dunaev Mikhail Pavlovich. Doctor of technical sciences, professor, professor, Irkutsk national research technical university, Author ID:315898, ORCID:0000-0002-1523-5553, mdunaev10@mail.ru, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov str., 83.

Dovudov Sarfaroz Umedovich. Assistant, Irkutsk national research technical university, ORCID:0000-0001-5600-4615, dsu_1991@mail.ru, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov str., 83.

Статья поступила в редакцию 23.01.2024; одобрена после рецензирования 21.05.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 01/23/2024; approved after reviewing 05/21/2024; accepted for publication 12/17/2024.

УДК 681.5.004

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.007

Моделирование теплообмена при непрерывном прессовании

Солопко Ирина Владимировна, Любанова Анна Шоломовна, Капулин Денис

Владимирович

Сибирский федеральный университет,

Россия, Красноярск, *isolopko@sfu-kras.ru*

Аннотация. В работе предложена уточненная модель теплообмена при непрерывном прессовании способом Конформ с учетом технологических и энергосиловых параметров, и влияния теплообмена в инструменте, что позволяет использовать точное описание геометрии очага деформации, провести математическое и компьютерное моделирование распределения температуры металла. С применением информационных технологий проведены численные эксперименты, подтверждающие соответствие температурного поля распределению скоростей течения металла.

Ключевые слова: теплообмен, непрерывное прессование, Конформ, моделирование

Цитирование: Солопко И.В. Моделирование теплообмена при непрерывном прессовании / И.В. Солопко, А.Ш. Любанова, Д.В. Капулин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 65-72. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.007.

Введение. В металлургической промышленности техника и технология производства пресс-изделий из цветных металлов и сплавов совершенствуется в направлении создания непрерывных процессов. Непрерывное прессование позволяет снизить затраты на трудовые ресурсы, уменьшить отходы материала и оптимизировать производственные процессы. Наибольшее предпочтение отдается совмещенным непрерывным процессам, которые позволяют повысить качество продукции, улучшить ее характеристики, увеличить производительность и снизить затраты на производство. Непрерывность процессов обеспечивает стабильность свойств изделий и возможность полной автоматизации технологического процесса от передачи расплава в кристаллизатор до упаковки готовой продукции. Такие процессы широко используются для создания различных изделий из металлических сплавов. В целом, метод прессования Конформ является гибким и эффективным решением для массового производства высококачественных изделий из различных металлов, обеспечивает высокую производительность и эффективность производства, благодаря непрерывности процесса, точность формирования и качество получаемой продукции. Благодаря ряду достоинств, широкое промышленное внедрение получили процессы непрерывного прессования, в которых сила трения между заготовкой и контейнером используется как рабочее усилие прессования.

При непрерывном прессовании способом Конформ металл подаётся в контейнер, состоящий из подвижной и неподвижной частей, деформируется и выдавливается в матрицу. В целом непрерывность прессования зависит от конструктивных и энергосиловых параметров устройства, напряженно-деформированного состояния металла с инструментом и температурно-скоростных режимов технологического процесса [1-4]. Пластическая деформация всегда сопровождается выделением тепла, поэтому отслеживание градиента температуры и скорости течения металла на входе в контейнер и выходе из матрицы способствует равномерности свойств и удовлетворительному качеству поверхности пресс-изделия [5]. В работе [6] рассматривалась математическая модель для расчета температуры в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом Конформ.

В настоящей работе, в отличие от [6], предложена уточненная модель теплообмена в полярных координатах с учетом технологических и энергосиловых параметров, и влияния теплообмена в инструменте, что позволяет использовать точное описание геометрии очага деформации, провести математическое и компьютерное моделирование распределения температуры металла при непрерывном прессовании способом Конформ [7, 8].

1. Постановка задачи. Целесообразность перехода к полярным координатам $x = r \times \cos(\varphi)$, $y = r \times \sin(\varphi)$ объясняется тем, что геометрическая форма очага деформации при непрерывном прессовании способом Конформ представляет собой сектор кольца (рис.1).

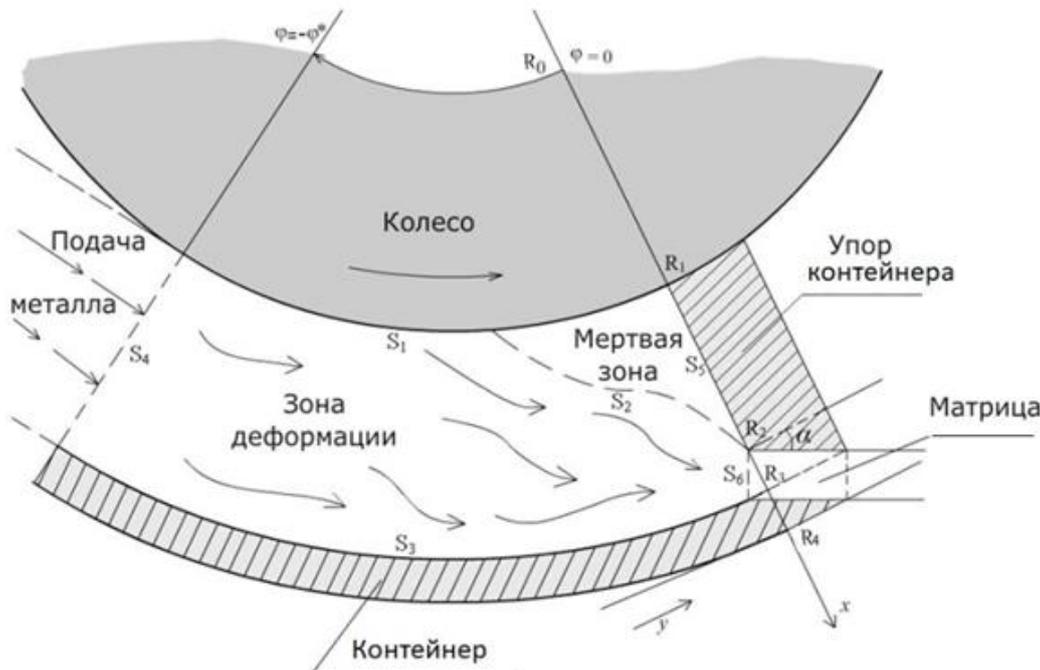


Рис. 1. Геометрическая модель очага деформации

Комментарии к рис. 1. S_1 – внутренняя поверхность колеса, S_2 – линия скольжения вдоль мертвой зоны, S_3 – внутренняя поверхность кольцевой вставки, образующей контейнер, S_4 – внутренняя поверхность входного сечения контейнера, S_5 – внутренняя поверхность упора колеса, S_6 – отверстие в матрице.

Уравнение теплообмена в полярных координатах имеет вид:

$$c\rho \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} v_r + \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} v_\varphi \right) = \chi \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \frac{1}{r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} \frac{1}{r^2} \right) + \left(2\mu + \frac{\tau_s}{|\tilde{D}|} \right) |\tilde{D}|^2, \quad (1)$$

где θ – температура металла, c – коэффициент теплоемкости металла, ρ – плотность металла, τ_s – предел текучести, μ – вязкость металла, χ – коэффициент теплопроводности металла, $v = (v_r, v_\varphi)$ – скорость течения металла, $|\tilde{D}|$ – модуль тензора скорости деформации, вычисляемый по формуле:

$$|\tilde{D}| = \left(\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \frac{(r^2 + 1)}{4r^2} \left(\frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - v_\varphi + r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_r \right)^2 \right)^{1/2}$$

К уравнению (1) необходимо добавить краевые условия:

$$\begin{aligned} -\chi \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{S_1} &= k(\theta - T) \Big|_{S_1}, & \chi \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{S_3} &= k(\theta - T) \Big|_{S_3}, & \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \Big|_{S_4} &= 0, \\ \chi \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \Big|_{S_5} &= k(\theta - T) \Big|_{S_5}, & -\frac{\partial \theta}{\partial r} \frac{\varphi_B}{\sqrt{(R_3 - R_2)^2 + \varphi_B^2}} + \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \frac{R_3 - R_2}{\sqrt{(R_3 - R_2)^2 + \varphi_B^2}} \Big|_{S_6} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

где k – коэффициент теплообмена между металлом и инструментом, T – температура инструмента, $\varphi_B = (R_1 - R_2) \operatorname{ctg} \alpha$.

Необходимый температурный режим в очаге деформации поддерживается системой охлаждения устройства путем отъема тепла, образующегося за счет работы сил пластической деформации. Основной поток тепла через стенку контейнера и колесо направлен по радиальной составляющей r , поэтому теплопереносом вдоль тангенциальной составляющей φ можно пренебречь и считать, что распределение температуры в колесе и контейнере зависит только от r . Теплообмен в упоре контейнера удобнее моделировать в декартовых координатах. Аналогично можно считать, что распределение температуры в упоре контейнера зависит только от y .

2. Математическая модель. Теплообмен инструмента с системой охлаждения в полярных координатах при непрерывном прессовании моделируется следующим образом. Распределение температуры в контейнере T_1 и колесе T_2 описывается уравнением:

$$\frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} \right) = 0, \quad i = 1, 2.$$

Краевые условия для T_1 задаются на поверхности контакта контейнера с хладогентом:

$$T_1|_{r=R_4} = C_1, \quad \frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_4} = \alpha_1 (C_1 - T_{охл}).$$

Решая эту задачу, получаем, что:

$$T_1(r) = \frac{\alpha_1 c_1 \rho_1 (C_1 - T_{охл}) R_4}{\chi_1} \ln \frac{R_4}{r} + C_1.$$

Краевые условия для T_2 задаются на поверхности контакта колеса с хладогентом:

$$T_2|_{r=R_0} = C_2, \quad - \frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \alpha_1 (C_2 - T_{охл}).$$

Решение задачи теплообмена с этими краевыми условиями имеет вид:

$$T_2(r) = \frac{\alpha_1 c_1 \rho_1 (C_2 - T_{охл}) R_0}{\chi_1} \ln \frac{r}{R_0} + C_2.$$

Распределение температуры T_3 в упоре контейнера является решением задачи для уравнения:

$$\frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} = 0$$

с краевыми условиями:

$$T_3|_{y=y_1} = C_3, \quad \frac{\chi_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=y_1} = \alpha_1 (C_3 - T_{охл})$$

и описывается формулой:

$$T_3(y) = \frac{\alpha_1 c_1 \rho_1 (C_3 - T_{охл})}{\chi_1} (y_1 - y) + C_3.$$

Здесь c_1 – коэффициент теплоемкости материала, из которого сделан инструмент; α_1 – коэффициент теплообмена между хладогентом и инструментом; ρ_1 – плотность материала, из которого сделан инструмент; χ_1 – коэффициент теплопроводности материала, из которого сделан инструмент; C_1, C_2, C_3 – температура поверхности инструмента со стороны системы охлаждения; $T_{охл}$ – температура хладогента; R_4 – величина, равная сумме радиуса колеса,

высоты башмака и толщины башмака; R_0 – величина, равная разности радиуса колеса и расстояния до системы охлаждения в колесе; U_1 – ширина упора кольцевой вставки (контейнера).

3. Численная реализация. При решении задачи (1), (2) использовалась неравномерная сетка, состоящая из четырёх частей, что вызвано геометрическими особенностями области. Для численного решения задачи применялся метод конечных элементов. Выбор метода обусловлен тем, что градиент скорости течения металла может быть разрывен на некоторых линиях скольжения.

Температура определялась в виде линейной комбинации базисных функций $N_{ij}(\varphi, r)$ с неизвестными коэффициентами θ_{ij} , фактически равными значениям температуры в узле сетки с индексами i и j .

$$\theta(\varphi, r) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \theta_{ij} \cdot N_{ij}(\varphi, r), \quad (3)$$

Компоненты скорости так же представляются в виде линейных комбинаций базисных функций с известными коэффициентами a_{ij} и b_{ij} [9, 10].

$$v_\varphi = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} \cdot N_{ij}(\varphi, r), \quad v_r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} \cdot N_{ij}(\varphi, r), \quad (4)$$

где $\theta_{ij}, a_{ij}, b_{ij}$ – узловые значения θ, v_φ, v_r соответственно, а $N_{ij}(\varphi, r)$ – базисные функции.

В качестве базисных функций были выбраны линейные прямоугольные функции формы, которые строились на восьми узлах соседних по отношению к текущему узлу ij . График такой функции внутри прямоугольника представляет собой пирамиду. Вне прямоугольника $N_{ij}(\varphi, r) = 0$. Задача сводится к нахождению значений $\theta_{i,j}$ в узлах сетки из системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} d_{i-1,j} \theta_{i-1,j} + d_{i+1,j} \theta_{i+1,j} + d_{i,j} \theta_{i,j} + d_{i,j-1} \theta_{i,j-1} + d_{i,j+1} \theta_{i,j+1} = E_{i,j}, \\ i = 1, \dots, 2N - 1, j = 1, \dots, 2N - 1, i + j < 3N; \\ c_{1,j} \theta_{1,j} + c_{0,j} \theta_{0,j} = 0, \quad j = 0, \dots, 2N; \\ c_{2N,j} \theta_{2N,j} + c_{2N-1,j} \theta_{2N-1,j} = H_{2N,j}, \quad j = 1, \dots, N - 1; \\ c_{i,1} \theta_{i,1} + c_{i,0} \theta_{i,0} = H_{i,0}, \quad i = 1, \dots, 2N; \\ c_{i,2N} \theta_{i,2N} + c_{i,2N-1} \theta_{i,2N-1} = H_{i,2N}, \quad i = 1, \dots, N; \\ c_{3N-i-1,i} \theta_{3N-i-1,i} + c_{3N-i,i} \theta_{3N-i,i} + c_{3N-i,i-1} \theta_{3N-i,i-1} = 0, \quad i = N + 1, \dots, 2N; \end{cases} \quad (5)$$

где $E_{i,j}$ зависит от компонент скорости течения металла a_{ij} и b_{ij} . Система включает в себя уравнения, полученные после подстановки выражений (3), (4) для температуры и компонент скорости в уравнение теплообмена (1) и краевые условия (2). Система уравнений (5) решалась методом прогонки.

4. Информационные технологии. Для компьютерного моделирования распределения температуры в очаге деформации было создано программное приложение Conform_T [11], созданное на языке C++ в среде программирования Borland C++ Builder. Данная среда программирования является мощным средством для быстрой и качественной разработки программ. Имеющаяся библиотека визуальных компонентов позволяет создать интерфейс за считанные минуты, а компонентный принцип позволяет создавать полноценные Windows приложения, написав минимальное количество строк кода.

Программа Conform_T включает в себя три основных модуля:

- главный модуль, содержащий интерфейс программы, процедуры ввода исходных данных, расчета температуры в очаге деформации и сохранения полученных результатов в текстовый файл;
- модуль отображения результатов вычислений, включающий графическое изображение распределения температуры в зоне деформации и вывод значений температуры в узлах сетки;
- модуль справки.

В ходе работы был проведён ряд численных экспериментов для алюминиевого сплава при реальных технологических данных (рис. 2).

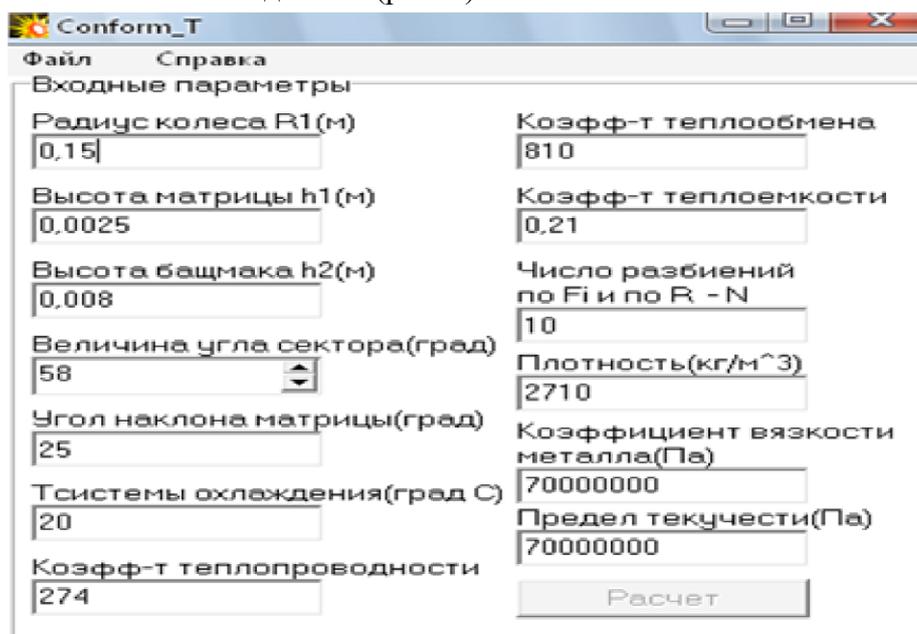


Рис. 2. Исходные конструктивные и реологические параметры

Распределение температурных параметров в очаге деформации, рассчитанных на сетке 21×21 при одинаковом расположении матрицы под углом $\alpha = 25^\circ$ и воздушном охлаждении, представлено на рис. 3.

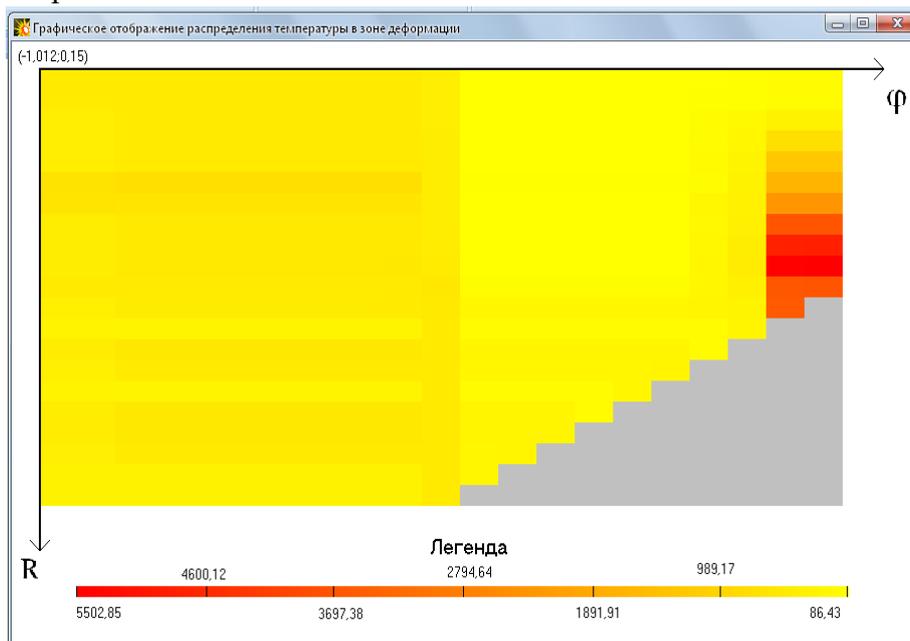


Рис. 3. Распределение температуры

Распределение скорости было рассчитано ранее в работе [9,10] (рис. 4).

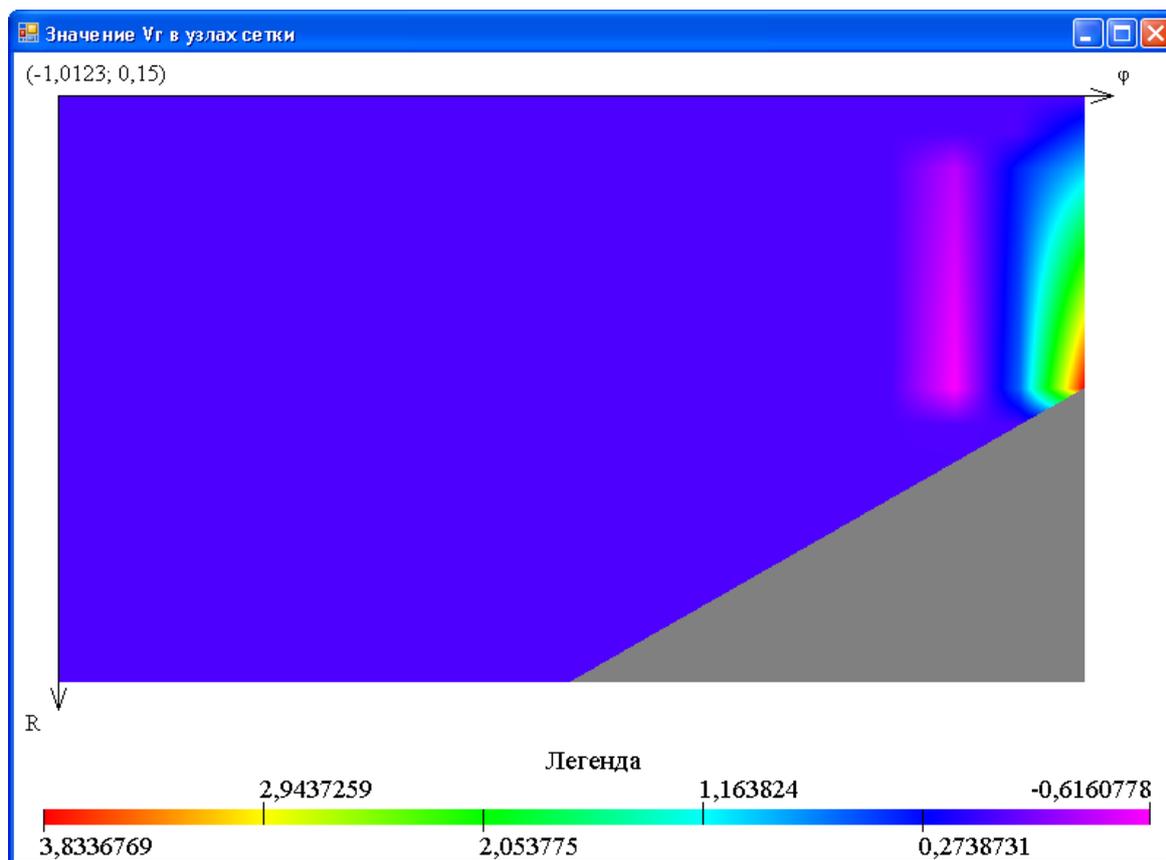


Рис. 4. Распределение радиальной составляющей скорости

Заключение. Таким образом, из результатов расчета температуры видно, что распределение зон самой высокой и самой низкой температуры соответствует распределению скорости течения металла, что свидетельствует об адекватности полученного распределения температуры в очаге деформации реальному процессу.

В дальнейшем разработанная модель будет применяться для построения системы автоматизация управления процессом непрерывного прессования методом Конформ.

Список источников

1. Довженко Н.Н. Моделирование процесса непрерывного прессования методом Конформ в инженерном программном комплексе DEFORM 3D / Н.Н. Довженко, И.Ю. Губанов, И.В. Солопко // Труды Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2011», 2011. – С. 81-86.
2. Горохов Ю.В. Программное обеспечение расчета технологических параметров непрерывного прессования методом Конформ / Ю.В. Горохов, Ю.В. Губанов, И.В. Солопко // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии. III Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 30-летию кафедры «Информационные технологии в металлургии», под редакцией С.П. Мочалова, В.П. Цымбала. 2011. – С. 151-156.
3. Горохов Ю.В. Особенности пластического течения материала заготовки в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом «Конформ» / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Суслов, М.А. Крылов // Цветные металлы, 2010. – №12. – С. 69-71.
4. Горохов Ю.В. Снижение энергозатрат при непрерывном прессовании металла способом Конформ путем оптимизации формы размеров инструмента / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2010. – № 1 (29). – С. 52-55.
5. Горохов Ю.В. Расчет параметров деформационной зоны при непрерывном прессовании / Ю.В. Горохов, Н.Н. Загиров, И.Ю. Губанов // Металлы, 2004. – № 4. – С. 113-116.
6. Горохов Ю.В. Расчет температурных полей деформационной зоны при непрерывном прессовании металлов методом Конформ / Ю.В. Горохов, В.В. Осипов, И.В. Солопко, В.П. Катрюк // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2012. – №1 (37). – С. 31-34.
7. Солопко И.В. Моделирование теплопереноса при непрерывном прессовании / Солопко И.В., Любанова А.Ш. // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и

инновации в науке и производстве». Редколлегия: Т.Н. Гвоздкова (отв. редактор), С.О. Макаров и др. Междуреченск, 2023. – С. 453.1-453.3.

8. Любанова А.Ш. Моделирование теплообмена в процессе непрерывного литья-прессования / Любанова А.Ш., Солопко И.В. // Сборник тезисов докладов VII Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения». Институт вычислительного моделирования СО РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Сибирский федеральный университет, 2020. – С. 148-149.
9. Любанова А.Ш. Задача вязкопластической деформации металла / А.Ш. Любанова, Ф.Ю. Непомнящий // Вычислительные технологии, 2008. – Т. 13. – С. 327-332.
10. Любанова А.Ш. Оптимизация равномерности течения металла при непрерывном прессовании способом Conform / А.Ш. Любанова, Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, А.Ю. Зиборов // Металлы, 2010. – № 2. – С. 28-33.
11. Солопко И.В. Conform_T / И.В. Солопко, А.Ш. Любанова // Свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ №2023613159 от 13.02.2023. Заявка № 2023611292 от 20.01.2023.

Солопко Ирина Владимировна. Старший преподаватель кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет, *iSolopko@sfu-kras.ru*, 660074, Россия, Красноярск, ул. ак. Киренского, 26к1, 3-18.

Любанова Анна Шоломовна. канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет, *ALyubanova@sfu-kras.ru*, 660074, Россия, Красноярск, ул. ак. Киренского, 26к1, 3-18.

Капулин Денис Владимирович. канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент базовой кафедры информационных технологий в радиоэлектронном производстве, Сибирский федеральный университет, *dKapulin@sfu-kras.ru*, 660074, Россия, Красноярск, ул. ак. Киренского, 26к1, 3-18.

UDC 681.5.004

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.007

Modeling of heat transfer under continuous extrusion

Irina V. Solopko, Anna Sh. Lubanova, Denis V. Kapulin

Siberian federal university,

Russia, Krasnoyarsk, *iSolopko@sfu-kras.ru*

Abstract. The paper proposes a refined model of heat transfer during continuous extrusion by the Conform method, taking into account technological and energy-power parameters, and the influence of heat transfer in the tool, which allows using an accurate description of the geometry of the deformation zone, and conducting mathematical and computer modeling of the metal temperature distribution. Numerical experiments have been carried out confirming the correspondence of the temperature field to the distribution of metal flow velocities.

Keywords: heat transfer, continuous extrusion, Conform, modeling

References

1. Dovzhenko N.N., Gubanov I.Yu., Solopko I.V. Modelirovaniye protsessa nepreryvnogo pressovaniya metodom Konform v inzhenernom programmnom komplekse DEFORM 3D [Modeling of the continuous pressing process by the Conform method in an engineering software package DEFORM 3D]. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Inzhenernyye sistemy – 2011" [Proceedings of the International scientific and practical conference "Engineering systems – 2011"], 2011, pp. 81-86.
2. Gorokhov Yu.V., Gubanov I.Yu., Solopko I.V. Programmnoye obespecheniye rascheta tekhnologicheskikh parametrov nepreryvnogo pressovaniya metodom Konform [Software for calculating the technological parameters of continuous pressing by the method Conform]. Modelirovaniye, programmnoye obespecheniye i naukoymkiye tekhnologii v metallurgii. III Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 30-letiyu kafedry "Informatsionnyye tekhnologii v metallurgii", pod redaktsiyey S. P. Mochalova, V. P. Tsymbala. [Modeling, software and high-tech technologies in metallurgy/ III All-Russian scientific and practical conference dedicated to

- the 30th anniversary of the department of information technology in metallurgy, edit by S.P. Mochalova, V.P. Tsymbala], 2011, pp. 151-156
3. Gorokhov Yu.V., Solopko I.V., Suslov V.P., Krylov M.A. Osobennosti plasticheskogo techeniya materiala zagotovki v deformatsionnoy zone pri nepreryvnom pressovanii sposobom "Konform" [Features of the plastic flow of billet materials in the deformation zone during continuous pressing by the "Conform" method]. Tsvetnyye metally [Non-ferrous metals], 2010, no. 12, pp. 69-71.
 4. Gorokhov Yu.V., Solopko I.V. Snizheniye energozatrat pri nepreryvnom pressovanii metalla sposobom Konform putem optimizatsii formy razmerov instrumenta [Reduction of energy consumption during continuous pressing of metal with a special Conform by optimizing the shape and dimensions of the tool]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova [Bulletin of Magnitogorsk state university named after G.I. Nosova], 2010, no. 1 (29), pp. 52-55.
 5. Gorokhov, Yu.V., Zagirov N.N., Gubanov I.Yu. Raschet parametrov deformatsionnoy zony pri nepreryvnom pressovanii [Calculation of the parameters of the deformation zone during continuous pressing]. Metally [Metals], 2004, no. 4, pp. 113-116.
 6. Gorokhov Yu.V., Osipov V.V., Solopko I.V., Katryuk V.P. Raschet temperaturnykh poley deformatsionnoy zony pri nepreryvnom pressovanii metallov metodom Konform [Calculation of the temperature fields of the deformation zone during continuous pressing of metals by the Conform method]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Bulletin of the Magnitogorsk state technical university. G.I. Nosova], 2012, no. 1 (37), pp. 31-34.
 7. Solopko I.V., Lyubanova A.Sh. Modelirovaniye teploperenosa pri nepreryvnom pressovanii [Modeling of heat transfer during continuous pressing]. Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennyye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve" [Materials XII of the international scientific and practical conference "Current trends and innovations in science and production"], Mezhdurechensk, 2023, pp. 453.1- 453,3.
 8. Lyubanova A.Sh., Solopko I.V. Modelirovaniye teploobmena v protsesse nepreryvnogo lit'ya-pressovaniya [Modeling of heat transfer in the process of continuous casting-pressing]. Sbornik tezisov dokladov VII Vserossiyskoy konferentsii s uchastiyem zarubezhnykh uchenykh "Zadachi so svobodnymi granitsami: teoriya, eksperiment i prilozheniya". Institut vychislitel'nogo modelirovaniya SO RAN, Institut gidrodinamiki im. M.A. Lavrent'yeva, Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, Sibirskiy federal'nyy universitet [Collection of abstracts of the VII All-Russian conference with the participation of foreign scientists "Problems with free boundaries: theory, experiment and applications". Institute of computational modeling SB RAS, M.A. Lavrentiev Institute of hydrodynamics SB RAS, S.S. Kutateladze Institute of thermophysics SB RAS, Siberian federal university], 2020, pp. 148-149.
 9. Lyubanova A.Sh., Nepomnyashchy F.Yu. Zadacha vyazkoplasticheskoy deformatsii metalla [Problem of viscoplastic deformation of metal]. Vychislitel'nyye tekhnologii [Computing technologies], 2008, vol. 13, pp. 327-332.
 10. Lyubanova A.Sh., Gorokhov Yu.V., Solopko I.V., Ziborov A.Yu. Optimizatsiya ravnomernosti techeniya metalla pri nepreryvnom pressovanii sposobom Conform [Optimization of the uniformity of metal flow during continuous pressing by the Conform method]. Metally [Metals], 2010, no. 2, pp. 28-33.
 11. Solopko I.V., Lyubanova A.Sh. Conform_T. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii v Reyestre programm dlya EVM №2023613159 ot 13.02.2023 [Certificate of state registration in the register of computer programs No. 2023613159 dated 02/13/2023]. Application No. 2023611292 dated 01/20/2023.

Solopko Irina Vladimirovna. Assistant professor of the Department of automation systems, automated control and design, Siberian federal university, iSolopko@sfu-kras.ru, 660074, Russia, Krasnoyarsk, academics Kirensky, 26 k1, 3-18.

Lubanov Anna Sholomovna. Docent, candidate of physical and mathematical science, associate professor, associate professor of the Department of automation systems, automated control and design, Siberian federal university, ALyubanova@sfu-kras.ru, 660074, Russia, Krasnoyarsk, academics Kirensky, 26 k1, 3-18.

Kapulin Denis Vladimirovich. Candidate of technical science, associate professor, associate professor of the Basic department of information technologies in radioelectronic production, Siberian federal university, dKapulin@sfu-kras.ru, 660074, Russia, Krasnoyarsk, academics Kirensky, 26 k1, 3-07.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 02/12/2024; approved after reviewing 12/12/2024; accepted for publication 12/17/2024.

Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК 004.413.4

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.008

Применение облачных и граничных технологий при развитии интеллектуальной энергосистемы

Колосок Ирина Николаевна, Коркина Елена Сергеевна

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

Аннотация. Процесс создания интеллектуальных энергосистем (ИЭС) сопровождается широким использованием информационных технологий, среди них важное место занимают технологии обработки данных: облачные технологии, применяемые для обработки больших объемов данных, а также граничные вычисления, позволяющие быстро и эффективно обрабатывать данные локально (на местах). В статье проведено сравнение этих технологий по различным критериям, определены области их применения при развитии ИЭС. Рассмотрены примеры применения этих технологий при реализации функций управления новыми объектами и структурами, создаваемыми и функционирующими в рамках цифровой трансформации и интеллектуализации энергетики, такими, как умный дом, активная распределительная сеть, тренажер диспетчера, виртуальная электростанция и др.

Ключевые слова. Интеллектуальная энергосистема, распределенные энергетические ресурсы, облачные технологии, граничные вычисления, безопасность данных

Цитирование: Колосок И.Н. Применение облачных и граничных технологий при развитии интеллектуальной энергосистемы / И.Н. Колосок, Е.С. Коркина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 73-84. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.008.

Введение. Создание и функционирование интеллектуальной энергосистемы (ИЭС) (англоязычный термин Smart Grid) осуществляется на основе применения новых технологий, включающих применение интеллектуальных счетчиков, автоматического считывания показаний счетчиков, сети датчиков и исполнительных механизмов; усовершенствованной измерительной инфраструктуры (AMI), интеллектуальных электронных устройств (IED) и блоков синхронизированных измерений (PMU); сети коммуникаций, включающих облако, глобальную вычислительную сеть (WAN), системы измерения больших площадей (WAMS), сеть соседства (NAN), сеть домашнего доступа (HAN) и локальную вычислительную сеть (LAN) [1, 2]. Эти технологии дают возможность осуществлять сбор и обработку измерительной информации, необходимой для управления функционированием новых приложений, создаваемых в рамках ИЭС, включая распределенные энергетические ресурсы (DER), виртуальные электростанции (ВЭС, VPP) и Агрегатор управления спросом на электроэнергию (Demand Response (DR)), Активных потребителей, автоматизацию зданий, подстанций и фидеров и др. [3]. Сбор и обработка в реальном времени множества постоянно меняющихся и взаимосвязанных данных о параметрах режима, поступающих от различных измерительных устройств географически распределенных объектов, требует существенных по объемам мощностей вычислительных центров, хранилищ данных большой ёмкости, при этом обеспечения безопасного доступа и конфиденциальности информации.

Облачные технологии предлагают вычислительные услуги и ресурсы пользователям, не имеющим своих собственных достаточных вычислительных ресурсов – вычислительных мощностей, хранилищ данных, программного обеспечения (ПО) и др. [4]. Облачные технологии имеют достаточно широкий опыт применения в различных областях электроэнергетики как за рубежом, так и в России: при создании цифровых двойников энергообъектов, мультиагентных систем управления и диагностики, системы

автоматизированного контроля энергообъектами в период эксплуатации, а также в сервисных системах, базирующиеся на технологиях «Интернета вещей», таких, как системы учета энергоресурсов, зарядки электромобилей, электроснабжения умных домов и др. [5].

К основным недостаткам облачных технологий, наиболее значимым при их использовании в задачах мониторинга и управления объектами ИЭС, относятся существенные задержки при передаче данных и угроза нарушения их конфиденциальности, при этом по мере того как растут объёмы данных, собираемых с различных датчиков, растут и риски, связанные с конфиденциальностью информации. Еще одна проблема состоит в том, что в условиях санкций российские потребители сталкиваются с ограничениями на приобретение и продление лицензий на зарубежное ПО.

Для преодоления этих недостатков было предложено использовать граничные (пограничные, периферийные) технологии (в англоязычной литературе чаще используется термин граничные вычисления - Edge Computing), которые появились позднее облачных, но имеют ряд преимуществ по сравнению с ними, включая меньшую задержку, большую безопасность и большую эффективность [6].

Граничные вычислительные ресурсы расположены ближе к источнику данных или конечному пользователю, это снижает задержку и позволяет обрабатывать данные непосредственно на объекте управления. Это особенно важно в Smart Grid, где управление должно выполняться в реальном времени, т.е. в темпе ведения технологического процесса.

В статье будут рассмотрены возможности применения облачных и граничных технологий при функционировании и управлении новыми объектами, создаваемыми в рамках цифровой трансформации и интеллектуализации энергетики, проведено сравнение этих технологий по различным критериям, определены области их применения при развитии ИЭС. Рассмотрены примеры использования облачных и граничных технологий для вновь создаваемых объектов и структур энергетики, таких как виртуальная электростанция, Активная распределительная сеть (АРС), умный дом и др.

2. Вычислительные технологии при развитии ИЭС. Процессы цифровизации энергетики и создания интеллектуальных энергосистем (ИЭС) сопровождаются широким использованием информационных технологий (ИТ), среди которых важное место занимают облачные технологии, применяемые для обработки больших объемов данных [7].

2.1. Облачные технологии представляют собой программно-аппаратное обеспечение, доступное пользователю через локальную сеть или сеть Интернет, для целей удаленного доступа к определенным ресурсам, включая, прежде всего, вычислительные мощности, хранилища данных и программное обеспечение.

Облачная система, состоящая из нескольких устройств, компьютеров и серверов, соединенных между собой через Интернет, может быть разделена на две части:

- Внешний интерфейс – устройства клиента (компьютеры, планшеты, мобильные телефоны);
- Внутренний интерфейс – хранение данных и обрабатывающие системы, которые могут быть отдалены от устройств клиента и самого облака.

Технология облачных вычислений предоставляет различные виды услуг, которые делятся на три группы [8]:

- Услуги инфраструктуры (IaaS) – удаленный центр обработки данных (ЦОД) с такими ресурсами как: вместимость хранения данных, вычислительная мощность, и сети;
- Платформа как услуга (PaaS) – развитие платформы с устройствами и компонентами для создания, тестирования и запуска приложений

- Услуги программного обеспечения (SaaS) – готовое ПО, соответствующее производственным потребностям.

Две последние модели облачных вычислений чаще всего используются в задачах электроэнергетики.

Только в 2022 году спрос на облачные сервисы и услуги в России вырос на 45%. В 2023 году российские предприятия планировали увеличить потребление облачных услуг еще на 28% [8]. Возрастающий спрос на облачные технологии в энергетике объясняется предоставляемыми ими преимуществами, среди которых важнейшим является качественный уровень развития компании: гибкость программных продуктов (необходимый набор модулей), возможность оперативного энергетического контроля, хранение истории передачи данных (полный архив по проекту в энергетике), и, наконец, сокращение бюрократических проволочек.

Однако использование облачных технологий в энергетике сопровождается и рядом проблем:

1. относительно большие затраты на создание собственных облаков;
2. зарубежные разработки, не всегда учитывающие потребности российской энергетической отрасли;
3. необходимость выполнения требований безопасности передачи данных;
4. сложности интеграции облачных технологий с внутренней ИТ-системой компании;
5. обеспечение доступа к облачным технологиям только при наличии доступа к Интернету, что означает их зависимость от канала связи;
6. требование адаптации персонала к новым принципам организации работы.

Как считают специалисты по применению облачных технологий в энергетике [5, 9], часть из этих проблем надумана, а действительные сложности – решаемы.

2.2. Граничные (периферийные) вычисления (Edge Computing) – это парадигма распределенных вычислений. В отличие от облачных вычислений, сбор и анализ данных проводится не в централизованной вычислительной среде, такой, как ЦОД (центр обработки данных), а в том месте, где происходит генерация потоков данных. Циркулирует и другой термин: **Fog Computing** («туманные» вычисления). И тот, и другой термин отображают процесс выхода функции обработки информации за пределы ЦОД.

Edge (Fog) Computing можно трактовать, как все вычисления вне облака, происходящие на границе сети, и более конкретно, в самих точках получения информации, в приложениях, где требуется обработка данных в реальном масштабе времени. Это сокращает задержку в критически важных по времени процессах, поскольку решения принимаются вблизи физического местоположения объекта, что подходит для локальных контроллеров в энергосистемах.

Периферийные вычисления – характеризуются целым рядом преимуществ и потенциальных возможностей [6]:

- позволяют анализировать и фильтровать данные ближе к датчикам; более того, в облако отправляются только релевантные данные;
- малое время отклика, измеряемое в миллисекундах, критично для послеаварийного восстановления в ЭЭС, так как задержка в производственном процессе может быть губительной, если случается авария;
- при необходимости конфиденциальные данные можно обрабатывать на месте, где они защищены от прямых сетевых подключений; это обеспечивает более высокий уровень контроля над безопасностью и конфиденциальностью информации;
- наконец, уменьшаются требования к емкости облачных хранилищ данных и пропускной способности сети, сокращаются соответствующие затраты, поскольку вместо отправки в

облако большой объем данных с датчиков можно обрабатывать непосредственно на периферии.

Слабые стороны Edge computing — недостаточная интероперабельность протокольного стека и отсутствие промышленных стандартов. Как следствие, на сегодняшний день устройства и приложения, которые работают на границе сети, представляют из себя набор автономных Edge-экосистем, а разнообразие интерфейсов препятствуют взаимодействию устройств друг с другом.

Edge Computing работает на «мгновенных данных», то есть на текущих данных, генерируемых датчиками или контролируемые системами. Источниками данных Edge computing служат сами обрабатывающие цифровые устройства (не обязательно находящиеся в одной локации), которые затем передают обработанные и систематизированные пакеты данных в точку центрального накопления (или хранят), и если Cloud technologies – это скорее статистика и бизнес-обеспечение процессов, то Edge (Fog) Computing ближе к обеспечению нужд АСУ ТП.

Развертывание Edge-инфраструктуры предусматривает два сценария [10]:

1. Обработка данных, которые генерируют устройства, осуществляется локально, без отправки в корпоративное облако или удаленный ЦОД, тем самым обеспечивая требования реального времени.
2. Обработка чувствительных к пропускной способности данных осуществляется на границе сети (Edge Computing), а данные, необходимые для решения задач off-line (аналитика, планирование, прогноз), передаются в облачные системы.

Более перспективным для применения в ИЭС является второй подход, который позволяет сократить объемы данных, передаваемых в облако, а, соответственно, и уровень трафика.

В таблице 1 приведено сравнение облачных и граничных технологий по критериям, наиболее значимым при их использовании в энергетике [11, 12].

Таблица 1. Сравнение облачных и граничных технологий по различным критериям

Требование Критерий	Облачные вычисления	Граничные вычисления
Задержка при передаче и обработке данных	Высокая задержка: обработка должна выполняться через сетевое соединение.	Практически нет: обработка выполняется локально, без сетевых задержек.
Масштабируемость	Высокая масштабируемость: облачные серверы могут обрабатывать большие объемы данных.	Ограниченная масштабируемость: граничные устройства имеют ограниченную вычислительную мощность.
Работа с облаком	Обязательно	Не всегда
Надежность	Высокая надежность: облачные серверы рассчитаны на высокую доступность и могут справляться с аппаратными сбоями, но облачная система может разрушиться при сбоях в сети Интернет: хранилища, серверы, сети, программное обеспечение и многое другое.	Высокая надежность вычислений. Данные обрабатываются даже в отсутствие подключения к интернету.
Кибербезопасность	В публичном облаке личная информация передается через глобально связанные каналы - возможна потеря данных, система уязвима к кибератакам, поэтому оператор облачных сервисов должен отвечать за сохранность данных: обеспечивать шифрование, защиту от атак и аварийное восстановление.	Высокая. Вся информация остается на устройстве. Её не обязательно передавать в публичное облако, но требуется надежный план безопасности, включающий расширенные методы аутентификации и активную защиту от атак.

<p>Цена</p>	<p>Сложная и дорогая инфраструктура. Если компания не хочет использовать публичное облако, то выбирает частное или гибридное, но установить и поддерживать большой дата-центр на производстве – затратная задача.</p>	<p>Затраты на оборудование и сотрудников. Пользователю технологии придется купить и настроить оборудование, привлечь специалистов. Это сложнее, чем подключить публичное облако.</p>
--------------------	---	--

Таким образом, каждая из этих технологий имеет свои преимущества и недостатки, уровень надежности и кибербезопасности, поэтому для сбора и обработки данных при управлении новыми объектами в ИЭС следует применять ту технологию, которая обеспечит необходимое быстродействие обмена данными при требуемом уровне кибербезопасности и надежности объекта при его функционировании.

3. Примеры использования облачных и граничных технологий при создании новых объектов и структур в ИЭС. Облачные технологии нашли широкое применение в сервисных системах, базирующихся на технологиях «Интернета вещей», таких, как системы учета энергоресурсов, зарядки электромобилей, интеллектуальные системы управления умными домами и умными городами и др.

3.1. Умный дом. Интернет вещей (IoT) играет ключевую роль в умном доме, благодаря ему происходит обмен данными между устройствами и интернетом. Устройства умного дома могут быть подключены к облаку или локальной сети, что позволяет пользователю управлять ими удаленно через мобильные приложения или веб-интерфейсы. Интернет вещей также позволяет устройствам получать обновления ПО и взаимодействовать с другими сервисами и платформами [13].

Как только данные покидают Умный дом – защита этих данных выходит из-под контроля владельца, поэтому требуется найти эффективные решения для шифрования и защиты передаваемых и находящихся в состоянии покоя данных или же обрабатывать зашифрованные данные, не выходя за пределы сети "умный дом". Эти требования соответствуют реализации возможностей **граничной** обработки, но относительно дешевые потребительские устройства, чаще всего устанавливаемые в настоящее время в Умных домах, не способны выполнять модели Machine Learning или другие сложные задачи, необходимые для реализации технологии граничных вычислений, поэтому для использования этих технологий с целью сбора данных и реализации функций управления в Умных домах необходимо внедрение интеллектуальных счетчиков (AMI), контроллеров, и другого оборудования с функциями искусственного интеллекта (ИИ).

3.2. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). АСКУЭ предназначена для сбора показаний с приборов учета как на предприятиях (на розничном рынке электроэнергии), так и на объектах бытового сектора – в жилых многоквартирных домах. Система предоставляет пользователям достоверную информацию о фактическом потреблении электроэнергии и может быть реализована с применением различных каналов связи, которые обеспечивают своевременную и достоверную передачу информации о потреблении, о внештатных ситуациях, позволяют выявить факты хищений электроэнергии и дистанционно отключить неплательщиков.

В настоящее время на рынке предлагается большое количество коммерческих разработок АСКУЭ, среди них появились системы, построенные на использовании облачного ПО для доступа к показаниям приборов учета через Интернет, например, облачная АСКУЭ TIME2SAVE [14]. Предлагаемое облаком ПО (Software As A Service, **SaaS**) используется для обработки показаний энергопотребления. Данные со счетчиков поступают в ЦОД, шифруются, подаются Интернет-провайдеру, оттуда поступают на сервер Энергосетевой компании, дешифруются и обрабатываются. Прозрачность энергопотребления дает

возможность потребителям регулировать уровень своего потребления, а Электросетевой компании – фиксировать случаи хищения электроэнергии и бороться с кражами.

Подобный подход дает возможность существенной экономии, поскольку в этом случае не требуется приобретать дорогостоящее, как правило, ПО и серверы и производить настройку всего комплекса. Достаточно за небольшую абонентскую плату арендовать место в «облаке» на необходимое количество электросчетчиков.

3.3. Управление активной распределительной сетью (АРС). Цифровизация сети привела к значительному прогрессу в технологиях измерений, вычислений и интеллектуальном управлении, повысив эффективность и отказоустойчивость Активных распределительных сетей (АРС) [8].

АРС включают в себя интеллектуальные устройства на базе Интернета вещей (IoT), такие, как контроллеры реагирования на запросы, распределенные источники энергии (DER), системы хранения энергии и другие интеллектуальные устройства, повышающие гибкость системы [15]. Эти устройства Интернета вещей теперь могут выполнять локальные вычисления на периферии сети, предоставляя услуги пользователям.

Распределенные источники энергии (DER) в АРС могут использоваться для предоставления вспомогательных услуг, частично заменяя загрузку/разгрузку централизованных электростанций, при реализации которых реакция АРС не должна превышать допустимых временных значений (от нескольких секунд до нескольких минут).

Координация и управление DER в АРС могут осуществляться либо с помощью управляющих сигналов, передаваемых по сети связи, либо с помощью автономных контроллеров DER, которые действуют исключительно на основе локальных измерений. Оптимальным с точки зрения координации принятия решений и гибкости является первый подход. В этом случае контроллеры, а также коммуникационная сеть вместе представляют информационно-коммуникационную систему. Как показано в [16], для обеспечения максимально допустимой задержки при передаче данных через информационно-коммуникационную сеть, не оказывающей негативного влияния на качество управления, необходимо использовать локальную обработку данных на базе граничных вычислений либо комбинированный подход, при котором данные, полученные с датчиков и сенсоров, оперативно обрабатываются на граничном устройстве (контроллере); в случае фиксации аномальных значений поступает соответствующая команда на исполнительные устройства или оповещение оператору, и только часть данных передается для обработки и хранения в облако. Такой подход позволяет обеспечить требуемую задержку и снизить затраты на передачу данных.

3.4. Создание и сопровождение единой информационной модели для решения задач управления режимами крупных энергообъединений. Традиционный подход к моделированию ЭЭС основывается на применении математических моделей, которые должны быть адекватны решаемым задачам. Как правило, эти расчеты проводят различные подразделения центров диспетчерского управления, и в каждом из них используются свои математические модели различной степени подробности одной и той же физической сети, что приводит к снижению точности моделирования и качества управления.

Для решения этой проблемы Системным оператором (СО) ЕЭС России с 2012 по 2016 год в рамках проекта «Трехуровневая автоматизированная система формирования физических и эквивалентных моделей для расчетов и оценивания электрических режимов» разрабатывалась Единая информационная модель ЕЭС России [17].

Использование Единой информационной модели позволило упорядочить информационные потоки в АО «СО ЕЭС», повысить качество используемых данных, снизить разнородность и разновременность обновления технологических сведений, обеспечить

совместимость информационных продуктов различных производителей и сократить сроки и стоимость внедрения новых автоматизированных систем.

Аналогичные разработки выполняются за рубежом, так, для управления энергообъединением Среднего континента в США была создана и выполняется сопровождение единой сетевой модели [18]. Энергообъединение Среднего континента включает энергосистемы 15 штатов в США и канадской провинции Манитоба.

Независимый системный оператор энергообъединения (MISO) осуществляет диспетчерское управление, рыночное регулирование и планирование в ЭЭС Среднего континента. Тройная роль MISO требует точных моделей энергосистем, что становится все более сложной задачей по мере увеличения объема данных, ускорения частоты их изменений из-за интеграции распределенных возобновляемых ресурсов и динамического уточнения модели. ISO получает данные модели несколько раз в разных форматах. В результате этого существует большая вероятность возникновения расхождений между онлайн- и оффлайн-моделями, что может привести к ошибкам в управлении.

Новое решение, которое MISO внедряет для управления сетевой моделью, построено на базе общедоступных облачных сервисов AWS [19]. Решение поставляется MISO от ее поставщика Siemens в формате SaaS, что обеспечивает ISO масштабируемую инфраструктуру, стабильную производительность приложений, снижение потребности в ИТ-поддержке, а также гарантии безопасности.

Использование современных облачных технологий обеспечивает MISO точность, синхронизацию и постоянное обновление моделей энергосистем в рамках всех задач, решаемых ISO, а также предоставление их с более короткими циклами обновления и меньшим количеством ошибок.

MISO серьезно относится к безопасности облачных систем. Требования к безопасности, которые необходимо соблюдать при их использовании, охватывают следующие области: контроль доступа, аудит и подотчетность, информирование и обучение, управление конфигурацией, планирование на случай непредвиденных обстоятельств, идентификация и аутентификация, реагирование на инциденты, техническое обслуживание, защита средств массовой информации, безопасность персонала, физическая защита и защита окружающей среды, оценка рисков, защита систем и коммуникаций, целостность систем и информации.

3.5. Тренажер диспетчера [20]. Тренажер диспетчера – это сложный программно-технический комплекс, предназначенный для проведения противоаварийных тренировок оперативного персонала объединений энергосистем, энергосистем и электрических сетей. В настоящее время разработан ряд различных тренажеров, каждый из которых предназначен для решения определенных задач, требует специальных технических и программных средств, и, как правило, распространяется на коммерческой основе. К сожалению, упоминаний об использовании облачных технологий в отечественных разработках тренажеров авторам найти не удалось, поэтому была рассмотрена зарубежная разработка Power Simulator.

Компании IncSys и PowerData совместно разрабатывают обучающее ПО Power Simulator [18], которое помогает тестировать и повышать квалификацию системных операторов ЭЭС в выполнении своих задач в обычных и аварийных условиях, а также моделировать наиболее разрушительные системные события и тестировать планы их восстановления.

Power Simulator предлагается своим клиентам в виде SaaS-модели. Обычно он предоставляется в общедоступном облаке, где для создания этого облачного решения используются такие сервисы, как сеть, вычисления, хранилище и безопасность. Он также может быть размещен в частном облаке, но общедоступное облако дает ряд преимуществ по сравнению с другими платформами: быструю доступность, масштабируемость, надежность и

безопасность инфраструктуры, основанную на соблюдении лучших практик обеспечения безопасности приложений на облачном уровне.

Облако позволяет участвовать в симуляциях с любого сайта, имеющего доступ в Интернет, и современный браузер. Обеспечивается реалистичность учений и тренировок, поскольку участники получают доступ к ПО со своего обычного рабочего места, используя те же средства коммуникации, что и в реальной чрезвычайной ситуации. Все участники работают в интерактивном режиме реального времени, выполняя свои реальные роли. Действия каждого оператора и их влияние на систему отслеживаются в режиме реального времени.

3.6. Агрегация данных и управление ими. Проблема агрегации данных возникла в связи с появлением в рамках создания ИЭС большого количества распределенных источников генерации и активных потребителей, имеющих свои собственные избыточные энергоресурсы, но которые в силу своей небольшой единичной мощности не могут быть подключены к оптовому рынку электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Компании-агрегаторы объединяют регулировочные возможности таких субъектов в блок (кластер), удовлетворяющий требованиям рынка по величине разгрузки, и являются посредниками между ними и инфраструктурой рынка [21]. К структурам агрегации данных и управления ими относятся Виртуальные электростанции (ВЭС, VPP) и Агрегатор управления спросом на ЭЭ (Demand Response (DR-агрегатор))

Виртуальная электростанция – это централизованная платформа, использующая ИКТ и устройств IoT для объединения возможностей разнородных распределенных источников генерации (DER), которые сами по себе не могут участвовать в оптовом рынке ЭЭ.

Традиционная модель функционирования ВЭС – модель энергосбытовой компании: компания, работающая на энергорынке (например, энергосбытовая), создает сеть, контролирующую различные объекты распределенной генерации и гибкой мощности своих потребителей.

Агрегатор УС – это координирующий центр в механизме управления спросом (УС), созданный для объединения не вовлеченных в ОРЭМ субъектов электроэнергетики – Активных потребителей (АП), имеющих свои собственные избыточные энергоресурсы и возможность снижения энергопотребления из централизованной энергосистемы в определенные часы суток. Основная цель управления спросом на электроэнергию в ЕЭС России – уменьшение пиковой нагрузки в энергосистеме, необходимое как для снижения цен на рынке ЭЭ, так и для оптимизации управления энергосистемой и интеграции ВИЭ.

Агрегатор УС имеет распределенную структуру, он принимает заявки от потребителей, которые без ущерба для технологического цикла способны изменять потребление ЭЭ, разрабатывает оптимальные алгоритмы участия в программах DR, оснащает таких АП необходимыми средствами автоматизации и учета.

Традиционное управление ВЭС и структурой Агрегатора УС выполняется централизованно, информация собирается и передается на устройства в центр управления через коммуникационную среду с использованием беспроводных сотовых технологий (4G, 5G). Технологии связи создают проблемы с конфиденциальностью в централизованной среде, поэтому были предложены методы распределенного управления, базирующиеся на использовании ИКТ: облачных и периферийных (пограничных) вычислений.

Британская Компания Centrica уже 10 лет является поставщиком решений для мониторинга и управления распределенными активами в энергосистемах Германии, Великобритании, Бельгии, Франции и др. [22]. Платформа Centric VPP управляет 1,7 ГВт DERs. Специально разработанные сервисы, такие, например, как IoT Core, позволяют подключенным устройствам безопасно взаимодействовать с облачными приложениями и другими устройствами. IoT Core может поддерживать миллиарды устройств, на которых

создаваемые ими данные обрабатываются локально; облако используется для управления, аналитики и долговременного хранения данных.

Centrica защищает все коммуникации, хранимые данные и постоянно следит за целостностью системы:

- платформа VPP недоступна из общедоступного Интернета;
- любой авторизованный доступ требует двухфакторной аутентификации;
- все коммуникации между пользователями и платформой зашифрованы с использованием надежной криптографии;
- данные, связанные с управлением DERs, хранятся в защищенных ЦОДах, сертифицированных по стандарту ISO 27001\$;
- доступ к данным строго ограничен в зависимости от личности пользователя и соответствующих прав доступа.

Для усовершенствования механизма безопасности сетевой структуры VPP была предложена новая концепция VPP на базе граничных (периферийных) вычислений, оптимизируя тем самым производительность.

Архитектура VPP, ориентированная на периферию, содержит четыре основных компонента: облачную архитектуру, граничный уровень, операторов VPP и конечных потребителей/просьюмеров VPP. Введение в действие граничного уровня изменяет компоненты и динамику фундаментальной архитектуры, при этом пограничный уровень становится ядром, поскольку он может координироваться с различными VPP, выступая в качестве связующего звена между пользователями и облаком.

При рассмотрении аспектов безопасности возникают серьезные проблемы. Например, пользователь может войти в систему либо с оконечного устройства, которое является надежным и защищенным, либо с ненадежного устройства. Второй аспект заключается в том, что потребитель может быть не осведомлен о безопасности или не обладать достаточными знаниями для управления инфраструктурой, что может привести к повышению потенциального риска.

Заключение. Процессы интеллектуализации и цифровизации электроэнергетики неуклонно ведут к тому, что любое энергетическое предприятие будет со временем управляться "...компьютерными программами, которые могут размещаться в "облаках".

Облака обеспечивают огромные ресурсы для сложных вычислений и огромных объемов данных, но по мере масштабирования и распространения ИИ задержки, проблемы конфиденциальности, ограничения на подключение и пропускную способность сети лимитируют максимально возможное применение облачных технологий.

Периферийные вычисления компенсирует некоторые из этих ограничений, особенно для приложений, требующих немедленной обработки данных, со строгими ограничениями по задержкам и требованиями к доступности. Кроме того, оно решает проблемы конфиденциальности и безопасности, сохраняя конфиденциальные данные локализованными.

Для наилучшей производительности необходимо правильное сочетание периферийных и облачных приложений. **Будущее применения технологий ИИ в энергетике за гибридными облачно-периферийными приложениями.** Распределяя задачи между периферией и облаком, можно оптимизировать приложения с точки зрения скорости, эффективности, безопасности и конфиденциальности.

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. Цифровизация энергетики // Институт энергетики Высшей школы экономики, 2020. – URL: <https://energy.hse.ru/digitalization> (дата обращения: 04.04.2023).
2. Emmanuel M., Rayudu R. Communication technologies for smart grid applications: a survey. *Journal of Network and computer applications*, 2016, no. 74, pp. 133-148.
3. Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем / Н.И. Воропай // *Электричество*, 2020. – № 7. – С. 12-21.
4. Red Hat. Cloud vs. Edge. Available at: <https://www.redhat.com/en/topics/cloud-computing/cloud-vs-edge> (accessed: 06/27/2024)
5. Гаджиев М. Облачные технологии в энергетике / М. Гаджиев, Д.Кравец, И. Мурзаханов и др. // *ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение*, 2016. – № 6. –С. 52-58.
6. Edge Computing (вычисления на границе). – URL: <http://cons-systems.ru/edge-computing-vychisleniya-na-granitse> (дата обращения: 27.06.2024)
7. Массель Л.В. Современный этап развития искусственного интеллекта (ИИ) и применение методов и систем ИИ в энергетике / Л.В. Массель // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2021. – № 4 (24). – С. 5-20.
8. Wagdy Anis Aziz, Eduard Babulak, David Al-Dabass. Network function virtualization over Cloud-Cloud computing as business continuity solution. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/76746> (accessed: 06/27/2024)
9. Бараблин М. Российские облака: как менялся рынок облачных решений за последние годы. – URL: <https://www.comnews.ru/content/229540/2023-10-19/2023-w42/1013/rossiyskie-oblaka-kak-menyalsya-rynok-oblachnykh-resheniy-za-poslednie-gody> (дата обращения: 27.06.2024)
10. Tadviser. Периферийные вычисления. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 27.06.2024)
11. Хрисанфова Е. Облачные, туманные и граничные вычисления: отличия и перспективы развития технологий. – URL: <https://rb.ru/story/edge-computing/> (дата обращения 24.06.2024)
12. Сравнение облачных и туманных вычислений для создания проектов интернета вещей. – URL: <https://oncloud.ru/blog/2019/06/05/oblachnye-i-tumannye-vychisleniya-dlya-IoT>. (дата обращения: 27.06.2024)
13. Dunne R., Morris T., Harper S. A survey of ambient intelligence. *ACM computing surveys*, 2021, vol. 54, no. 4, DOI:10.1145/3447242.
14. Торопыно И. Облачная АСКУЭ TIME2SAVE / И. Торопыно // *Control Engineering*, 2016. – URL: <https://controleng.ru/avtomatizatsiya-zdanij/askue-time2save/> (дата обращения: 27.06.2024)
15. Tianming Zheng, Ming Liu, Deepak Puthal et al. Smart grid: cyber-attacks, critical defense approaches, and digital twin, available at: <https://www.arxiv-vanity.com/papers/2205.11783/> (accessed: 06/27/2024)
16. Narayan A., Klaes M., Lehnhoff S., Rehtanz C. Analyzing the propagation of disturbances in cpes considering the states of ict-enabled grid services. 2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). IEEE, 2021, pp. 522–529.
17. Беляев Н.А., Богомолов Р.А. СИМ в России: опыт АО «СО ЕЭС» по внедрению и сопровождению Единой информационной модели ЕЭС России в иерархической структуре диспетчерского управления, планы и перспективы / Н.А. Беляев, Р.А. Богомолов // *Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», Иркутск, Россия, 16-20 сентября 2019 г.* – Т. 1. – С. 38-43.
18. Song Zhang, Amritanshu Pandey, Xiaochuan Luo et al. practical adoption of cloud computing in power systems–drivers, challenges, guidance, and real-world use cases. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 2390 – 2411.
19. Amazon Web Services. Navigating GDPR Compliance on AWS, 2020. Available at: https://d1.awsstatic.com/whitepapers/compliance/GDPR_Compliance_on_AWS.pdf. (accessed: 06/27/2024)
20. Тянь Р.Л. Особенности режимных тренажеров диспетчера энергосистем, разработанных в России, Европе и США / Р.Л. Тянь, В.П. Будовский // *Энергетик*, 2013. – № 9. – С. 47-51.
21. Бык Ф.Л. Агрегатор - элемент цифровой трансформации региональной сети / Ф.Л. Бык, Л.С. Мышкина // *Методические вопросы исследования надежности БСЭ: в 2-х книгах. Ответственный редактор Воропай Н.И Иркутск: ИСЭМ СО РАН*, 2019. – Т.1. – вып. 70. – С.144-152.
22. Centrica. Available at: <https://www.centrica.com/who-we-are/> (accessed: 06/27/2024)

Колосок Ирина Николаевна. Д.т.н., ст.н.с., ИСЭМ СО РАН, вед.н.с. 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, с.н.с. Основные направления исследований: 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.2024.36.4.008

Application of cloud and edge technologies in the development of intelligent energy system

Irina N. Kolosok, Elena S. Korkina

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

Abstract. The process of creating intelligent energy systems (IES) is accompanied by the widespread use of information technologies, among them data processing technologies occupy an important place: cloud technologies used to process large amounts of data, as well as edge computing, which allows you to quickly and efficiently process data locally. The article compares these technologies according to various criteria, and identifies the areas of their application in the development of the IES. Examples of using these technologies in the implementation of control functions for new facilities and structures created and functioning within the framework of digital transformation and intellectualization of power industry such as a smart home, an active distribution network, a dispatcher simulator, a virtual power plant, etc. are considered.

Keywords: intelligent energy system, distributed energy resources, cloud technologies, edge computing, data 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-A21-121012190027-4).

References

1. Cifrovizaciya energetiki [Digitalization of Energy]. Institut energetiki Vysshej shkoly ekonomiki [Institute of energy of the Higher school of economics], 2020, available at: <https://energy.hse.ru/digitalization> (accessed: 04/04/2024)
2. Emmanuel M., Rayudu R. Communication technologies for smart grid applications: a survey. *Journal of Network and computer applications*, 2016, no. 74, pp. 133-148.
3. Voropaj N.I. Napravleniya i problemy transformacii elektroenergeticheskikh system [Directions and problems of transformation of electric power systems]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 2020, no 7, pp. 12-21.
4. Red Hat. Cloud vs. Edge, available at: <https://www.redhat.com/en/topics/cloud-computing/cloud-vs-edge> (accessed: 06/27/2024)
5. Gadzhiev M., Kravec D., Murzahanov I. et al. Oblachnye tekhnologii v energetike [Cloud technologies in energy]. *ELEKTROENERGIYA. Peredacha i raspredelenie [ELECTRIC POWER. Transmission and distribution]*, 2016, no 6, pp.52-58.
6. Edge Computing (vychisleniya na granitse) [Edge Computing (calculations at the border)]. Available at: <http://cons-systems.ru/edge-computing-vychisleniya-na-granitce> (accessed: 06/27/2024)
7. Massel' L.V. Sovremennyyj etap razvitiya iskusstvennogo intellekta (II) i primeneniye metodov i sistem II v energetike [The current stage of development of artificial intelligence (AI) and the application of AI methods and systems in energy]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management]*, 2021, no (24), pp. 5-20.
8. Wagdy Anis Aziz, Eduard Babulak, David Al-Dabass. Network function virtualization over Cloud-Cloud computing as business continuity solution. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/76746> (accessed: 06/27/2024)

9. Barablin M. Rossijskie oblaka: kak menyalsya rynek oblachnyh reshenij za poslednie gody [Russian clouds: how the cloud solutions market has changed in recent years]. Available at: <https://www.comnews.ru/content/229540/2023-10-19/2023-w42/1013/rossijskie-oblaka-kak-menyalsya-rynek-oblachnykh-resheniy-za-poslednie-gody> (accessed: 06/27/2024)
10. Tadviser. Periferijnye vychisleniya [Edge_computing], available at: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (accessed: 27/06/2024)
11. Hrisanfova E. Oblachnye, tumannye i granichnye vychisleniya: otlichiya i perspektivy razvitiya tekhnologij [Cloud, fog and edge computing: differences and prospects for technology development]. Available at: <https://rb.ru/story/edge-computing/> (accessed: 06/27/2024)
12. Sravnenie oblachnyh i tumannyh vychislenij dlya sozdaniya proektov interneta veshchej [Comparison of cloud and fog computing for building IoT projects]. Available at: <https://oncloud.ru/blog/2019/06/05/oblachnye-i-tumannye-vychisleniya-dlya-IoT>. (accessed: 06/27/2024)
13. Dunne R., Morris T., Harper S. A survey of ambient intelligence. ACM computing surveys, 2021, vol. 54, no. 4, DOI:10.1145/3447242.
14. Toropyno I. Oblachnaya ASKUE TIME2SAVE [Cloudy ASKUE TIME2SAVE]. Control Engineering, 2016, available at: <https://controleng.ru/avtomatizatsiya-zdaniy/askue-time2save/> (accessed: 06/27/2024)
15. Tianming Zheng, Ming Liu, Deepak Puthal et al. Smart grid: cyber-attacks, critical defense approaches, and digital twin, available at: <https://www.arxiv-vanity.com/papers/2205.11783/> (accessed: 06/27/2024)
16. Narayan A., Klaes M., Lehnhoff S., Rehtanz C. Analyzing the propagation of disturbances in cpes considering the states of ict-enabled grid services. 2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). IEEE, 2021, pp. 522-529.
17. Belyaev N.A., Bogomolov R.A. CIM v Rossii: opyt AO “SO EES” po vnedreniyu i soprovozhdeniyu Edinoj informacionnoj modeli EES Rossii v ierarhicheskoj strukture dispetcherskogo upravleniya, plany i perspektivy [CIM in Russia: experience of JSC “SO UES” in the implementation and maintenance of the Unified Information Model of the Unified Energy System of Russia in the hierarchical structure of dispatch control, plans and prospects]. Sbornik dokladov vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii “Elektroenergetika glazami molodezhi” [Collection of reports of the All-Russian scientific and technical conference “Electric Power Industry through the Eyes of Youth”, Irkutsk, Russia, September 16-20], Irkutsk, 2019, vol. 1, pp. 38-43.
18. Song Zhang, Amritanshu Pandey, Xiaochuan Luo et al. practical adoption of cloud computing in power systems—drivers, challenges, guidance, and real-world use cases. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 2390-2411.
19. Amazon Web Services. Navigating GDPR Compliance on AWS, 2020, available at: https://d1.awsstatic.com/whitepapers/compliance/GDPR_Compliance_on_AWS.pdf. (accessed: 06/27/2024)
20. Tyan R.L., Budovskij V.P. Osobennosti rezhimnyh trenazherov dispetchera energosistem, razrabotannyh v Rossii, Evrope i SSHA [Features of power system dispatcher simulators developed in Russia, Europe and the USA]. Energetik [Power engineer], 2013, no 9, pp. 47-51.
21. Byk F.L., Myshkina L.S. Agregator - element cifrovoj transformacii regional'noj seti [Aggregator - an element of digital transformation of the regional network]. Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti BSE: v 2-h knigah. Tom 1, vypusk 70. Otvetstvennyj redaktor Voropaj N.I Irkutsk: ISEM SO RAN [Methodological issues in studying the reliability of TSB: in 2 books. Executive editor Voropai N.I. Irkutsk: ISEM SB RAS], 2019, pp.144-152.
22. Centrica. Available at: <https://www.centrica.com/who-we-are/> (accessed: 06/27/2024)

Kolosok Irina Nikolaevna. Doctor of Sciences, Senior Researcher, MESI SB RAS, leading researcher. *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, researcher, MESI SB RAS, senior researcher. *The main areas of research: cybersecurity of electric power facilities, synchronized vector measurements, assessment of the state of electric power systems, cyber-physical systems.* AuthorID 24577537100, SPIN 8084-7363, ORCID 0000-0001-6488-5774. korkina@isem.irk.ru. 664033, Irkutsk, Lermontov str.,130.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 09/02/2024; approved after reviewing 11/28/2024; accepted for publication 12/17/2024.

УДК 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.009

Интеграция стохастических «генераторов погоды» в структурно-параметрическую оптимизацию микросетей

Еделев Алексей Владимирович^{1,3}, Карамов Дмитрий Николаевич^{2,3}, Башарина Ольга Юрьевна^{3,4}, Огородников Василий Александрович⁵, Каргаполова Нина Александровна⁵, Акентьева Марина Сергеевна⁵

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *flower@isem.irk.ru*

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск

³Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
Россия, Иркутск

⁴Уральский государственный экономический университет,
Россия, Екатеринбург

⁵Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Россия, Новосибирск

Аннотация. В данной работе предпринята попытка разработки комплексного подхода к структурно-параметрической оптимизации микросетей с учётом воздействия различных возмущений. Представленная многоуровневая схема оптимизации позволяет лицам, принимающим решения, за приемлемое время получить целый спектр альтернативных перспективных конфигураций микросети, обеспечивающих устойчивое и бесперебойное энергоснабжение потребителей в заданных неблагоприятных условиях. Стохастические «генераторы погоды» в данной схеме необходимы для формирования временных рядов природно-климатических данных разной длительности, близких к реальным в заданном географическом положении, при проверке эффективности промежуточных и окончательных результатов расчёта.

Ключевые слова: микросеть, живучесть, надёжность, предметно-ориентированная среда, стохастические генераторы погоды

Цитирование: Еделев А.В. Интеграция стохастических «генераторов погоды» в структурно-параметрическую оптимизацию микросетей / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина, В.А. Огородников, Н.А. Каргаполова, М.С. Акентьева // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36) – С. 85-97 – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.009.

Введение. Устойчивое, бесперебойное энергоснабжение потребителей при воздействии возмущений обеспечивается такими системными свойствами энергетических комплексов (ЭК), как гибкость, надёжность и живучесть, в зависимости от критичности воздействия исследуемых возмущений на системную производительность [1]. Гибкость характеризует возможности ЭК по диверсификации (взаимозаменяемости) энергоресурсов и их источников. Надёжность имеет дело с мелкими и средними возмущениями, которые система сама без внешней помощи может поглотить и компенсировать их последствия. Живучесть определяет способность системы адаптироваться и восстанавливаться при воздействии следующих классов крупных возмущений:

- стихийные бедствия, такие, как ураганы, наводнения, землетрясения, резкие похолодания и т.д.;
- техногенные катастрофы вследствие износа оборудования, ошибок персонала и т.д.;
- преднамеренные (умышленные) нарушения, такие, как кибератаки и т.д.

Микросети являются ЭК локального уровня, в которых совместное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с традиционными источниками и накопителями является экономически эффективным способом энергоснабжения потребителей. Особую значимость и большое распространение ВИЭ получили при электрификации

труднодоступных территорий, не имеющих связи с внешней электроэнергетической системой. Исходя из возможностей обеспечивать бесперебойное энергоснабжение, микросети можно разделить на следующие типы: практически автономные, полностью автономные и зависящие от подключения к внешним системам энергоснабжения.

Изменчивый характер работы ВИЭ и изолированность автономных микросетей [2] повышает значимость исследования вышеуказанных системных свойств ЭК, которые обычно строятся на проведении масштабных вычислительных экспериментов [3]. В работе [4] обсуждаются расширенные возможности, которые предоставляет цифровой двойник микросети для исследования живучести. Так, например, наличие у цифрового двойника обратной связи с объектом или его физической моделью (рис. 1) позволяет гибко подстраивать управление моделируемым объектом во время крупных возмущений и после их окончания.



Рис. 1. Цифровой двойник микросети

Для организации и проведения исследования системных свойств микросети цифровой двойник использует одну или несколько предметно-ориентированных сред (ПОС). Под ПОС понимается совокупность программно-аппаратных средств, позволяющих её конечным пользователям решать один или несколько определённых классов задач некоторой предметной области (рис. 1). В состав ПОС входят:

- распределённые пакеты прикладных программ (РППП), отвечающие за решение определённого класса задач;
- средства создания автоматизированных рабочих мест, которые позволяют исследователю работать с исходными данными, взаимодействовать с РППП, анализировать результаты вычислительных экспериментов.

В работе [5] представлена архитектура ПОС для исследования живучести и разработана методика оценки живучести микросети. Эта методика применяется в представленной в данной статье схеме структурно-параметрической оптимизации микросети для повышения её живучести в долгосрочной перспективе. Помимо этого, также обсуждается решение проблем, вызванных высокой вычислительной сложностью данной схемы, с помощью стохастических «генераторов погоды».

Проблемы структурно-параметрической оптимизации микросетей. Двухуровневая организация планирования решений о развитии и функционировании микросетей в задаче их структурно-параметрической оптимизации показана на рис. 2. На верхнем уровне принимаются решения об инвестициях в оборудование и его размещении, в то время как на нижнем уровне определяются оптимальные режимы работы выбранного оборудования [6]. Решения по развитию и функционированию микросетей принимаются согласованно. Вычислительная сложность задачи структурно-параметрической оптимизации возрастает снизу вверх [7].

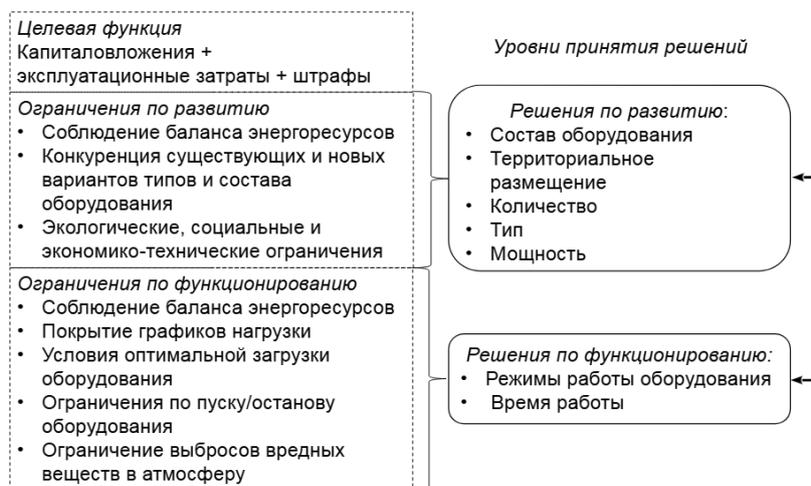


Рис. 2. Задача структурно-параметрической оптимизации микросети

Первая проблема, связанная с рассматриваемыми в этой статье микросетями, заключается в высокой вычислительной сложности их структурно-параметрической оптимизации. Такая сложность объясняется, с одной стороны, большой избыточностью различных вариантов типов и состава оборудования, необходимой для обеспечения гибкости в долгосрочной перспективе (верхний уровень на рис. 2), с другой стороны – высокой степенью пространственно-временной детализации условий функционирования системы для адекватного представления взаимодействия ВИЭ с прочими источниками и накопителями энергии в краткосрочной перспективе (нижний уровень на рис. 2) [8]. Для задания природно-климатических условий часто применяется копирование интервалов данных типичного метеорологического года [9-11].

Вторая проблема заключается в необходимости проверки эффективности промежуточных и окончательных решений структурно-параметрической оптимизации микросетей [12] в условиях различных возмущений с требуемой степенью пространственно-временной детализации. Во-первых, имитируемые условия должны быть правдоподобными и близкими к реальным. Во-вторых, условия должны различаться и составлять некоторое множество для проведения тщательного тестирования.

Первая из вышеописанных проблем имеет более глобальный характер, чем вторая, и она решается путём достижения компромисса между имеющиеся в наличии вычислительными ресурсами, приемлемым временем расчёта, точностью его результатов и факторами,

определяющими вычислительную сложность структурно-параметрической оптимизации конкретной микросети. К таким факторам относятся [13, 14]:

- детализация внутренних и внешних условий функционирования;
- экономические и технологические аспекты моделирования;
- математическая сложность модели микросети.

В зарубежной литературе решению первой проблемы (“computational tractability”) в последнее время уделяется пристальное внимание [15]. Например, для воздействия на вышеперечисленные факторы предлагается множество различных способов, которые можно условно разделить на модельные и технические [16]. Модельные способы просты в реализации и добиваются снижения времени расчётов в основном за счёт упрощения моделирования микросети, что негативно отражается на точности результатов и снижает их практическую значимость. Технические способы ускоряют вычисления и уменьшают время расчётов без потери точности, но гораздо более трудоёмки в реализации.

Для решения второй из вышеописанных проблем в литературе имеется мало работ [17-19], применимых к микросетям и гарантирующих бесперебойность энергоснабжения потребителей при воздействии возмущений. Основным недостатком таких работ является привязка к возмущениям определённой критичности. Авторам данной статьи не известно о существовании комплексного подхода к структурно-параметрической оптимизации микросетей с учётом воздействия различных возмущений. Ниже предлагается такой подход на основе существующей схемы исследования живучести ЭК с использованием стохастических «генераторов погоды».

Исследование живучести ЭК. Отправной точкой в исследовании живучести ЭК является модель функционирования и развития, которую можно записать в следующем общем виде [13]:

$$\min_x C(X), \quad (1)$$

$$g(X) \leq 0, \quad (2)$$

$$h(X) = 0, \quad (3)$$

где C – функция экономических затрат на функционирование и развитие ЭК, $X = \{x^0, x^1, \dots, x^{n_t}\}$ – искомая последовательность состояний ЭК, x^t – вектор параметров ЭК, описывающий его состояние $x \in X$ в интервал $t = \overline{0, \dots, n_t}$. Неравенства g в (2) и равенства h_j в (3) представляют разнообразные требования к функционированию и развитию ЭК.

Переход к фактическому исследованию живучести происходит путём добавления в модель (1)-(3) множества сценариев крупных возмущений V и вектора критериев живучести F :

$$\max_{i=\overline{1, n_v}} \min_{X \in S(v_i)} [C(X, v_i), F(X, v_i)]^T, \quad (4)$$

где n_v – число возмущений в множестве V , S – множество допустимых планов распределения потоков энергоресурсов, определяемое ограничениями (2) и (3) в условиях реализации крупного возмущения v_i .

Постановка (4) в целом описывает класс задач анализа уязвимости ЭК [20]. Главной целью этого класса является выявление явных и, самое главное, скрытых дефектов в территориально-производственной структуре системы и механизмах её управления. Целевая функция в (4) стремится найти наиболее значимые дефекты, сценарии использования которых остаются во множестве V и передаются в качестве исходных данных в задачи следующих классов.

Расширение постановки (4) приводит к классу задач структурно-параметрической оптимизации ЭК с целью повышения его живучести, иначе говоря – оптимизации живучести [21]:

$$\min_{j=1, n_w} \max_{i=1, n_v} \min_{X \in S(v_i, w_j)} [C(X, v_i, w_j), F(X, v_i, w_j)]^T, \quad (5)$$

где W – избыточное множество мер по повышению живучести, деактивированных в исходной конфигурации ЭК, w_j – вектор двоичных переменных, ненулевые компоненты которого активируют соответствующие меры по повышению живучести, n_w – общее число комбинаций мер из множества W . Целевая функция в (5) стремится выбрать наиболее эффективные сочетания мер по повышению живучести из множества при реализации наихудшего возмущения из заданного множества V .

Основное отличие постановки (5) от (4) заключается в переносе фокуса с возмущения на его последствия для ЭК при моделировании V [22]. В постановке (5) допускается, что для нахождения максимального ущерба системе достаточно моделировать гипотетического противника вместо реального источника возмущений. Это допущение делается, исходя из предположения, что для реального ЭК смягчение и устранение последствий крупного возмущения куда важнее рассмотрения его природы, приводящей к тяжелым последствиям вплоть до коллапса системы. Воображаемый противник обладает полными сведениями о системе, точно оценивает собственные возможности и достаточно изощрён, чтобы использовать знания о обнаруженных дефектах для планирования атак на систему. Целью атак является причинение максимального ущерба системе. Такое допущение делается для снижения вычислительной сложности задач оптимизации живучести (5).

Перечисленные выше математические постановки образуют этапы формализованной схемы, согласно которой построение исследования живучести ЭК имеет итеративный характер. Подобная схема даёт возможность взглянуть на структуру исследования живучести ЭК сверху и правильно классифицировать задачи данной предметной области, решаемые соответствующими РППП (рис. 3).

РППП для анализа уязвимости ЭК в целом отвечает за формирование представительного множества крупных возмущений, которые в полной мере должны отражать возможности источника возмущений причинить максимальный ущерб производительности моделируемой ЭК. Исходными данными для РППП для анализа уязвимости являются конфигурации ЭК и сводные метрики (рис. 3).

Понятие конфигурации в целом представляет собой определённый вариант территориально-производственной структуры ЭК, который включает в себя описание объектов энергетики и временные ряды данных, описывающих природно-климатические, социальные, экономические и прочие условия функционирования и развития этих объектов.

Сводные метрики отражают в количественном виде изменение состояния ЭК во времени и характеризуют системные возможности адаптации к воздействию крупных возмущений и восстановлению после их окончания.

Исходными данными для РППП для оптимизации живучести ЭК (рис. 3) являются сводные метрики, избыточное множество мероприятий по повышению живучести, сформированное на базе одной из конфигураций ЭК, и множество крупных возмущений, полученное в результате анализа уязвимости заданной конфигурации ЭК. Как говорилось выше, в задачах оптимизации живучести ЭК акцент делается не на природе источника возмущений, а на величине и масштабе последствий возмущения для системы. Поэтому сценарий крупного возмущения моделирует групповой отказ k из n наименее защищённых (критических) элементов системы. Отказ любого из n критических элементов сам по себе

вызывает тяжкие последствия для системы. Размер k зависит от ресурсных ограничений, наложенных на источник возмущений [22].

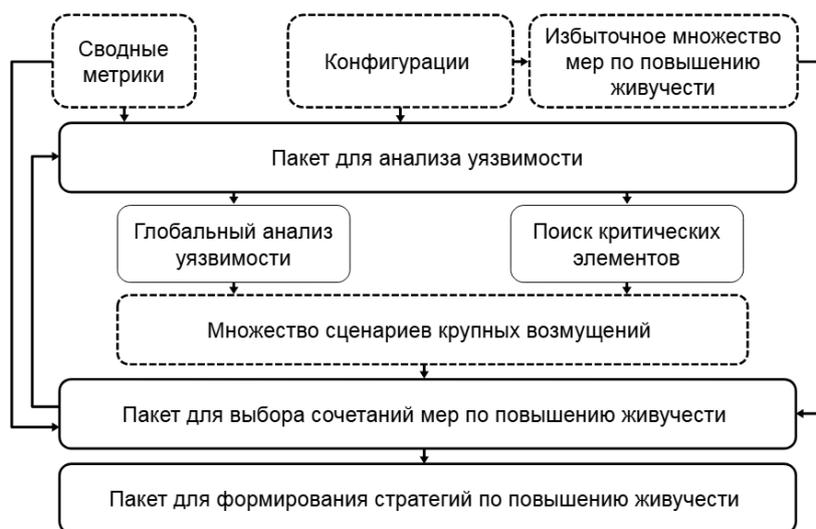


Рис. 3. Схема исследования живучести ЭК

На выходе РППП для оптимизации живучести ЭК выдаёт эффективные комбинации мер, которые обеспечивают ЭК максимальную живучесть в условиях функционирования и развития, создаваемых заданным множеством крупных возмущений. Получив такие комбинации мер для нескольких разнородных множеств крупных возмущений, далее можно провести их многокритериальный анализ и построить стратегии повышения живучести ЭК, которые определяют порядок и время реализации отобранных комбинаций. Пакет для формирования стратегий по повышению живучести (см. рис. 3) на основе динамического программирования в виде многоэтапного процесса принятия решений позволяет выполнить эту задачу.

Стохастические «генераторы погоды». Во второй половине XX века начал активно развиваться стохастический подход к моделированию и исследованию метеорологических и климатических процессов. Стохастические модели, построенные на основе входных данных различных типов (данных срочных метеонаблюдений, осредненных данных наблюдений, данных реанализа и т. п.), позволяют моделировать метеорологические процессы с заданным временным и/или пространственным разрешением. В литературе стохастические модели метеопроцессов часто называют стохастическими «генераторами погоды» (СГП). По своей сути, СГП представляют стохастические модели и соответствующие им пакеты программ, позволяющие численно моделировать длинные ряды случайных чисел, обладающих статистическими свойствами, повторяющими основные свойства реальных метеорологических рядов и полей [23, 24].

В зависимости от решаемой задачи моделируются либо значения отдельных метеопараметров и их комплексов (приземной температуры воздуха, количества осадков, относительной влажности воздуха, модуля и направления скорости ветра и др.), либо их некоторые специальные характеристики (индикаторы наличия / отсутствия осадков, минимальная и максимальная за сутки температура и т.п.). СГП допускают моделирование метеопроцессов с различным временным шагом (например, месячные, суточные, трёхчасовые, часовые или минутные).

Об актуальности разработки стохастических СГП, их теоретической и практической значимости свидетельствует то, что в настоящее время такие математические модели активно

используются для решения задач в различных областях науки, в том числе для долгосрочного проектирования микросетей [19].

Следует отметить, что численное стохастическое моделирование метеорологических процессов часто является чрезвычайно трудоёмкой задачей (особенно, если моделируются комплексы метеопараметров, как функции временных и пространственных координат).

В данной работе СГП, в частности, нужны для моделирования в заданной пространственной точке следующих важных для микросетей природно-климатических параметров [25]:

- приземной температуры воздуха (графики потребления тепла и электроэнергии);
- модуля скорости ветра (выработка электроэнергии ветроэлектрическими установками);
- облачности (выработка электроэнергии солнечными панелями).

Место СГП в схеме структурно-параметрической оптимизации микросетей. В основе общей схемы структурно-параметрической оптимизации микросетей (рис. 4) лежит синхронизация верхнего и нижнего уровней, моделирующих развитие и функционирование системы (рис. 2). Средний уровень схемы отражает специфику исследования живучести ЭК (рис. 3) и, согласно постановке (4), отвечает за оценку бесперебойности энергоснабжения потребителей при воздействии возмущений преимущественно метеорологического характера. Именно такие природные возмущения оказывают основное влияние на надёжность и живучесть локальных ЭК.

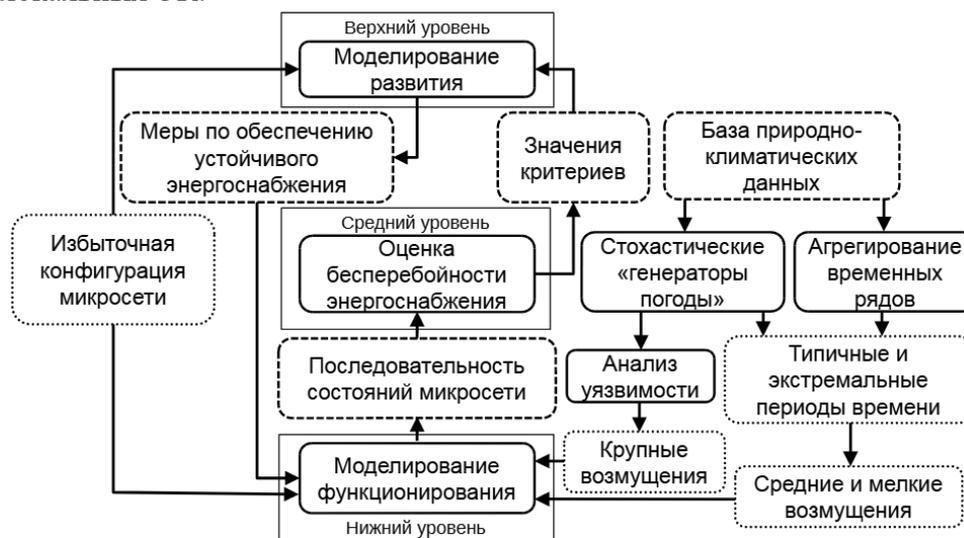


Рис. 4. Схема оптимизации живучести ЭК

На вход схемы структурно-параметрической оптимизации микросетей подаётся избыточная конфигурация микросети с деактивированными мерами по обеспечению устойчивого энергоснабжения W и множеством возмущений V . На верхнем уровне схемы численный метод поиска оптимальных решений, выбранный в результате предварительного тестирования [21], формирует вектор w_j , который определяет сочетание типов и единиц различного технологического оборудования, мест его установки. Вектор w_j передается на нижний уровень, где решается задача нахождения оптимальных режимов работы выбранного оборудования в условиях возмущений, заданных V . Результаты расчёта передаются на средний уровень для выполнения процедуры оценки бесперебойности энергоснабжения [5]. Далее рассчитанные значения критериев C и F , характеризующие эффективность сочетания мер w_j , возвращаются обратно на верхний уровень для коррекции направления оптимизации в сторону повышения надёжности или живучести микросети.

Множество V , согласно постановке (4), состоит из крупных возмущений, которые формируются в результате предварительно проведённого анализа уязвимости микросети. В настоящее время основным недостатком РППП для анализа уязвимости ЭК является отсутствие возможности рассмотрения стихийных бедствий метеорологического характера, таких, как тропический шторм, ураганный ветер, похолодание, снежная буря и засуха. Для моделирования метеорологических крупных возмущений необходимы:

- графики уязвимости компонентов микросети, которые определяют вероятность их выхода из строя в зависимости от уровня интенсивности стихийного бедствия;
- модель стихийного бедствия, которая должна уметь рассчитывать его интенсивность в определённый момент времени и в заданной точке пространства.

Типовой график уязвимости компонента показан на рис. 5, где x обозначает параметр стихийного бедствия, $p(x)$ – вероятность отказа компонента, x_1 – интенсивность стихийного бедствия, начиная с которой вероятность отказа компонента начинает возрастать, x_2 представляет собой значение параметра стихийного бедствия, при котором однозначно происходит отказ компонента, т.е. $p(x_2) = 1$ [26].



Рис. 5. Типовой график уязвимости компоненты микросети

Для моделирования стихийных бедствий метеорологического характера планируется использовать СГП. Вместе со средствами агрегирования временных рядов планируется применять СГП для построения сценариев средних и мелких возмущений, так как схема на рис. 4 касается исследования не только живучести, но и надёжности микросетей. Для исследования надёжности важно, чтобы сценарии возмущений наряду с «типичными» или «репрезентативными» периодами времени, представляющими наиболее характерные природно-климатические условия функционирования микросетей, также содержали «экстремальные» периоды, представляющие ухудшения погодных условий [18].

Размер множества V , включающего в себя, помимо крупных, также средние и мелкие возмущения, следует добавить в вышеприведённый список факторы, определяющие вычислительную сложность структурно-параметрической оптимизации микросетей. Управление размером V относится к модельным способам балансировки вычислительной сложности, и для компенсации их основного недостатка, описанного выше, требуется анализ чувствительности результатов структурно-параметрической оптимизации [12]. Последнее основано на массовом тестировании результатов оптимизации на дополнительном множестве возмущений, сформированном с помощью СГП. Здесь стоит отметить, что типичный метеорологический год не содержит «экстремальных» периодов, поэтому многократное дублирование его интервалов не позволяет провести качественный анализ чувствительности результатов оптимизации [19].

Заключение. Цифровые двойники упрощают планирование, первоначальную эксплуатацию оборудования, обучение персонала и техническое обслуживание, поэтому их использование в энергетике должно стать основным инструментом для структурно-

параметрической оптимизации микросетей и тестирования энергетического оборудования. При проектировании и реконструкции микросетей цифровые двойники могут быть использованы для оценки устойчивости и бесперебойности энергоснабжения потребителей в условиях воздействия различных возмущений. Это особенно актуально для автономных микросетей, широко использующих ВИЭ для энергоснабжения труднодоступных территорий.

В настоящее время в литературе нет работ, посвященных комплексному подходу к структурно-параметрической оптимизации микросетей с учётом воздействия различных возмущений. Это вызвано большой вычислительной сложностью таких задач, которая, в частности, обусловлена необходимостью высокой степени детализации условий функционирования микросетей для адекватного представления взаимодействия ВИЭ с прочими источниками и накопителями энергии.

В данной работе предпринята попытка разработки такого комплексного подхода на основе существующей схемы исследования живучести ЭК. Представленная многоуровневая схема структурно-параметрической оптимизации позволяет лицам, принимающим решения, за приемлемое время получить целый спектр альтернативных перспективных конфигураций микросети, обеспечивающих устойчивое и бесперебойное энергоснабжение потребителей в заданных неблагоприятных условиях. Эти конфигурации могут быть далее проанализированы с учетом дополнительных неформализованных знаний о конкретной системе. Стохастические «генераторы погоды» в данной схеме необходимы для формирования временных рядов природно-климатических данных разной длительности, близких к реальным в заданном географическом положении, при проверке эффективности промежуточных и окончательных результатов расчёта.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

Список источников

1. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4-х томах. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
2. Карамов Д.Н. Интеграция процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники энергии / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 113-130.
3. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V. et al. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of computer and systems sciences international*, 2021, vol. 60, no. 6. pp. 981-994, DOI:10.1134/S1064230721060071.
4. Еделев А.В. Моделирование автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 3(31). – С.74-85. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
5. Еделев А.В. Методика оценки живучести автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 4(32). – С.117-126. – DOI:10.25729/ESI.2023.32.4.010.
6. Wang L., Yang Z., Sharma S. et al. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants. *Energies*, 2018, vol. 12(1), p.73.
7. Bahl B., Hennen M., Lampe M. et al. Optimization-based synthesis of resource-efficient utility systems. Resource efficiency of processing plants: monitoring and improvement, 2018, pp. 373-401.
8. Deng X., Lv T. Power system planning with increasing variable renewable energy: a review of optimization models. *Journal of cleaner production*, 2020, 246, p.118962.

9. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов fm 12 Synop и metar в системных энергетических исследованиях / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. –Т. 329. – № 1. – С. 69-88.
10. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R. et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. Solar energy, 2007, vol. 81, pp. 1409-1425.
11. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021), CEUR-WS Proceedings, 2021, vol. 2984, pp. 95-100, DOI: 10.47350/ITAMS.2021.12.
12. Bistline J., Blanford G., Mai T., Merrick J. Modeling variable renewable energy and storage in the power sector. Energy policy, 2021, vol. 156, p.112424.
13. Иерархическое моделирование систем энергетики / отв.ред. Н.И. Воропай, В.А. Стенников. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – 314 с.
14. Hoffmann M., Schyska B.U., Bartels J. et al. A review of mixed-integer linear formulations for framework-based energy system models. Advances in applied energy, 2024, p.100190.
15. Bröchin M., Pickering B., Tröndle T. et al. Harder, better, faster, stronger: understanding and improving the tractability of large energy system models. Energy, sustainability and society, 2024, vol. 14, no. 1, p. 27, DOI:10.1186/s13705-024-00458-z.
16. Cao K.K., Von KrbeK K., Wetzel M. et al. Classification and evaluation of concepts for improving the performance of applied energy system optimization models. Energies, 2019, vol. 12, no. 24, p. 4656.
17. Pfetsch M.E., Schmitt A. A generic optimization framework for resilient systems. Optimization methods and software, 2023, vol. 38, no. 2, pp.356-385.
18. Castelli A.F., Pilotti L., Monchieri A., Martelli E. Optimal design of aggregated energy systems with (n-1) reliability: MILP models and decomposition algorithms. Applied energy, 2024, vol. 356, p. 122002.
19. Ailliot P., Boutigny M., Koutroulis E., et al. Stochastic weather generator for the design and reliability evaluation of desalination systems with renewable energy sources. Renewable energy, 2020, vol. 158, pp. 541-553.
20. Еделев А.В. Анализ уязвимости автономных микросетей / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 1(33). – С. 112-121. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010.
21. Еделев А.В. Методика выбора алгоритмов оптимизации живучести энергетических инфраструктур / А.В. Еделев, Н.М. Береснева, Р.О. Костромин // Системы анализа и обработки данных, 2023. – №4(92). – С.97-129.
22. Alderson D.L., Brown G.G., Carlyle W.M. Assessing and improving operational resilience of critical infrastructures and other systems. Tutorials in operations research: bridging data and decisions (INFORMS, Catonsville, MD), 2014, pp. 180-215.
23. Ailliot P., Allard D., Monbet V., Naveau P. Stochastic weather generators: an overview of weather type models. Journal de la société française de statistique, 2015, vol. 156, no. 1, pp. 101-113.
24. Mehan S., Guo T., Gitau M.W., Flanagan D.C. Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation. Climate, 2017, vol. 5, p. 26.
25. Akenteva M.S., Kargapolova N.A., Ogorodnikov V.A. Development of a numerical stochastic model of joint spatio-temporal fields of weather parameters for the south part of the Baikal natural territory. Russian journal of numerical analysis and mathematical modelling, 2022, vol. 37, no.2, pp.73-83.
26. Panteli M., Mancarella P., Trakas D.N. et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems. IEEE Transactions on power systems, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4732-4742.

Еделев Алексей Владимирович. К.т.н., старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Область научных интересов – живучесть энергетических комплексов, математическое моделирование, распределенные вычисления, flower@isem.irk.ru, AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754.

Карамов Дмитрий Николаевич. К.т.н., доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Байкальский институт БРИКС. Область научных интересов – энергетические системы и комплексы, возобновляемые источники энергии, математическое моделирование, dmitriy.kararov@mail.ru., AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826.

Башарина Ольга Юрьевна. К.т.н., доцент, научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, доцент Уральского государственного экономического университета. Область научных интересов – системный анализ и моделирование сложных систем, basharinaolga@mail.ru, AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X.

Огородников Василий Александрович. Д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики. Область научных интересов – вычислительная математика, стохастическое моделирование природных процессов, *ova@osmf.sscs.ru*, AuthorID: 8406, SPIN: 8765-8560, ORCID: 0000-0001-6205-0220.

Каргаполова Нина Александровна. Д.ф.-м.н., заведующий лабораторией Института вычислительной математики и математической геофизики. Область научных интересов – вычислительная математика, стохастическое моделирование природных процессов, *nkargapolova@gmail.com*, AuthorID: 949493, SPIN: 1447-0760, ORCID: 0000-0002-1598-7675.

Акентьева Марина Сергеевна. Младший научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики. Область научных интересов – методы Монте-Карло, математическое моделирование природных явлений, *akenteva@sscs.ru*, AuthorID: 1264179, SPIN: 9853-0648.

UDC 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.009

The integration of stochastic weather generators into the design of microgrids

Alexey V. Edelev¹, Dmitriy N. Karamov², Olga Yu. Basharina^{3,4}, Vasily A. Ogorodnikov⁵,
Nina A. Kargapolova⁵, Marina S. Akenteva⁵

¹Melentiev energy systems institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, *flower@isem.irk.ru*

²National research irkutsk state technical university,
Russia, Irkutsk

³Matrosov institute for system dynamics and control theory of SB RAS,
Russia, Irkutsk

⁴Ural state university of economics,
Russia, Yekaterinburg

⁵Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS,
Russia, Novosibirsk

Abstract. The objective of this paper is to develop an integrated approach to structural and parametric optimization of microgrids, taking into account the impact of various disruptions. The proposed multi-level optimization framework enables decision-makers to identify a range of promising microgrid designs within an acceptable timeframe, thereby ensuring a stable and continuous power supply to users under specified adverse conditions. In this framework, stochastic "weather generators" are crucial for generating time series of natural and climate data with varying durations that closely resemble real-world values in a given geographic location. This is done for the purpose of evaluating the effectiveness of intermediate and final computational results.

Keywords: microgrid, resilience, reliability, subject-oriented environment, stochastic weather generators

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant No. 075-15-2024-533 for implementation of Major scientific projects on priority areas of scientific and technological development (the project "Fundamental research of the Baikal natural territory based on a system of interconnected basic methods, models, neural networks and a digital platform for environmental monitoring of the environment").

References

1. Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya [Reliability of energy systems and their equipment], vol. 1. Ed Rudenko Yu.N., Moscow, Energoatomizdat, 1994, 480 p.
2. Karamov D.N. Integratsiya protsessov kategorizatsii elektrokhimicheskikh istochnikov energii v unikal'nom sostave oborudovaniya avtonomnykh energeticheskikh kompleksov, ispol'zuyushchikh istochniki energii [Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering], 2019, v. 330, no. 5, pp. 113-130.

3. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V. et al. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of computer and systems sciences international*, 2021, vol. 60, no. 6. pp. 981-994, DOI:10.1134/S1064230721060071.
4. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu. Modelirovaniye avtonomnoy mikroseti [Modelling autonomous microgrids]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 3(31), pp.74-85, DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
5. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu. Metodika otsenki zhivuchesti avtonomnoy mikroseti [Methodology for assessing the resilience of an autonomous microgrid]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 4(32), pp.117-126, DOI:10.25729/ESI.2023.32.4.010.
6. Wang L., Yang Z., Sharma S. et al. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants. *Energies*, 2018, vol. 12(1), p.73.
7. Bahl B., Hennen M., Lampe M. et al. Optimization-based synthesis of resource-efficient utility systems. *Resource efficiency of processing plants: monitoring and improvement*, 2018, pp. 373-401.
8. Deng X., Lv T. Power system planning with increasing variable renewable energy: a review of optimization models. *Journal of cleaner production*, 2020, 246, p.118962.
9. Karamov D.N. Formirovaniye iskhodnykh meteorologicheskikh massivov s ispol'zovaniyem mnogoletnikh ryadov fm 12 Synop i metar v sistemnykh energeticheskikh proizvodstvakh [Formation of initial meteorological arrays using long-term series fm 12 Synop and metar in system energy studies]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2018, v. 329, no. 1, pp. 69-88.
10. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R. et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. *Solar energy*, 2007, vol. 81, pp. 1409-1425.
11. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. *Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021), CEUR-WS Proceedings*, 2021, vol. 2984, pp. 95-100, DOI: 10.47350/ITAMS.2021.12.
12. Bistline J., Blanford G., Mai T., Merrick J. Modeling variable renewable energy and storage in the power sector. *Energy policy*, 2021, vol. 156, p.112424.
13. Iyerarkhicheskoye modelirovaniye sistem ustoychivosti [Hierarchical modeling of energy systems]. Eds. N.I. Voropay, V.A. Stennikov. Novosibirsk, Akademicheskoye izd-vo "Geo" [Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo"], 2020, 314 p.
14. Hoffmann M., Schyska B.U., Bartels J. et al. A review of mixed-integer linear formulations for framework-based energy system models. *Advances in applied energy*, 2024, p.100190.
15. Bröchin M., Pickering B., Tröndle T. et al. Harder, better, faster, stronger: understanding and improving the tractability of large energy system models. *Energy, sustainability and society*, 2024, vol. 14, no. 1, p. 27, DOI:10.1186/s13705-024-00458-z.
16. Cao K.K., Von Krbek K., Wetzel M. et al. Classification and evaluation of concepts for improving the performance of applied energy system optimization models. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 24, p. 4656.
17. Pfetsch M.E., Schmitt A. A generic optimization framework for resilient systems. *Optimization methods and software*, 2023, vol. 38, no. 2, pp.356-385.
18. Castelli A.F., Pilotti L., Monchieri A., Martelli E. Optimal design of aggregated energy systems with (n-1) reliability: MILP models and decomposition algorithms. *Applied energy*, 2024, vol. 356, p. 122002.
19. Ailliot P., Boutigny M., Koutroulis E., et al. Stochastic weather generator for the design and reliability evaluation of desalination systems with renewable energy sources. *Renewable energy*, 2020, vol. 158, pp. 541-553.
20. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu. Analiz uyazvimosti avtonomnykh mikrosetey [Vulnerability analysis of autonomous microgrids]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 1(33), pp. 112-121, DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010.
21. Edelev A.V., Beresneva N.M., Kostromin R.O. Metodika vybora algoritmov optimizatsii zhivuchesti energeticheskikh infrastruktur [Methodology for selecting algorithms for optimizing the survivability of energy infrastructures]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh* [Data analysis and processing systems], 2023, no 4(92), pp. 97-129.
22. Alderson D.L., Brown G.G., Carlyle W.M. Assessing and improving operational resilience of critical infrastructures and other systems. *Tutorials in operations research: bridging data and decisions (INFORMS, Catonsville, MD)*, 2014, pp. 180-215.
23. Ailliot P., Allard D., Monbet V., Naveau P. Stochastic weather generators: an overview of weather type models. *Journal de la société française de statistique*, 2015, vol. 156, no. 1, pp. 101-113.

24. Mehan S., Guo T., Gitau M.W., Flanagan D.C. Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation. *Climate*, 2017, vol. 5, p. 26.
25. Akenteva M.S., Kargapolova N.A., Ogorodnikov V.A. Development of a numerical stochastic model of joint spatio-temporal fields of weather parameters for the south part of the Baikal natural territory. *Russian journal of numerical analysis and mathematical modelling*, 2022, vol. 37, no.2, pp.73-83.
26. Panteli M., Mancarella P., Trakas D.N. et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems. *IEEE Transactions on power systems*, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4732-4742.

Edelev Alexey Vladimirovich. Candidate of Technical Sciences, Researcher, Melentiev energy systems institute. The main direction of research – resilience of energy systems, mathematical modeling, distributed computing, flower@isem.irk.ru, AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754.

Karamov Dmitriy Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National research irkutsk state technical university, Baikal School of BRICS. The main direction of research - energy systems and power engineering complexes, renewable energy sources, mathematical modelling, dmitriy.karamov@mail.ru, AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826.

Basharina Olga Yurievna. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher at the Matrosov institute for system dynamics and control theory of SB RAS, Ural state university of economics. The main direction of research - system analysis and modeling of complex systems, basharinaolga@mail.ru, AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X.

Ogorodnikov Vasily Aleksandrovich. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Main researcher, Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS. The main direction of research – Computational Mathematics, stochastic modelling of natural processes, ova@osmf.sccc.ru, AuthorID: 8406, SPIN: 8765-8560, ORCID: 0000-0001-6205-0220.

Kargapolova Nina Aleksandrovna. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of laboratory, Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS. The main direction of research – Computational Mathematics, stochastic modelling of natural processes, nkargapolova@gmail.com, AuthorID: 949493, SPIN: 1447-0760, ORCID: 0000-0002-1598-7675.

Akenteva Marina Sergeevna. Junior researcher, Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS. The main direction of research – Monte Carlo methods, mathematical simulation of natural phenomena, akenteva@sscc.ru, AuthorID: 1264179, SPIN: 9853-0648.

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 10/29/2024; approved after reviewing 12/12/2024; accepted for publication 12/17/2024.

Оптимизация и многокритериальный выбор конфигурации гибридной автономной энергетической системы на основе программы nPro и метода TOPSIS

Шакиров Владислав Альбертович, Пионкевич Владимир Андреевич

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, *shakirovva@ex.istu.edu*

Аннотация. Электро- и теплоснабжение потребителей удаленных и труднодоступных территорий целесообразно во многих случаях осуществлять с использованием возобновляемых источников энергии. Проектирование оптимальной автономной энергетической системы сопряжено с рядом сложностей: стохастический характер потенциала возобновляемых источников энергии, многообразие технико-экономических параметров и технологических ограничений оборудования. Длительный жизненный цикл энергетической системы и многочисленность целей, преследуемых при ее создании или развитии, приводят к необходимости многокритериального рассмотрения задачи. В статье проведен обзор методов и программного обеспечения для выбора конфигураций энергетических систем, показана актуальность развития многокритериальных подходов. Предложен двухэтапный подход к многокритериальному выбору конфигурации автономной энергетической системы. На первом этапе используется программа nPro, обеспечивающая оптимизацию конфигураций различных энергетических систем, включающих ветровые энергетические установки, фотоэлектрические преобразователи, тепловые насосы, солнечные коллекторы, накопители электрической и тепловой энергии. На втором этапе проводится многокритериальная оценка сформированных энергетических систем методом TOPSIS. Для повышения обоснованности получаемых решений весовые коэффициенты критериев определяются на основе объективного оценивания методом энтропии, а также субъективным методом. Пример применения подхода рассматривается для удаленного населенного пункта Усть-Соболевка, расположенного в Приморском крае. В результате определены десять конфигураций для автономного электро- и теплоснабжения и проведена их многокритериальная оценка с учетом четырех критериев: капитальные затраты, нормированная стоимость производства электрической и тепловой энергии, выбросы диоксида углерода. Наиболее предпочтительная конфигурация характеризуется сравнительно низкими капитальными затратами и выбросами диоксида углерода, а также лучшими среди рассматриваемых вариантов оценками нормированной стоимости производства электрической и тепловой энергии.

Ключевые слова: автономная энергетическая система, возобновляемые источники энергии, оптимизация, моделирование

Цитирование: Шакиров В.А. Оптимизация и многокритериальный выбор конфигурации гибридной автономной энергетической системы на основе программы nPro и метода TOPSIS / В.А. Шакиров, В.А. Пионкевич // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 98-111. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.010.

Введение. Гибридные энергетические системы с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) уже несколько десятилетий внедряются во всем мире для повышения эффективности и надежности энергоснабжения. Основной областью применения таких систем являются удаленные и труднодоступные районы, районы с уязвимой экологической обстановкой или районы с перспективой развития туризма. Повышение внимания к проблемам экологии и климата усиливают интерес к гибридным энергетическим системам.

В России более 60% территории находится в зоне децентрализованного электроснабжения. Многочисленные дизельные электростанции осуществляют электроснабжение потребителей, расположенных на этих территориях. Общее количество локальных объектов генерации, осуществляющих электроснабжение в децентрализованной зоне Дальневосточного федерального округа (ДФО) и Арктической зоне Российской Федерации, составляет 471 единицу, в том числе 459 дизельных, 12 газотурбинных и газопоршневых электростанций [1]. Высокая

стоимость доставки топлива, высокий износ оборудования дизельных электростанций определяют низкую эффективность электроснабжения. Экономически обоснованный тариф на производство электроэнергии на дизельном топливе на изолированных и труднодоступных территориях в среднем превышает 50 руб./кВт·ч [1, 2]. По данным Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации, объем перекрестного субсидирования для технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем в ДФО составляет в среднем 20 млрд. руб. в год [1].

Для повышения экономической эффективности электроснабжения проводится модернизация дизельных электростанций путем включения в их состав различных установок на основе ВИЭ. В России это направление особенно активно развивается в Республике Саха (Якутия), где уже введено более 20 автономных гибридных энергокомплексов, сочетающих дизельную и солнечную генерацию [3].

Выбор конфигурации или мощности компонентов гибридной энергетической системы представляет собой многокритериальную оптимизационную задачу, усложненную необходимостью учитывать ряд факторов [4]. Основным усложняющим фактором является стохастический характер потенциала возобновляемых энергоресурсов, что требует рассмотрения задачи с высокой временной детализацией, как правило, часовой, за длительный период времени. Это обеспечивает возможность учета различных сочетаний периодов с высоким и низким потенциалом ВИЭ для определения целесообразной емкости накопителей, резервных источников энергии. Другим усложняющим фактором является широкий спектр технологических ограничений основного оборудования, многообразные технико-экономические характеристики. Так, необходимо учитывать деградацию накопителей энергии, минимальный допустимый уровень разряда аккумуляторных батарей и работы генераторов, режимы работы источников тепловой энергии и другие. Дополнительно усложняет задачу необходимость учитывать при оптимизации не только экономические критерии, но и критерии воздействий на окружающую среду, критерии надежности электроснабжения, качества электроэнергии, социальные аспекты и другие. Набор критериев определяется районом размещения автономной энергосистемы, сложившимися и перспективными инфраструктурными, социально-экономическими и природными условиями.

К настоящему времени разработаны многочисленные методы, модели и программное обеспечение для оптимизации конфигурации автономных энергосистем, однако не в полной мере решены вопросы многокритериального выбора конфигурации. В статье рассматривается подход, основанный на использовании программы nPro и многокритериального метода TOPSIS.

Обзор подходов к выбору конфигураций энергетических систем. Проблеме выбора конфигурации гибридных энергосистем посвящены многочисленные работы. Основные исследования можно условно разделить на две группы. В первую группу входят исследования по оптимизации только систем, обеспечивающих потребителей электроэнергией на основе ВИЭ-генерации, генераторов на органическом топливе. Во вторую группу входят работы по оптимизации энергетических систем, обеспечивающих в общем случае электро-, тепло-, холодо- и газоснабжение потребителей с использованием нескольких видов энергоносителей.

В рамках первой группы исследований разработаны многочисленные подходы для оптимизации конфигураций гибридных энергокомплексов, работающих как изолированно от централизованной энергосистемы, так и совместно с ней. Для выбора конфигураций гибридных энергокомплексов используется специальное программное обеспечение, такое, как HOMER PRO [5], iHOGA [6], TRNSYS [7]. Многие исследования посвящены разработке альтернативных программных продуктов и моделей, использующих классические методы оптимизации и

эвристические подходы. Наиболее используемые классические методы: линейное программирование и смешанное целочисленное линейное программирование [8]. Наиболее широко применяемые эвристические методы и алгоритмы: роя частиц, светлячков, колонии муравьев и пчел, генетический алгоритм [8, 9]. В силу меньшей сложности задач первой группы к настоящему времени разработаны различные подходы по оптимизации с учетом многочисленных факторов: многокритериальности, неопределенности, климатических особенностей и других.

В рамках исследований второй группы разрабатываются более сложные мультиэнергетические системы, обеспечивающие в общем случае электро-, тепло-, холодо- и газоснабжение потребителей с использованием нескольких видов энергоносителей. Для создания таких систем и управления ими также разработаны многочисленные модели и методы, однако больший акцент в исследованиях сделан на технологические аспекты и технико-экономическую оценку эффективности [10]. Оптимизация конфигураций мультиэнергетических систем также выполняется с использованием специального программного обеспечения, обеспечивающего возможность рассмотрения нескольких видов энергии, такого, как TRNSYS [11], HOMER PRO [12], EnergyPlus [13], SpineOpt [14], nPro [15]. При этом значительно больший объем исследований включает разработку авторского программного обеспечения на основе классических методов оптимизации [16] или эвристических подходов [17]. Это связано с существенным ограничением существующего программного обеспечения (TRNSYS, HOMER PRO, EnergyPlus) в функциональном аспекте и в вариантах комбинаций различных технологий. Однако создаваемые модели и альтернативное программное обеспечение, хоть и устраняют отмеченные недостатки коммерческих платформ, но, в свою очередь, направлены на исследование узкого набора отдельных технологий. Необходимо отметить, что программа nPro обладает рядом преимуществ. Прежде всего программа имеет web-интерфейс, что позволяет избежать процедуры установки программного обеспечения. Такие процедуры могут быть сравнительно сложны. Например, SpineOpt имеет длительную многоэтапную и многокомпонентную установку с использованием командной строки. Другим преимуществом является широкий набор технологий для моделирования: ВИЭ-генерация на основе энергии солнца, ветра, биомассы; водородные технологии; тепловые насосы; накопители тепловой и электрической энергии. Программа позволяет рассматривать потребителей электрической, тепловой и холодной энергии.

Для учета многокритериальности при разработке конфигурации гибридных энергетических систем можно выделить три подхода. В рамках первого подхода проводится многокритериальная оптимизация конфигурации энергетической системы на основе эвристических методов, таких, как многокритериальный рой частиц [18, 19], многокритериальный генетический алгоритм [20]. Вторым подходом является формирование множества недоминируемых альтернатив на основе одного из эвристических методов, например NSGA-II. Далее применяется многокритериальный метод для выбора наиболее эффективной альтернативы из множества Парето. Третий подход заключается в создании избыточного количества конфигураций путем задания различных ограничений или изменением исходных условий и последующем многокритериальном выборе лучшего варианта. Для создания множества конфигураций часто применяется HOMER PRO, а для многокритериального сравнения методы аналитической иерархии, TOPSIS [21]. В рамках этих подходов в исследованиях рассматриваются преимущественно экономические (нормированная стоимость электроэнергии, капитальные затраты, чистые приведенные затраты) и экологические (выбросы диоксида углерода) критерии.

Для многокритериального выбора конфигураций мультиэнергетических систем используются методы аналитической иерархии, ELECTRE, PROMETHEE и другие [22]. Можно отметить малое количество исследований по многокритериальному выбору конфигураций мультиэнергетических систем в условиях неопределенности исходной информации и сценариев

развития территории. Методы и подходы, разработанные для более простых гибридных энергетических систем, еще не нашли широкого применения для мультиэнергетических систем.

Таким образом, выполненный обзор показывает, что перспективным направлением исследований являются развитие многокритериальных методов и моделей для оптимизации конфигураций мультиэнергетических систем.

Модели и методы. На рис. 1 представлены этапы предлагаемого подхода для оптимизации и многокритериального выбора автономной энергетической системы.

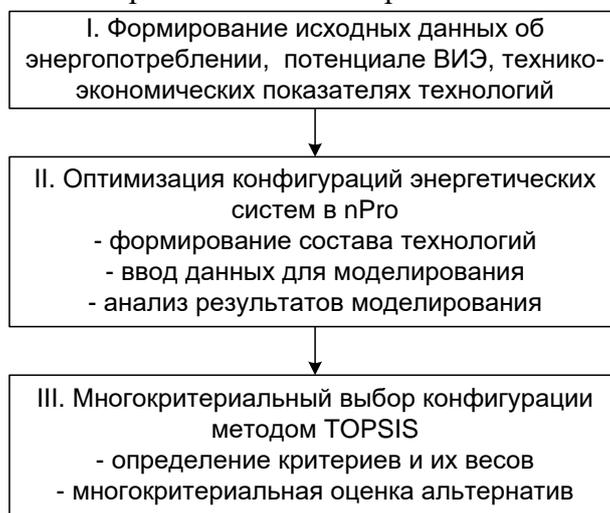


Рис. 1. Подход к оптимизации и многокритериальному выбору конфигураций гибридных автономных энергетических систем

На первом этапе проводится формирование исходных данных для моделирования. Формирование часовых графиков электрических нагрузок может осуществляться на основе руководящих указаний по проектированию электроснабжения сельского хозяйства, городских электрических сетей [23, 24]. Расчет тепловых нагрузок выполняется на основе удельных отопительных и вентиляционных характеристик зданий, норм расхода горячей воды или по укрупненным показателям расхода теплоты на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение. Для моделирования установок на основе энергии солнца и ветра необходимы данные часового разрешения о поступлении на горизонтальную поверхность суммарной и длинноволновой солнечной радиации, данные о поступлении солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность, о температуре и скорости ветра. Такую информацию можно сформировать, используя, например, базу данных реанализа ERA-5 [25]. Также на этом этапе необходимо сформировать данные о технико-экономических показателях технологий: удельные капитальные и эксплуатационные затраты, коэффициент полезного действия, срок службы и другие.

На втором этапе проводится оптимизация конфигураций различных энергетических систем в программе nPro. Формирование множества вариантов для многокритериального сравнения осуществляется заданием ограничений на капитальные затраты или выбросы диоксида углерода.

На третьем этапе проводится многокритериальный выбор конфигурации с использованием метода TOPSIS. Основные этапы метода включают [26]:

- Формирование набора критериев, который зависит как от целей, преследуемых при многокритериальном выборе, так и от полученных оценок альтернатив. Так, например, если все конфигурации энергетических систем обеспечивают отсутствие выбросов диоксида углерода, то такой критерий может быть исключен из рассмотрения.
- Формирование матрицы решений $(x_{ij})_{m \times n}$ с оценками x_{ij} альтернатив m по критериям n .
- Нормализация оценок с использованием формулы:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

- Оценка весовых коэффициентов критериев w_j . В настоящее время для оценки весов используются два основных подхода – субъективный и объективный [27]. Оба подхода имеют преимущества и недостатки и могут комбинироваться. Субъективный подход основан на выявлении предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР), в диалоговых процедурах. Объективный подход основан на анализе оценок альтернатив по критериям: чем больше интервал изменения оценок по критерию, тем больший вес имеет критерий. Одним из методов, реализующих такой подход, является метод энтропии [28, 29]. Энтропия оценивается по формуле:

$$E_j = \frac{-(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln(f_{ij}))}{\ln(m)}, \quad (2)$$

где

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}. \quad (3)$$

Вес j -го критерия:

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{k=1}^n (1-E_k)}, \quad (4)$$

- Формирование взвешенной матрицы $(t_{ij})_{m \times n}$ с нормализованными оценками:

$$t_{ij} = r_{ij} w_j \quad (5)$$

- Определение идеальной лучшей A_b и худшей альтернативы A_w проводится путем присвоения двум искусственным альтернативам лучших и худших оценок по критериям от всех реальных конфигураций энергетических систем.
- Определение расстояний от каждой i альтернативы до идеальной лучшей A_b и худшей A_w альтернатив:

$$d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{wj})^2}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{bj})^2}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

- Многокритериальная оценка альтернатив определяется по формуле:

$$s_i = \frac{d_{iw}}{d_{iw} + d_{ib}} \quad (8)$$

Альтернативы с большим значением s_i являются более предпочтительными с позиций рассматриваемых критериев.

Применение подхода. Предлагаемый подход к многокритериальному выбору конфигурации гибридной автономной энергетической системы применен на примере населенного пункта Усть-Соболевка, расположенного в Приморском крае.

Село Усть-Соболевка расположено на левом берегу реки Соболевка примерно в 1 км до впадения её в бухту Соболевка Японского моря. Расстояние от Усть-Соболевки до районного центра поселка городского типа Терней составляет около 170 км. Численность населения составляет 190 человек. В настоящее время электроснабжение поселка осуществляется от дизельной электростанции (ДЭС) мощностью 516 кВт. Максимум электрической нагрузки наблюдается зимой и составляет 100 кВт [30]. В схемах и программе развития электроэнергетики Приморского края 2019-2020 гг. рассматривались два варианта электроснабжения удаленных населенных пунктов, включая Усть-Соболевку – строительство линий электропередачи и подстанций для подключения к энергосистеме и развитие гибридных энергокомплексов.

На рис. 2 представлены принятые для моделирования графики электрических нагрузок для четырех сезонов. На рис. 3 показан часовой график тепловых нагрузок. На рис. 4 представлены данные о скорости ветра и солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность.

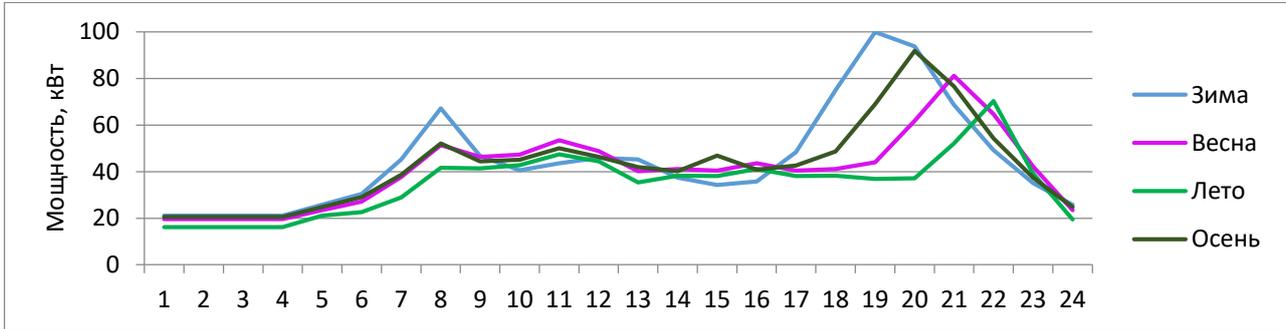


Рис. 2. Суточные графики электрических нагрузок с. Усть-Соболевка для 4-х сезонов

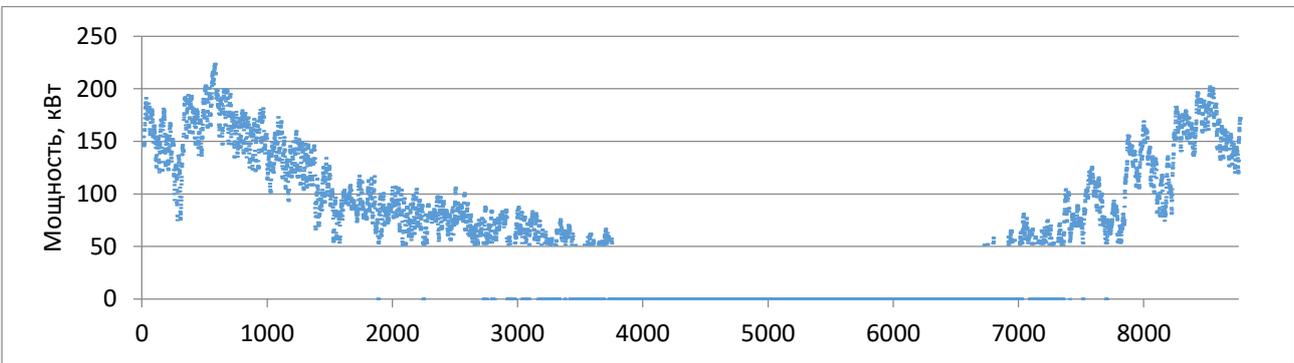


Рис. 3. Годовой график тепловых нагрузок с. Усть-Соболевка часовой детализации

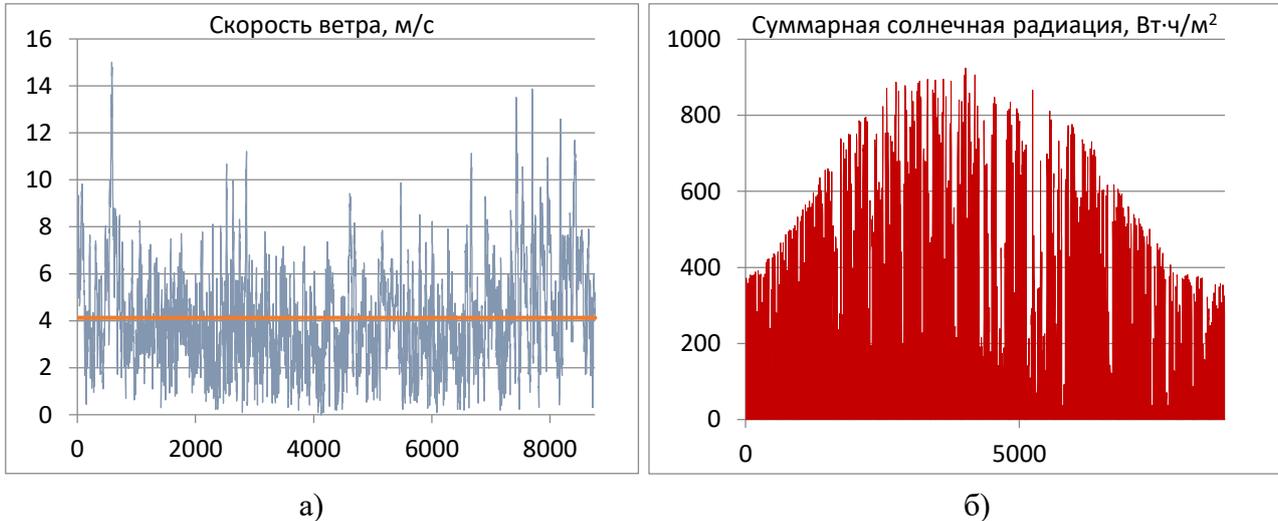


Рис. 4. Данные о потенциале ВИЭ а) скорость ветра на высоте 10 м б) суммарная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность

На рис. 5 показана обобщенная структура энергетической системы с выбранными для моделирования технологиями.

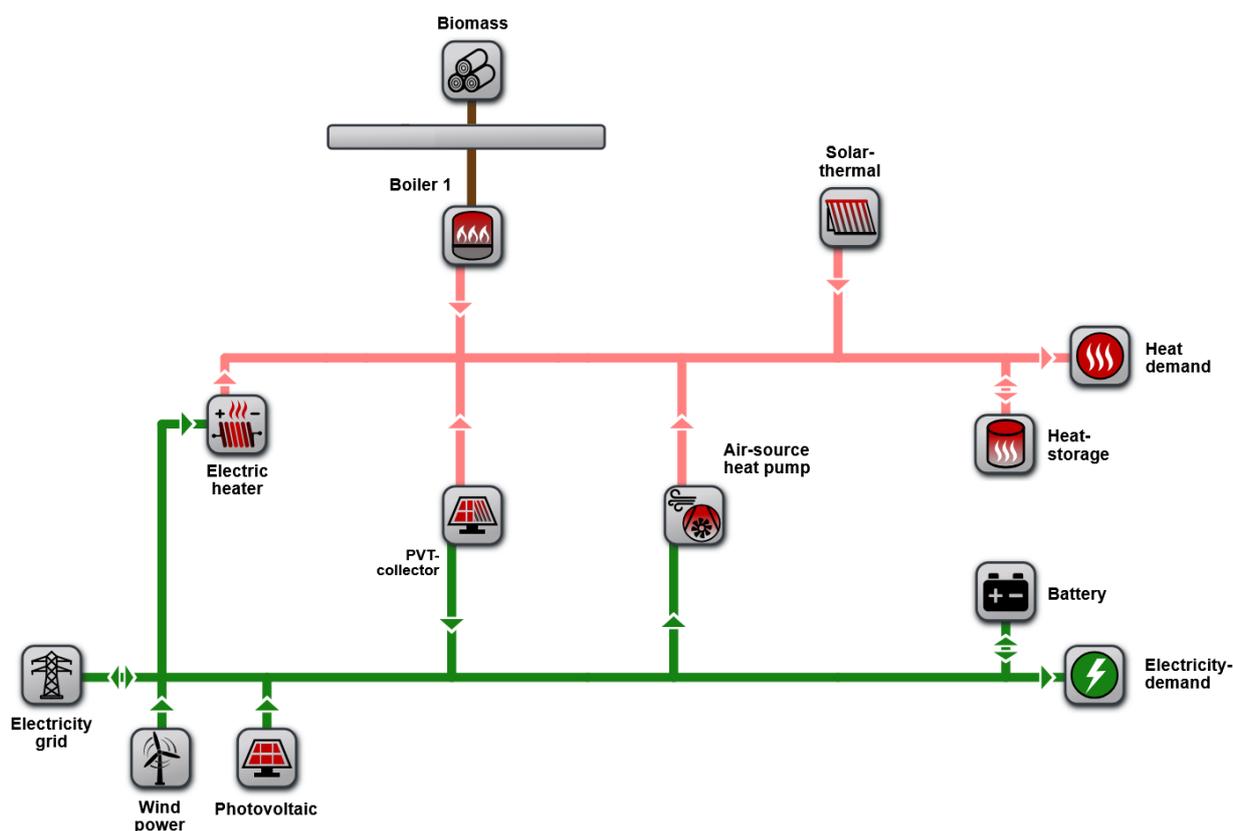


Рис. 5. Обобщенная структура энергетической системы

В сформированной структуре можно выделить технологии, используемые для выработки электрической энергии: ветроэнергетические установки (ВЭУ), фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), дизель-генераторные установки (ДГУ). Для моделирования ДГУ используется блок Electricity grid, так как такой элемент в nPro отсутствует, но возможность замены предусмотрена и описана в документации. Для выработки тепловой энергии используется электрический котел (КЭ), котел на биомассе (КБ), солнечный коллектор (СК). Гибридный солнечный коллектор (ГСК) позволяет вырабатывать и тепловую, и электрическую энергию. Воздушный тепловой насос (ВТН) вырабатывает тепловую энергию, используя электрическую энергию и низкопотенциальное тепло воздуха. В структурную схему также включены накопитель тепловой энергии (ТН) и аккумуляторные батареи (АКБ).

Элементы Heat-demand и Electricity demand содержат данные о часовой потребности в тепловой и электрической энергии.

Стоимостные показатели установок были приняты равными значениям по умолчанию, за исключением удельной стоимости ВЭУ, установленной 1500 евро/кВт. Также были приняты ограничения на объем сжигаемой биомассы – максимальная годовая выработка тепловой энергии котла 100 МВт·ч. Угол наклона солнечных панелей и коллекторов принят 42°. Коэффициент преобразования теплового насоса был рассчитан в зависимости от температуры наружного воздуха и требуемой температуры в подающем трубопроводе. Стоимость дизельного топлива принята 1 евро/кг. Удельные выбросы диоксида углерода при сжигании дизельного топлива приняты 454 г/кВт·ч.

Результаты исследования. В результате оптимизации в программе nPro было получено 10 конфигураций гибридных энергетических систем (таблица 1).

Таблица 1. Результаты оптимизации конфигураций энергетических систем в nPro, кВт

Конфигурация	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ДГУ	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-
ВТН	512	204	220	200	176	84	-	196	348	252
КЭ	-	136	129	137	147	187	463	-	-	-
ТН*	-	-	161	945	699	1417	1999	525	968	1728
ФЭП	-	-	-	214	183	-	584	131	362	
ВЭУ	-	-	-	-	133	135	129	87	288	242
ГСК	-	-	-	-	-	201	-	-	-	340
СК	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
КБ	-	-	-	-	-	-	-	139	107	114
АКБ*	-	-	-	-	-	-	-	-	645	654

* единицы измерения кВт·ч

В качестве критериев для сравнения были выбраны капитальные затраты, нормированная стоимость производства электрической (LCOE) и тепловой энергии (LCON), выбросы CO₂. Хотя капитальные затраты являются частью LCOE и LCON, их выделение в качестве отдельного критерия позволяет минимизировать этот важный показатель при оптимизации. Практика использования нескольких экономических показателей в многокритериальном анализе уже применялась в ряде исследований. Так, в исследовании [31] в дополнение к LCOE был выделен критерий капитальных затрат при оптимизации гибридной энергетической системы в удаленном районе. При таком подходе, изменяя веса критериев, можно получить решения с низкими LCOE и капитальными затратами одновременно. Если, например, используется только один критерий LCOE, то оптимизация может привести к решениям с высокими капитальными затратами, но низкими эксплуатационными и топливными расходами. В исследовании [32] капитальные затраты также выделены, как отдельный экономический критерий для оптимизации гибридных энергетических систем в удаленных и малоразвитых районах Ирана. Следует отметить, что важность показателя капитальных затрат особенно значима при принятии инвестиционных решений в удаленных районах с высокими рисками возврата инвестиций [33].

В таблице 2 представлены результаты оценки альтернатив по критериям.

Таблица 2. Оценки альтернатив по критериям

Конфигурация	Капитальные затраты, тыс. евро	LCOE, евро/кВт·ч	LCON, евро/кВт·ч	Выбросы CO ₂ , тонн/год
1	563,20	0,192	0,316	251
2	235,28	0,161	0,265	271
3	255,79	0,161	0,265	265
4	486,71	0,14	0,23	171
5	624,27	0,133	0,219	127
6	604,78	0,134	0,221	137
7	918,95	0,159	0,262	121
8	520,19	0,118	0,195	121
9	1769,31	0,226	0,372	3,8
10	1661,85	0,213	0,351	4

Многокритериальная оценка альтернатив проводилась методом TOPSIS с оценкой весов критериев объективным методом энтропии по формулам (1)-(8) и субъективным методом. Следует отметить, что несколько конфигураций могут быть исключены из рассмотрения до многокритериальной оценки, так как они доминируемы другими альтернативами. Например, конфигурация 8 лучше конфигурации 6 по всем критериям.

В таблице 3 представлены результаты оценки весов критериев объективным и субъективным методами.

Таблица 3. Весовые коэффициенты критериев

Способ оценивания весов критериев	Критерии			
	Капитальные затраты, тыс. евро	LCOE, евро/кВт·ч	LCOH, евро/кВт·ч	Выбросы CO ₂ , тонн/год
	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄
Объективный	0,402	0,042	0,042	0,513
Субъективный	0,3	0,3	0,3	0,1

При оценке объективным методом энтропии веса критериев LCOE и LCOH имеют крайне низкие значения, так как диапазон изменения этих показателей среди десяти конфигураций не такой большой. Так, LCOE меняется в пределах 0,118-0,226 евро/кВт·ч. В то же время капитальные затраты меняются в диапазоне 255,8-1769 тыс евро, а выбросы CO₂ 3,8-271 тонн/год. Однако метод энтропии не позволяет учесть ценность для ЛПП этих изменений. Так, для гибридных систем малой мощности выбросы диоксида углерода не имеют большого значения, даже с учетом, что этот показатель характеризует и другие выбросы загрязняющих веществ. В то же время LCOE и LCOH представляют собой стоимость производства электрической и тепловой энергии, при которой окупятся все затраты на проект с учетом дисконтирования. Фактически LCOE и LCOH характеризуют себестоимость производства энергии и экономическую эффективность конфигурации в перспективе рассматриваемого периода эксплуатации. В этой связи при оценке субъективным методом экономическим критериям был установлен вес 0,3. В таблице 4 показаны многокритериальные оценки конфигураций.

Таблица 4. Многокритериальные оценки конфигураций гибридных энергетических систем

Конфигурация	Объективный метод оценивания весов	Субъективный метод оценивания весов
1	0,42	0,61
2	0,46	0,74
3	0,46	0,74
4	0,56	0,78
5	0,62	0,75
6	0,60	0,75
7	0,56	0,57
8	0,66	0,81
9	0,54	0,21
10	0,56	0,24

В результате многокритериальной оценки наиболее предпочтительной является конфигурация 8. Эта конфигурация использует ДГУ, ВЭУ, ФЭП, тепловые насосы, котел на биомассе и накопители тепловой энергии.

Конфигурация 8 имеет лучшие оценки LCOE, LCOH, сравнительно низкие капитальные затраты и выбросы CO₂. Следует отметить, что конфигурация имеет наибольшую многокритериальную оценку при двух способах оценивания весов, при этом остальные альтернативы имеют различное ранжирование. Использование двух подходов к оцениванию весов критериев позволяет учесть как объективные факторы, так и субъективные предпочтения ЛПП при многокритериальном анализе.

Заключение. Предложен двухэтапный подход к многокритериальному выбору автономной гибридной энергетической системы. В его основе лежит использование программы nPro

для оптимизации конфигураций и метод TOPSIS для многокритериального сравнения сформированных альтернатив. При многокритериальном анализе большую роль играют веса критериев. В предлагаемом подходе используется объективный метод энтропии и субъективный метод прямого назначения весов. Использование двух методов оценивания весов позволяет выделить наиболее перспективные альтернативы для более детального рассмотрения. Предложенный подход был применен для многокритериального выбора системы электро- и теплоснабжения удаленного населенного пункта. Оценки LCOE для сформированной автономной энергетической системы составили 0,118 евро/кВт·ч, LCON – 0,195 евро/кВт·ч. Выбранная конфигурация характеризуется высокой экономической и экологической эффективностью, отвечает предпочтениям ЛПП.

Список источников

1. Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России. Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2020. – 77 с.
2. Холкин Д. Новые бизнес-модели развития локальной энергетики / Д. Холкин, И. Чаусов, М. Губанов и др. // Энергетическая политика, 2024. – № 9 (200). – С. 32-43.
3. Шакиров В.А. Проблемы электроснабжения в коммунально-бытовом секторе арктической зоны Республики Саха (Якутия) / В.А. Шакиров, Т.Ф. Тугузова, Р.И. Музычук // Арктика: экология и экономика, 2020. – № 4 (40). – С. 106-116. – DOI:10.25283/2223-4594-2020-4-106-116.
4. Silinto B.F., C. van der Laag Yamu, Zuidema C., Faaij A. P. C. Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: A review on energy system models and spatial explicit modelling tools. *renewable and sustainable energy reviews*, 2025, vol. 207, pp. 114916, DOI:10.1016/j.rser.2024.114916.
5. Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. *Journal of cleaner production*, 2022, vol. 349, pp. 131347, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131347.
6. Shamachurn H. Optimization of an off-grid domestic Hybrid energy system in suburban Paris using iHOGA software. *Renewable energy focus*, 2021, vol. 37, 36–49, DOI:10.1016/j.ref.2021.02.004.
7. Altun A.F., Kilic M. Design and performance evaluation based on economics and environmental impact of a PV-wind-diesel and battery standalone power system for various climates in Turkey. *Renewable energy*, 2020, vol. 157, pp. 424–443, DOI:10.1016/j.renene.2020.05.042.
8. Bansal A.K. Sizing and forecasting techniques in photovoltaic-wind based hybrid renewable energy system: A review. *Journal of cleaner production*, 2022, vol. 369, pp. 133376, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.133376.
9. Kushwaha P.K., Bhattacharjee C. Integrated techno-economic-enviro-socio design of the hybrid renewable energy system with suitable dispatch strategy for domestic and telecommunication load across India. *Journal of energy storage*, 2022, vol. 55, pp. 105340, DOI:10.1016/j.est.2022.105340.
10. Лукутин Б.В. Фотоэлектростанции с электрохимическим и тепловым накоплением энергии в Ираке / Б.В. Лукутин, К. Хамид // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 174-183.
11. Mazzeo D., Matera N., Oliveti G., Interaction between a Wind-PV-Battery-Heat pump trigeneration system and office building electric energy demand including vehicle charging, in: 2018 IEEE International conference on environment and electrical engineering and 2018. IEEE Industrial and commercial power systems europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2018, pp. 1–5, DOI:10.1109/EEEIC.2018.8493710.
12. Isa N.M., Das H.S., Tan C.W., Yatim A.H.M., Lau K.Y. A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital. *Energy*, 2016, vol. 112, pp. 75-90. DOI:10.1016/j.energy.2016.06.056.
13. Kotowicz J., Uchman W. Analysis of the integrated energy system in residential scale: Photovoltaics, microgeneration and electrical energy storage. *Energy*, 2021, vol. 227, pp. 120469, DOI:10.1016/j.energy.2021.120469.
14. Ihlemann M. et al. SpineOpt: A flexible open-source energy system modelling framework, *Energy strategy reviews*, 2022, vol. 43, pp. 100902, DOI:10.1016/j.esr.2022.100902.
15. Wirtz M. nPro: A web-based planning tool for designing district energy systems and thermal networks. *Energy*, 2023, vol. 268, pp. 126575, DOI:10.1016/j.energy.2022.126575
16. Tatar S.M., Akulker H., Sildir H., Aydin E. Optimal design and operation of integrated microgrids under intermittent renewable energy sources coupled with green hydrogen and demand scenarios. *International journal of hydrogen energy*, 2022, vol. 47, pp. 27848-27865, DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.06.130

17. Wu X., Liao B., Su Y., Li S. Multi-objective and multi-algorithm operation optimization of integrated energy system considering ground source energy and solar energy. *International journal of electrical power & energy systems*, 2023, vol. 144, pp. 108529, DOI:10.1016/j.ijepes.2022.108529
18. Fioriti D., Lutzemberger G., Poli D. et al. Coupling economic multi-objective optimization and multiple design options: A business-oriented approach to size an off-grid hybrid microgrid. *International journal of electrical power & energy systems*, 2021, vol. 127, pp. 106686, DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106686
19. Baghaee H.R., Mirsalim M., Gharehpetian G.B., Talebi H.A. Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation microgrid system. *Energy*, 2016, vol. 115, pp. 1022-1041, DOI:10.1016/j.energy.2016.09.007
20. Gönül Ö., Duman A.C., Güler Ö. Multi-objective optimal sizing and techno-economic analysis of on- and off-grid hybrid renewable energy systems for EV charging stations. *Sustainable Cities and Society*, 2024, vol. 115, pp. 105846, DOI:10.1016/j.scs.2024.105846.
21. Ukoba M.O., Diemuodeke O.E., Alghassab M., Njoku H.I., Imran M., Khan Z.A. Composite multi-criteria decision analysis for optimization of hybrid renewable energy systems for geopolitical zones in Nigeria. *Sustainability*, 2020, vol. 12. DOI:10.3390/su12145732
22. Usman M., Jonas D., Frey G. A methodology for multi-criteria assessment of renewable integrated energy supply options and alternative HVAC systems in a household. *Energy and buildings*, 2022, vol. 273, pp. 112397. DOI:10.1016/j.enbuild.2022.112397
23. РД 34.20.185-94. Инструкция по проектированию городских электрических сетей.
24. РД 34.20.178. Методические указания по расчету электрических на грузок в сетях 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. Дата актуализации 12.02.2016. М.: Сельэнергопроект, 2016.
25. Masoud A. A. Hybrid wind-solar energy potential modeling using ERA5 and solar irradiation data in google Earth Engine. *Renewable energy*, 2024, vol. 232, pp. 121042, DOI: 10.1016/j.renene.2024.121042.
26. Chakraborty S., TOPSIS and modified TOPSIS: A comparative analysis. *Decision analytics journal*, 2022, vol. 2, pp. 100021, DOI: 10.1016/j.dajour.2021.100021.
27. Aydoğdu E., Güner E., Aldemir B., Aygün H. Complex spherical fuzzy TOPSIS based on entropy. *Expert systems with applications*, 2023, vol. 215, pp. 119331, DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119331.
28. Ponhan K., Sureeyatanapas P. A comparison between subjective and objective weighting approaches for multi-criteria decision making: A case of industrial location selection. *Engineering and applied science research*, 2022, vol. 49(6), pp. 763-771, DOI:10.14456/easr.2022.74
29. Zou Z., Yun Y., Sun J. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *Journal of environmental sciences*, 2006, vol. 18, no. 5, pp. 1020–1023, DOI:10.1016/S1001-0742(06)60032-6
30. Схема и программа развития электроэнергетики Приморского края на 2020 - 2024 годы, утверждена распоряжением губернатора Приморского края от 31.01.2020 № 31-пр.
31. Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. *Journal of cleaner production*, 2022, vol. 349, pp. 131347, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131347
32. Maleki Tehrani M., Akhtari M., Kasaeian A., Vaziri Rad M.A., Toopshekan A., Sadeghi Motlagh M. Techno-economic investigation of a hybrid biomass renewable energy system to achieve the goals of SDG-17 in deprived areas of Iran. *Energy conversion and management*, 2023, vol. 291, pp. 117319, DOI:10.1016/j.enconman.2023.117319
33. Bonamini G., Colombo E., Llorca N., Sanchez-Soriano J., Cost allocation for rural electrification using game theory: A case of distributed generation in rural India. *Energy for sustainable development*, 2019, vol. 50, pp. 139–152, DOI:10.1016/j.esd.2019.01.007

Шакиров Владислав Альбертович. Доцент, кандидат технических наук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, AuthorID: 534444, ORCID: 0000-0001-8629-9549, shakirovva@ex.istu.edu, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова 83.

Пионкевич Владимир Андреевич. Доцент, кандидат технических наук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, AuthorID: 810357, ORCID: 0000-0003-2002-415X, pionkevichva@ex.istu.edu, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова 83.

UDC 620.98:519.8

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.010

Optimization and multi-criteria selection of the configuration of a hybrid autonomous energy system based on the nPro program and TOPSIS

Vladislav A. Shakirov, Vladimir A. Pionkevich

National research Irkutsk state technical university,
Russia, Irkutsk, *shakirovva@ex.istu.edu*

Abstract. In many cases, it is advisable to supply electricity and heat to consumers in remote and hard-to-reach areas using renewable energy sources. Designing an optimal autonomous energy system is associated with a number of difficulties: the stochastic nature of the potential of renewable energy sources, a variety of technical and economic parameters and technological limitations of the equipment. The long life cycle of an energy system and the multiplicity of goals pursued during its creation or development lead to the need for a multi-criteria consideration of the problem. The article provides an overview of methods and software for selecting configurations of energy systems, and shows the relevance of developing multi-criteria approaches. A two-stage approach to the multi-criteria selection of the configuration of an autonomous energy system is proposed. At the first stage, the nPro software tool is used, providing optimization of configurations of various energy systems, including wind turbines, photovoltaic converters, heat pumps, solar collectors, electric and thermal energy storage devices. At the second stage, a multi-criteria assessment of the formed energy systems is carried out using the TOPSIS method. To improve the validity of the solutions obtained, the weights of the criteria are determined based on an objective assessment using the entropy method, as well as a subjective method. An example of the approach application is considered for the remote settlement of Ust-Sobolevka, located in Primorsky Krai. As a result, ten configurations for autonomous electricity and heat supply were optimized and their multi-criteria assessment was carried out taking into account four criteria: capital costs, the levelized cost of electricity and heat, and carbon dioxide emissions. The most preferable configuration has relatively low capital costs and carbon dioxide emissions, as well as the best estimates of the levelized cost of electricity and heat among the options considered.

Keywords: energy system, renewable energy, optimization, modeling

References

1. Ob"ekty generatsii v izolirovannykh i trudnodostupnykh territoriyakh v Rossii [Generation facilities in isolated and hard-to-reach areas in Russia]. Analiticheskiy tsentr pri Pravitel'stve Rossiyskoy Federatsii [Analytical Center under the Government of the Russian Federation], 2020, 77 p.
2. Kholkin D., Chausov I., Gubanov M., Mel'nikov P., Kolomyts L. Novye biznes-modeli razvitiya lokal'noy energetiki [New business models for local energy development]. Energeticheskaya politika [Energy policy], 2024, no. 9 (200), pp. 32-43.
3. Shakirov V.A., Tuguzova T.F., Muzychuk R.I. Problems of power supply in the public utility sector of the arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). Arktika: Ekologiya i Ekonomika, 2020, no. 4(40). pp. 106-116, DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-106-116
4. Silinto B.F., C. van der Laag Yamu, Zuidema C., Faaij A. P. C. Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: A review on energy system models and spatial explicit modelling tools. renewable and sustainable energy reviews, 2025, vol. 207, pp. 114916, DOI:10.1016/j.rser.2024.114916.
5. Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. Journal of cleaner production, 2022, vol. 349, pp. 131347, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131347.
6. Shamachurn H. Optimization of an off-grid domestic Hybrid energy system in suburban Paris using iHOGA software. Renewable energy focus, 2021, vol. 37, 36–49, DOI:10.1016/j.ref.2021.02.004.
7. Altun A.F., Kilic M. Design and performance evaluation based on economics and environmental impact of a PV-wind-diesel and battery standalone power system for various climates in Turkey. Renewable energy, 2020, vol. 157, pp. 424–443, DOI:10.1016/j.renene.2020.05.042.
8. Bansal A.K. Sizing and forecasting techniques in photovoltaic-wind based hybrid renewable energy system: A review. Journal of cleaner production, 2022, vol. 369, pp. 133376, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.133376.
9. Kushwaha P.K., Bhattacharjee C. Integrated techno-economic-enviro-socio design of the hybrid renewable energy system with suitable dispatch strategy for domestic and telecommunication load across India. Journal of energy storage, 2022, vol. 55, pp. 105340, DOI:10.1016/j.est.2022.105340.

10. Lukutin B.V., Khamid K. Fotoelektrostantsii s elektrokhimicheskim i teplovym nakopleniyem energii v Irake [Photovoltaic power plants with electrochemical and thermal energy storage in Iraq]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering], 2021, vol. 332. no. 1. pp. 174-183.
11. Mazzeo D., Matera N., Oliveti G., Interaction between a Wind-PV-Battery-Heat pump trigeneration system and office building electric energy demand including vehicle charging, in: 2018 IEEE International conference on environment and electrical engineering and 2018. IEEE Industrial and commercial power systems europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2018, pp. 1–5, DOI:10.1109/EEEIC.2018.8493710.
12. Isa N.M., Das H.S., Tan C.W., Yatim A.H.M., Lau K.Y. A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital. *Energy*, 2016, vol. 112, pp. 75-90. DOI:10.1016/j.energy.2016.06.056.
13. Kotowicz J., Uchman W. Analysis of the integrated energy system in residential scale: Photovoltaics, microgeneration and electrical energy storage. *Energy*, 2021, vol. 227, pp. 120469, DOI:10.1016/j.energy.2021.120469.
14. Ihlemann M. et al. SpineOpt: A flexible open-source energy system modelling framework, *Energy strategy reviews*, 2022, vol. 43, pp. 100902, DOI:10.1016/j.esr.2022.100902.
15. Wirtz M. nPro: A web-based planning tool for designing district energy systems and thermal networks. *Energy*, 2023, vol. 268, pp. 126575, DOI:10.1016/j.energy.2022.126575
16. Tatar S.M., Akulker H., Sildir H., Aydin E. Optimal design and operation of integrated microgrids under intermittent renewable energy sources coupled with green hydrogen and demand scenarios. *International journal of hydrogen energy*, 2022, vol. 47, pp. 27848-27865, DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.06.130
17. Wu X., Liao B., Su Y., Li S. Multi-objective and multi-algorithm operation optimization of integrated energy system considering ground source energy and solar energy. *International journal of electrical power & energy systems*, 2023, vol. 144, pp. 108529, DOI:10.1016/j.ijepes.2022.108529
18. Fioriti D., Lutzemberger G., Poli D. et al. Coupling economic multi-objective optimization and multiple design options: A business-oriented approach to size an off-grid hybrid microgrid. *International journal of electrical power & energy systems*, 2021, vol. 127, pp. 106686, DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106686
19. Baghaee H.R., Mirsalim M., Gharehpetian G.B., Talebi H.A. Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation microgrid system. *Energy*, 2016, vol. 115, pp. 1022-1041, DOI:10.1016/j.energy.2016.09.007
20. Gönül Ö., Duman A.C., Güler Ö. Multi-objective optimal sizing and techno-economic analysis of on- and off-grid hybrid renewable energy systems for EV charging stations. *Sustainable Cities and Society*, 2024, vol. 115, pp. 105846, DOI:10.1016/j.scs.2024.105846.
21. Ukoba M.O., Diemuodeke O.E., Alghassab M., Njoku H.I., Imran M., Khan Z.A. Composite multi-criteria decision analysis for optimization of hybrid renewable energy systems for geopolitical zones in Nigeria. *Sustainability*, 2020, vol. 12. DOI:10.3390/su12145732
22. Usman M., Jonas D., Frey G. A methodology for multi-criteria assessment of renewable integrated energy supply options and alternative HVAC systems in a household. *Energy and buildings*, 2022, vol. 273, pp. 112397. DOI:10.1016/j.enbuild.2022.112397
23. RD 34.20.185-94. *Instruktsiya po proektirovaniyu gorodskikh elektricheskikh setey* [Instructions for designing urban electrical networks].
24. RD 34.20.178. *Metodicheskie ukazaniya po raschetu elektricheskikh na gruzok v setyakh 0,38–110 kV sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Guidelines for calculating electrical loads in 0.38–110 kV networks for agricultural purposes]. *Rukovodyashchie materialy po proektirovaniyu elektrosnabzheniya sel'skogo khozyaystva* [Guidelines for designing power supply for agriculture]. Date of update 12.02.2016. M., Sel'energoproekt [Selenergoproekt], 2016.
25. Masoud A. A. Hybrid wind-solar energy potential modeling using ERA5 and solar irradiation data in google Earth Engine. *Renewable energy*, 2024, vol. 232, pp. 121042, DOI: 10.1016/j.renene.2024.121042.
26. Chakraborty S., TOPSIS and modified TOPSIS: A comparative analysis. *Decision analytics journal*, 2022, vol. 2, pp. 100021, DOI: 10.1016/j.dajour.2021.100021.
27. Aydoğdu E., Güner E., Aldemir B., Aygün H. Complex spherical fuzzy TOPSIS based on entropy. *Expert systems with applications*, 2023, vol. 215, pp. 119331, DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119331.
28. Ponhan K., Sureeyatanapas P. A comparison between subjective and objective weighting approaches for multi-criteria decision making: A case of industrial location selection. *Engineering and applied science research*, 2022, vol. 49(6), pp. 763-771, DOI:10.14456/easr.2022.74
29. Zou Z., Yun Y., Sun J. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *Journal of environmental sciences*, 2006, vol. 18, no. 5, pp. 1020–1023, DOI:10.1016/S1001-0742(06)60032-6

30. Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Primorskogo kraya na 2020 - 2024 gody, utverzhdena rasporyazheniyem gubernatora Primorskogo kraya ot 31.01.2020 № 31-rg. [The scheme and program for the development of the electric power industry of the Primorsky Territory for 2020 - 2024, approved by order of the governor of the Primorsky Territory dated January 31, 2020 no. 31-rg.]
31. Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. Journal of cleaner production, 2022, vol. 349, pp. 131347, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131347
32. Maleki Tehrani M., Akhtari M., Kasaeian A., Vaziri Rad M.A., Toopshekan A., Sadeghi Motlagh M. Techno-economic investigation of a hybrid biomass renewable energy system to achieve the goals of SDG-17 in deprived areas of Iran. Energy conversion and management, 2023, vol. 291, pp. 117319, DOI:10.1016/j.enconman.2023.117319
33. Bonamini G., Colombo E., Llorca N., Sanchez-Soriano J., Cost allocation for rural electrification using game theory: A case of distributed generation in rural India. Energy for sustainable development, 2019, vol. 50, pp. 139–152, DOI:10.1016/j.esd.2019.01.007

Shakirov Vladislav Albertovich. Associate professor, PhD, Irkutsk national research technical university, head of the department of power supply and electrical engineering, AuthorID: 534444, ORCID: 0000-0001-8629-9549, shakirovva@ex.istu.edu, 664074, Irkutsk, Lermontov st., 83.

Pionkevich Vladimir Andreevich. Associate professor, PhD, Irkutsk national research technical university, associate professor of the department of power supply and electrical engineering, AuthorID:810357, ORCID:0000-0003-2002-415X, pionkevichva@ex.istu.edu, 664074, Irkutsk, Lermontov st., 83.

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 13.12.2024; принята к публикации 28.11.2024.

The article was submitted 11/18/2024; approved after reviewing 12/13/2024; accepted for publication 11/28/2024.

УДК 519.654

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.011

Формирование цифровой модели ветроэнергетической установки в составе цифрового двойника и её апробация на примере оценки эффективности применения ветроустановки в селе Онгурены

Щукина Виктория Михайловна¹, Щукин Никита Игоревич²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, vitalpiskunova98@gmail.com

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск

Аннотация. Актуальность построения цифровых двойников возобновляемых источников энергии (ВИЭ), к которым относятся ветровые электростанции, обусловлена стремительным развитием технологий и необходимостью повышения эффективности эксплуатации энергетических систем. Цифровые двойники позволяют создавать виртуальные модели реальных объектов, что открывает новые горизонты для оптимизации процессов, мониторинга состояния и предсказания функционирования установок. В условиях глобального перехода к устойчивой энергетике важность цифрового моделирования возрастает, так как оно способствует более эффективному использованию ресурсов, снижению затрат и увеличению надежности энергетических систем.

В статье рассматривается процесс формирования цифровой модели ветроэнергетической установки (ВЭУ), который является ключевым элементом в разработке цифрового двойника. В работе описываются основные подходы и методы, применяемые для создания точной виртуальной копии реальной ветроустановки, включая выбор параметров моделирования, таких, как геометрические размеры, материалы и механические свойства, а также определение граничных условий, позволяющих максимально точно воспроизводить особенности эксплуатации.

Особое внимание уделяется характеристикам погодных условий, включая временные ряды скорости ветра, что является критически важным для оценки коэффициента использования установленной мощности ветроустановки. Указанные погодные данные позволяют точно смоделировать реальные условия работы установки и корректировать параметры модели в соответствии с изменяющимися климатическими условиями.

В статье также обсуждаются современные технологии и инструменты, используемые для обеспечения высокой степени соответствия между цифровой моделью и физическим объектом, такие, как системы сбора данных и программное обеспечение для анализа данных. Перспективы применения цифровых двойников в ветроэнергетике подчеркиваются в контексте оптимизации работы установок, прогноза выработки электроэнергии и повышения общей эффективности эксплуатации, что является важным шагом к устойчивому развитию возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровая модель, ветровые электростанции, математическое моделирование

Цитирование: Щукина В.М. Формирование цифровой модели ветроэнергетической установки в составе цифрового двойника и её апробация на примере оценки эффективности применения ветроустановки в селе Онгурены / В.М. Щукина, Н.И. Щукин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 112-122. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.011.

Введение. Энергетическая отрасль играет ключевую роль в обеспечении жизнедеятельности общества, предоставляя электроэнергию для питания домов, предприятий и других объектов. Её структура включает в себя генерацию, передачу, распределение и потребление электроэнергии. С развитием цифровых технологий и переходом к цифровизации, энергетическая отрасль сталкивается с новыми вызовами и возможностями, такими, как: необходимость адаптации к изменяющимся условиям рынка; потребность в повышении эффективности и надёжности работы энергетических систем; возможность использования новых источников энергии и технологий; необходимость обеспечения безопасности и защиты данных; потребность в подготовке квалифицированных кадров, способных работать в условиях цифровизации.

Одним из перспективных направлений для упрощения адаптации к вышеуказанным трендам является внедрение цифровых двойников. *Цифровой двойник (Digital Twin)* – это виртуальный прототип реального объекта, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом. Виртуальный прототип реального объекта, создается на основе совокупности данных об объекте. Эти данные включают рабочие показатели, состояние в текущий момент, историю совершенных действий, режим работы оборудования, программное обеспечение, эксплуатационные условия. После анализа этой информации инженеры могут дать рекомендации по техническому обслуживанию объекта, выявить слабые места и риски, что приводит к снижению аварийности и сбоев [1-3].

Цифровой двойник применяется для решения множества задач, включая моделирование событий, происходящих с оригиналом при определенных обстоятельствах, снижение затрат на внедрение инноваций, уменьшение негативного влияния на окружающую среду, своевременное выявление технических проблем, оценку производительности технологий и оборудования, оптимизацию производственных процессов [4-6]. Цифровые двойники могут применяться на различных объектах энергетики, включая электростанции, сети передачи и распределения электроэнергии, а также системы управления активами. Применение технологии цифровых двойников в возобновляемой энергетике открывает новые горизонты для оптимизации и повышения эффективности работы электростанций и сетевых объектов. Это особенно актуально для ветровой и солнечной энергетики, где погодные условия и время суток оказывают значительное влияние на выработку энергии. Цифровые двойники позволяют моделировать работу станций в различных условиях, предсказывать выработку энергии и оптимизировать режимы работы оборудования. Это способствует снижению затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также повышению надежности и безопасности работы энергетических систем.

В основе цифрового двойника лежат два ключевых понятия: цифровая модель и цифровая тень. *Цифровая модель* представляет собой систему математических и компьютерных моделей, а также электронных документов объекта, описывающую структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого объекта на различных стадиях его жизненного цикла. Она характеризуется отсутствием автоматического обмена данными между физическим и цифровым объектом. Это означает, что передача данных от физического объекта к цифровому и наоборот осуществляется вручную [7]. *Цифровая тень*, в свою очередь, возникает, когда между физическим объектом и его цифровым представлением устанавливается однонаправленный автоматизированный поток данных. Изменение физического объекта приводит к изменению его цифрового двойника, но не наоборот [8]. Цифровой двойник объединяет эти два понятия, обеспечивая двусторонний поток данных между физическим и цифровым объектами. Это позволяет проводить анализ и оптимизацию работы физических объектов, используя данные, полученные из их цифровых копий.

В данное время технология цифровых двойников считается одной из самых перспективных, и её активно исследуют и пробуют внедрять, в том числе в области возобновляемой энергетики и ветроэнергетики, в частности, [9-13]. Применение цифровых двойников в ветровой энергетике становится всё более актуальным благодаря их возможностям повышать эффективность и надёжность работы ветровых установок. Они позволяют в реальном времени отслеживать состояние оборудования, прогнозировать его поведение и проводить анализ данных для оптимизации процессов. Цифровые двойники способствуют снижению затрат на обслуживание, так как позволяют заранее выявлять потенциальные неисправности и выполнять про-

гнозируемое техобслуживание. Кроме того, они играют важную роль в моделировании производительности ветряных парков, что помогает в принятии информированных решений о планировании и развитии новых проектов. Таким образом, внедрение цифровых двойников в ветровую энергетику способствует не только улучшению эксплуатации объектов, но и увеличению доли возобновляемых источников энергии в общем энергетическом балансе [14].

Эта статья направлена на формирование подхода к разработке цифровой модели ветроэнергетической установки для дальнейшего ее использования, как компонента цифрового двойника.

1. Подход к формированию цифровой модели ВЭУ для цифрового двойника. Математические модели позволяют описывать и изучать различные явления и процессы, за счет упрощения сложных систем и представления их в виде математических уравнений. Они используются в науке, технике, экономике и других областях, для формализации технологических процессов различных систем и прогнозирования их поведения, а также для разработки новых технологий и решений.

В рамках данной работы будет представлена детерминистическая модель ВЭУ, основанная на ретроспективных данных о скорости ветра в рассматриваемом регионе (опираясь на конкретные координаты). Модель будет использована для анализа поведения, прогнозирования годовой выработки и определения показателей эффективности функционирования ветровой установки.

1.1. Анализ данных о скорости ветрового потока. Для построения детерминистической модели ветровой установки необходимо проанализировать и усреднить ретроспективные данные о скорости ветрового потока в рассматриваемом регионе. Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим село Онгурен, Иркутская область, Ольхонский район, имеющее координаты 53.632079, 107.592075. Ранее в этом населенном пункте имела гибридная (солнечно-ветровая) электростанция, в связи с чем в свободном доступе имеется большое количество о метеорологических условиях местности. На рисунке 1 представлены данные о скорости ветрового потока в селе Онгурен с 2015 по 2019 год.

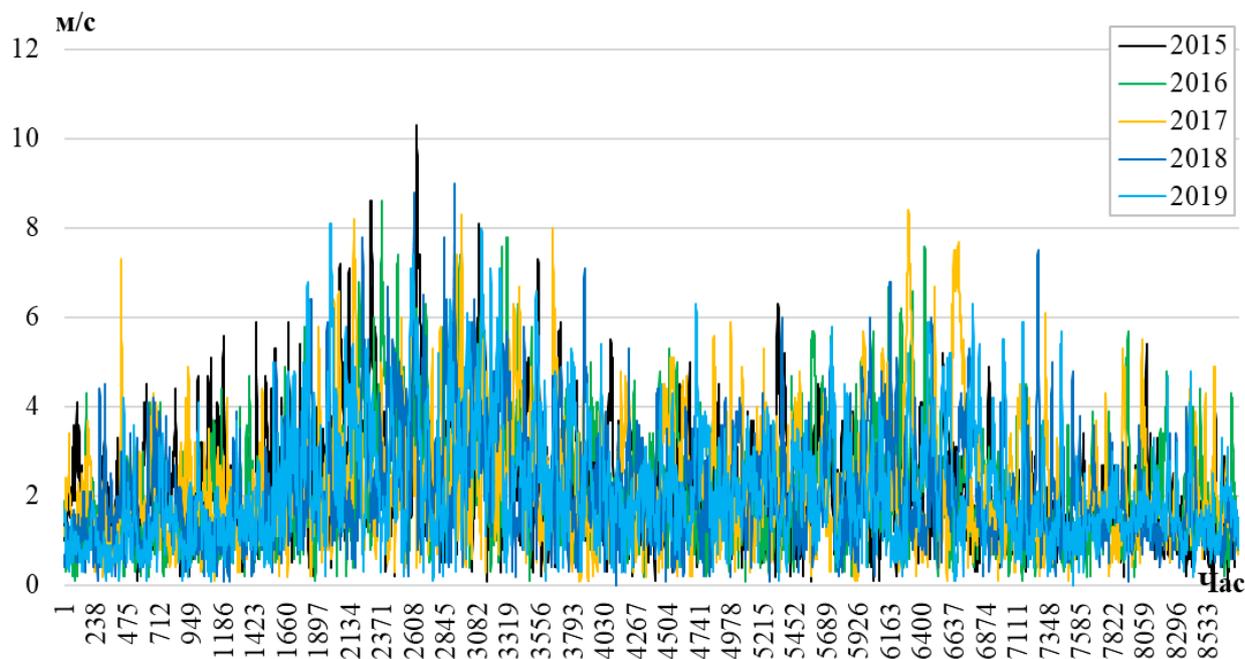


Рис. 1. Данные о скорости ветрового потока за 2015 – 2019 года

Как видно из рисунка, в течении пяти рассматриваемых лет наблюдаются значительные отклонения в скоростях ветра, однако все же прослеживается общая тенденция. В течение года

наибольшая скорость ветра наблюдается весной и в период с августа по октябрь. Для дальнейшего анализа усредним данные за 5 лет для получения расчетных значений (рис. 2).

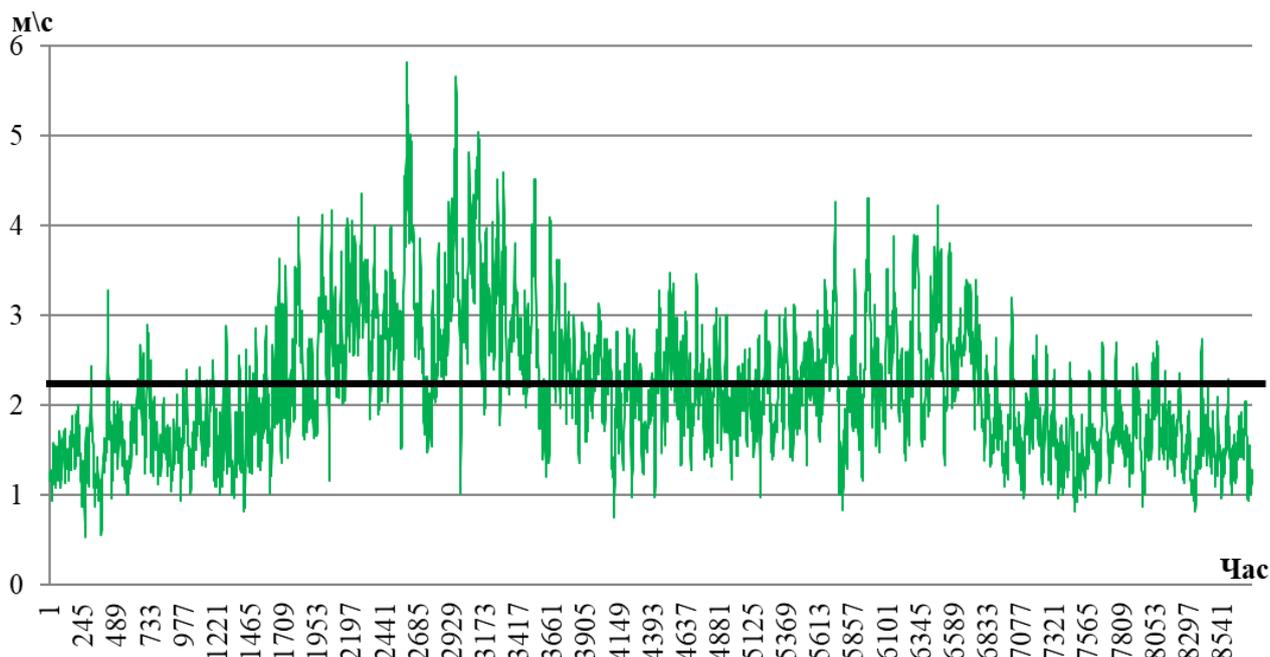


Рис. 2. Расчетные значения скорости ветрового потока в течение года на высоте 10 м (высота метеостанции)

Как видно из рисунка 2, село Онгурен является маловетренным, средняя скорость ветра в течение года варьируется от 1,5 до 3 м/с. С учетом того, что в среднем для запуска ВЭУ необходима скорость ветра 3 м/с, можно сделать вывод о низкой эффективности установки ветровой электростанции в рассматриваемом районе, однако для более корректного анализа необходимо провести пересчет скорости ветрового потока на высоте метеорологической станции на высоту ветровой установки. Для пересчета будем использовать следующую формулу [15]:

$$V(h) = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha, \quad (1)$$

где $V(h)$ (м/с) – искомая скорость ветрового потока на высоте h (м); V_0 (м/с) – средняя скорость ветрового потока на высоте метеорологической станции h_0 (м); α – коэффициент, зависящий от типа рассматриваемой местности.

Безразмерный коэффициент α может принимать значения от 0,14 до 0,4 в зависимости от анализируемой местности. Для крупных городов рекомендуется принимать значения от 0,33 до 0,4, для пригородов – от 0,22 до 0,28. Для дальнейших расчетов зададимся высотой ветровой установки в 50 м и коэффициентом $\alpha = 0,2$, соответствующим равнинной местности [15].

Полученные значения отражены на рисунке 3. Среднегодовое значение скорости ветрового потока равно 3 м/с, что все еще соответствует низкому ветровому потенциалу, однако в данном случае имеет смысл рассмотреть установку ВЭУ и оценить показатели эффективности ее функционирования.

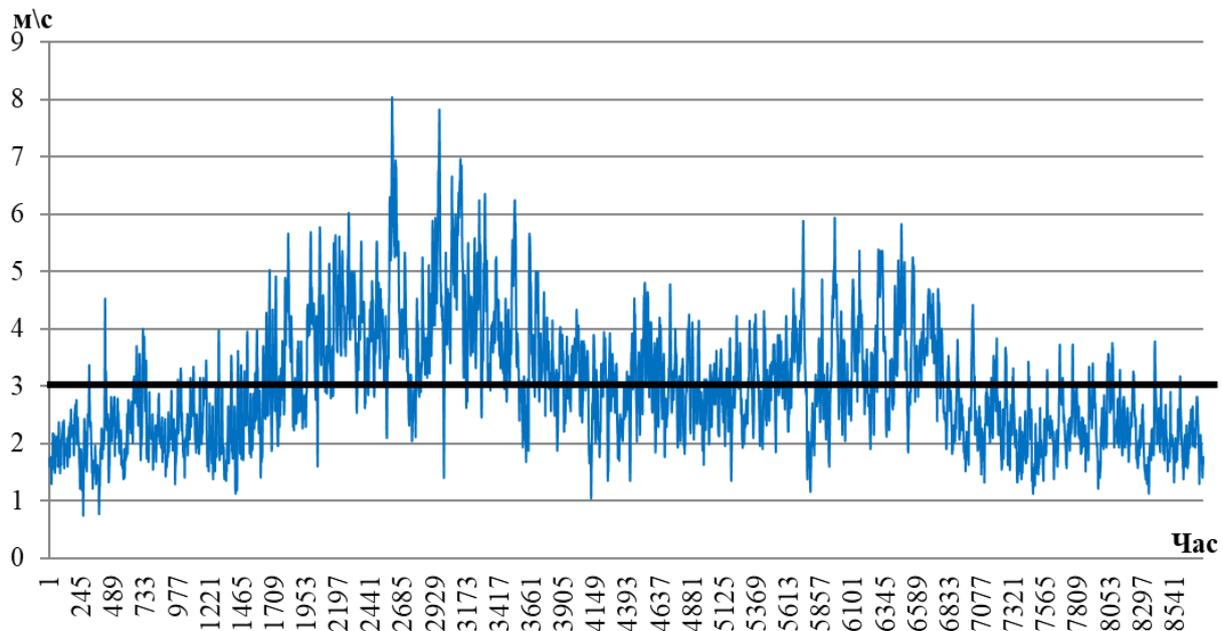


Рис. 3. Расчетные значения скорости ветрового потока в течении года на высоте 50 м (высота ветровой установки)

1.2. Математическое описание ветровой установки. Для дальнейших расчетов необходимо выбрать ветровую установку, так как в зависимости от типа лопастей, высоты и наличия поворотных механизмов у различных ВЭУ имеются различные кривые развиваемой мощности. Кривые развиваемой мощности ВЭУ представляют собой графики зависимости мощности, вырабатываемой установкой, от скорости ветра. Эти кривые позволяют определить максимальную мощность, которую может производить установка при различных скоростях ветра, а также ее общую производительность за определенный период времени. Для упрощения визуализации будем рассматривать ВЭУ номинальной мощностью 100 кВт с типовой кривой развиваемой мощности (рис. 4).

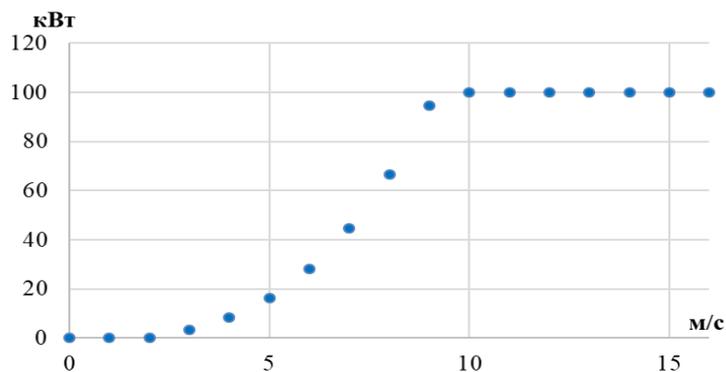


Рис. 4. Кривая развиваемой мощности ВЭУ

В зависимости от типа используемой ВЭУ форма кривой может различаться – при достижении максимально допустимой скорости ветра кривая либо резко обрывается (ВЭУ отключается), как на рисунке 4, либо мощность достаточно резко снижается до нуля (лопасти ВЭУ опускаются, и она отключается).

Как видно из рисунка, кривую можно разделить на три интервала: при скорости ветра до 2 м/с ВЭУ не функционирует, с 2 до 10 м/с ВЭУ разгоняется до максимальной скорости вращения и набирает мощность до номинальной, с 10 м/с и выше – работает равномерно с номинальной мощностью. В связи с этим для увеличения точности расчетов выполним кусочную аппроксимацию данной кривой.

При кусочной аппроксимации для каждого интервала необходимо получить уравнение, отображающее зависимость между скоростью ветрового потока и вырабатываемой мощностью. Для первого и третьего интервалов вырабатываемая мощность не зависит от скорости ветра и определяется как 0 кВт и 100 кВт соответственно. Для второго интервала необходимо выполнить аппроксимацию имеющегося массива точек. Произведем сравнение по средней ошибке различных типов аппроксимации для выбора наиболее корректного варианта: линеаризация, аппроксимация полиномами 2, 3, 4 и 5 порядка.

Среднюю ошибку аппроксимации ε (%) будем вычислять, как среднее значение всех отклонений расчетной мощности $P_{calc i}$ (кВт) от реальной $P_{real i}$ (кВт), помноженной на КПД установки в рассматриваемой точке. В данном случае КПД определяется, как отношение реальной мощности в данной точке к номинальной мощности ВЭУ P_{nom} (кВт).

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n (|P_{real i} - P_{calc i}| \cdot \frac{P_{real i}}{P_{nom}})}{n}, \quad (2)$$

Сведем в таблицу 1 сравнение всех вариантов аппроксимации.

Таблица 1. Сравнение вариантов аппроксимации кривой развиваемой мощности ВЭУ

Вариант аппроксимации	Полученная зависимость	Средняя ошибка аппроксимации ε (%)
Линейная	$P = 13,635V - 41,614$	8,90
Полином 2 порядка	$P = 1,401V^2 - 3,180V - 0,510$	3,64
Полином 3 порядка	$P = -0,210V^3 + 5,175V^2 - 23,351V + 29,935$	2,69
Полином 4 порядка	$P = -0,126V^4 + 2,814V^3 - 19,971V^2 + 60,675V - 62,732$	1,97
Полином 5 порядка	$P = -0,037V^5 + 0,982V^4 - 9,724V^3 + 46,147V^2 - 99,616V + 78,123$	2,28

Как видно из таблицы 1, наименьшую среднюю ошибку дает полином 4 порядка, а значит принимаем его для дальнейших расчетов (рис 5).

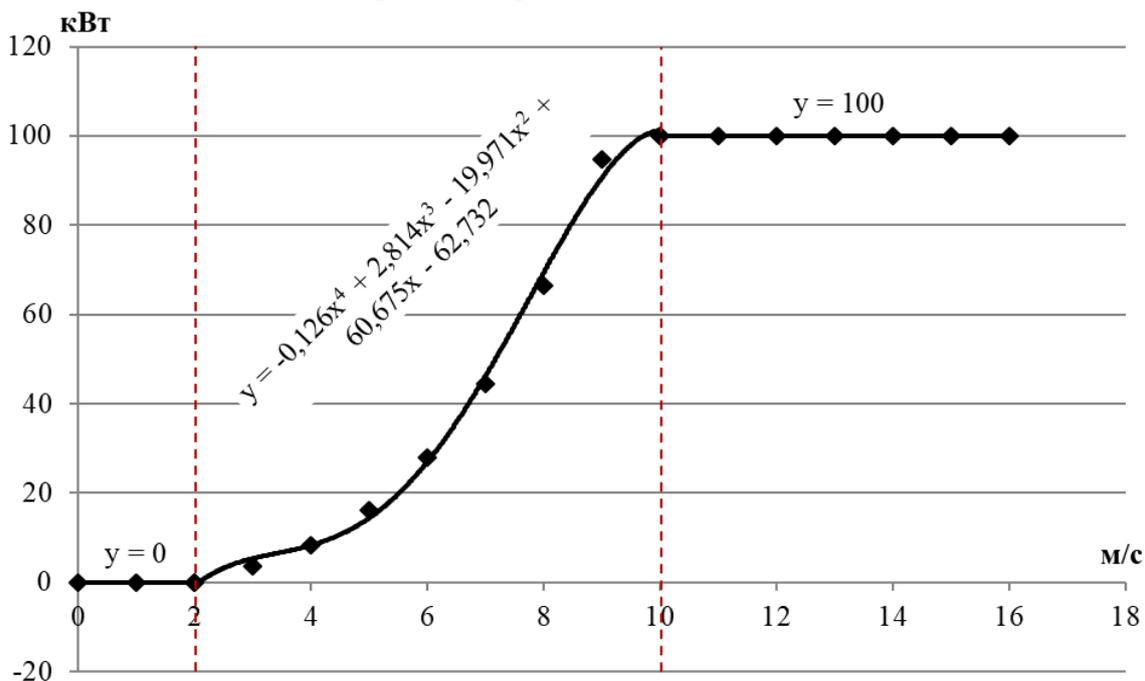


Рис. 5. Аппроксимация кривой развиваемой мощности ВЭУ методом сплайнов

Таким образом, запишем уравнение зависимости мощности ВЭУ от скорости ветрового потока в следующем виде:

$$P = \begin{cases} 0 & 0 \leq V < 2 \\ -0,126V^4 + 2,814V^3 - 19,971V^2 + 60,675V - 62,732 & 2 < V < 10 \\ 100 & V \geq 10 \end{cases} \quad (3)$$

2. Расчет годовой выработки ветроэнергетической установки и показателей эффективности ее работы. Расчет годовой выработки ВЭУ производится за счет соотнесения почасовых значений скоростей ветрового потока с аппроксимированной кривой развиваемой мощности ВЭУ. Таким образом, мы получаем следующий набор данных, отображенный на рисунке 6. Как видно из рисунка, максимальная доступная мощность для данного региона составляет порядка 70 кВт. Средняя же генерируемая мощность равна 4,36 кВт, а прогнозная генерация электроэнергии за год составляет 38 244,5 кВт*ч.

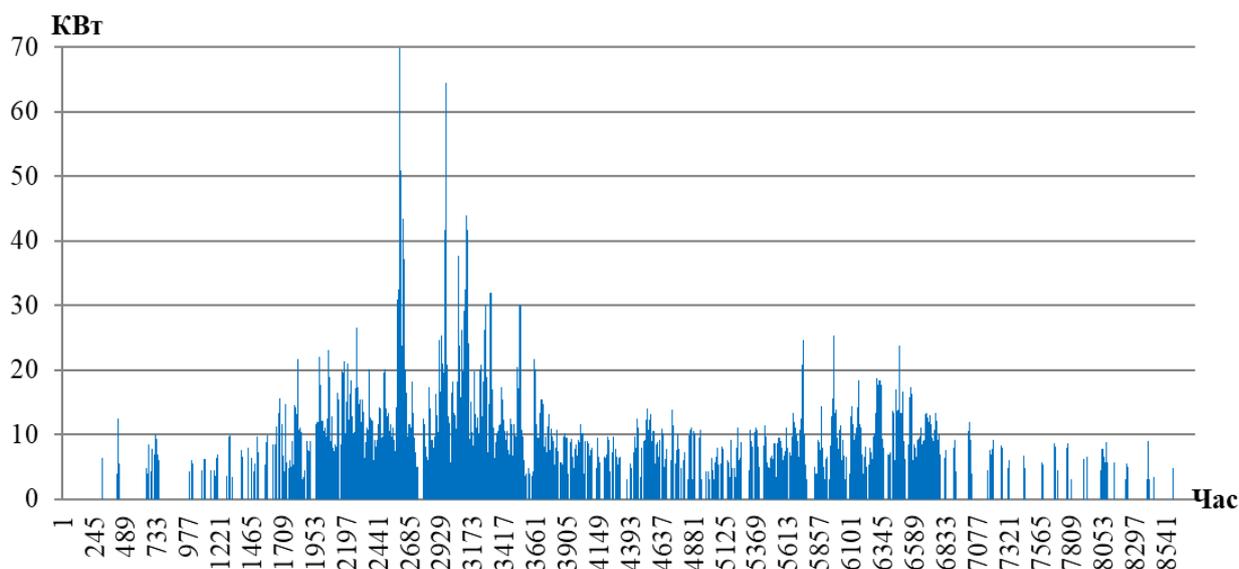


Рис. 6. Годовая выработка ВЭУ

Для анализа эффективности работы ветровой электростанции рассчитаем ее коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). КИУМ показывает, насколько эффективно используется генерирующая мощность оборудования или установки в течение определенного периода времени. Этот показатель обычно выражается в процентах. Высокие значения КИУМ означают, что оборудование используется эффективно и с минимальными потерями энергии. Низкие значения указывают на необходимость оптимизации работы оборудования или изменения производственной стратегии.

Для определения КИУМ необходимо знать следующие параметры:

Установленная мощность оборудования ($P_{уст}$). Это максимальная мощность, которую может выдать оборудование при оптимальных условиях работы. В рамках этой части работы установленная мощность ВЭС равна номинальной мощности ВЭУ, так как для упрощения расчетов, визуализирующий предлагаемый метод моделирования, рассматривается установка только одной ВЭУ.

Среднее значение мощности, вырабатываемой за год ($P_{ср за год}$). Это отношение количества энергии, произведенного за год, к количеству часов в году.

Тогда КИУМ можно рассчитать по формуле:

$$КИУМ = \frac{P_{факт}}{P_{уст}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Важно отметить, что КИУМ может изменяться в зависимости от времени суток, сезона, погодных условий и других факторов. Поэтому для получения более точной информации об эффективности использования оборудования необходимо проводить измерения и расчеты за длительный период времени. В связи с этим в данном исследовании КИУМ будет определяться, как соотношение среднего значения мощности, вырабатываемой за год ($P_{\text{ср за год}}$), к установленной мощности ВЭС (формула 5). Это позволит учесть изменения скорости ветра в течение года и усреднить получаемое значение КИУМ.

$$\text{КИУМ} = \frac{P_{\text{ср за год}}}{P_{\text{уст}}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Для ветровых электрических станций КИУМ может достигать значений до 40%, однако в среднем эффективными можно считать электростанции, чей КИУМ составляет от 20% и выше. Это в первую очередь связано со стохастическим характером скорости ветрового потока и его направления.

Используя вышеприведенный подход, определяем, что для ветровой установки в селе Онгурен КИУМ составляет 4,36%, что является очень низким даже по меркам возобновляемой генерации. В связи с этим установки ВЭУ в качестве источника энергии в данном регионе не рекомендуется.

Заключение. Использование возобновляемых источников энергии является одним из наиболее значимых трендов в области энергетики. Возобновляемая энергетика предлагает множество преимуществ, включая экологическую чистоту, экономическую выгоду и снижение зависимости от ископаемых видов топлива. Это особенно актуально в контексте глобальных экологических проблем, таких, как изменение климата и загрязнение окружающей среды.

Использование цифровых двойников в возобновляемой энергетике улучшает работу электростанций и сетевых объектов. Особенно это полезно для ветровой и солнечной энергетики, где погодные условия влияют на выработку энергии. Цифровые двойники помогают моделировать работу станций, предсказывать выработку энергии и оптимизировать режимы работы оборудования, что снижает затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также повышает надёжность и безопасность энергетических систем. Для построения цифрового двойника объекта необходимо грамотно реализовать его математическую и цифровую модели. В связи с этим в данной работе предлагается подход к построению цифровой модели ветровой электростанции.

Предложенный метод математического моделирования ветровых установок позволяет прогнозировать генерацию электрической энергии на основании усредненных значений ретроспективных данных скорости ветрового потока. При замене ретроспективных данных на реальные полученную математическую модель можно использовать для построения цифрового двойника ВЭУ.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00382, <https://rscf.ru/project/23-21-00382/>

Список источников

1. Гончаров А.С. Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии. /А.С. Гончаров, В.М. Саклаков // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, 2018. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36585718>.
2. Aaron Parrott, Lane Warshaw Industry 4.0 and the digital twin technology. Deloitte Insights Manufacturing meets its match, 2017, – URL: <https://www2.deloitte.com/content/www/xen/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
3. Боровков А.И. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов // Цифровая трансформация экономики и промышленности: Сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием, Санкт-Петербург, 20–22 июня 2019 года / Под редакцией А.В. Баб-

- кина. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого”, 2019. – С. 234-245. – EDN ZUPIWC.
4. Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции, 2023. – №4. – DOI:10.25198/2077-7175-2023-4-35.
 5. Царев М.В. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования / М.В. Царев, Ю.С. Андреев // Известия вузов. Приборостроение, 2021. – Т. 64. – № 7. – 517-531.
 6. Menegon L., Isatto E.J. Digital twins as enablers of structure inspection and maintenance. *Gestão & Produção*, 2023, 30, e4922, DOI:10.1590/1806-9649-2022v30e4922.
 7. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.
 8. Анохов И.В. Цифровая тень как инструмент для исследования отрасли / И.В. Анохов // E-Management, 2022. – Т. 5. – №1. – С. 80-92. – DOI:10.26425/2658-3445-2022-5-1-80-92
 9. Pimenta F., Pacheco J., Branco C.M. et al. Development of a digital twin of an onshore wind turbine using monitoring data. *Journal of physics: conference series*, 2020, 1618, 022065, DOI:10.1088/1742-6596/1618/2/022065
 10. Jahanshahi Zeitouni M., Parvaresh A., Abrazeh S. et al. Digital twins-assisted design of next-generation advanced controllers for power systems and electronics: wind turbine as a case study. *Inventions*, 2020, 5(2), 19, DOI:10.3390/inventions5020019.
 11. Chetan, M., Yao, S., Griffith, D. T. Multi-fidelity digital twin structural model for a sub-scale downwind wind turbine rotor blade. *Wind energy*, 2021, DOI:10.1002/we.2636.
 12. Merz K., Chabaud V., Garsia Rosa P.B. et al. A hierarchical supervisory wind power plant controller // *Journal of physics: Conference serie*, 2018, DOI:10.1088/1742-6596/2018/1/012026.
 13. Solman H., Kirkegaard J.K., Smits M. et al. Digital twinning as an act of governance in the wind energy sector. *Environmental science & policy*, 2022, vol. 127, pp. 272-279, DOI:10.1016/j.envsci.2021.10.027.
 14. Obafemi O., Adedeji P.A., Madushele N. et al. Overview of digital twin technology in wind turbine fault diagnosis and condition monitoring. 2021 IEEE 12th International conference on mechanical and intelligent manufacturing technologies, 2021, pp. 201-207, DOI:10.1109/ICMIMT52186.2021.9476186.
 15. Поддаева О.И. Архитектурно-строительная аэродинамика / О.И. Поддаева. – М.: НИУ МГСУ, 2015. – 88с.

Щукин Никита Игоревич. Инженер-исследователь отдела систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, *niksha14@mail.ru*, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X, Россия, Иркутск, Лермонтова д.130

Щукина Виктория Михайловна. Аспирант ИРНИТУ, ассистент кафедры теплоэнергетики, *vitapiskunova98@gmail.com*, AuthorID: 921278, SPIN:6951-4829, ORCID:0000-0003-4019-8472.

UDC 519.654

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.011

Formation of a digital model of a wind turbine as part of a digital twin and its testing using the example of assessing the efficiency of wind turbine application in Ongureni village

Victoria M. Shchukina¹, Nikita I. Shchukin²

¹National research Irkutsk state technical university,
Russia, Irkutsk, *vitapiskunova98@gmail.com*

²Melentiev energy systems institute SB RAS,
Russia, Irkutsk

Abstract. The relevance of building digital twins in the field of wind power plants (WPP) is due to the rapid development of technologies and the need to improve the efficiency of energy systems operation. Digital twins allow creating virtual models of real objects, which opens new horizons for process optimization, condition

monitoring and prediction of plant operation. In the conditions of global transition to sustainable energy, the importance of digital modeling increases, as it contributes to more efficient use of resources, cost reduction and increased reliability of energy systems.

The paper discusses the process of forming a digital model of a wind power plant, which is a key element in the development of a digital twin. The paper describes the main approaches and methods used to create an accurate virtual replica of a real wind turbine, including the selection of modeling parameters such as geometric dimensions, materials and mechanical properties, as well as the definition of boundary conditions that allow for the most accurate reproduction of operational features.

Special attention is paid to the comparison of weather conditions, including wind speed time series, which is critical for estimating the utilization factor of the installed capacity of the wind turbine. These weather data allow for accurate modeling of real plant conditions and for adjusting model parameters to changing climatic conditions. The paper also discusses modern technologies and tools used to ensure a high degree of correspondence between the digital model and the physical object, such as data acquisition systems and analysis software. The prospects for the application of digital twins in the wind energy industry are emphasized in the context of optimizing plant performance, predicting power generation and improving overall operational efficiency, which is an important step towards the sustainable development of renewable energy sources.

Keywords: digital twin, numerical model, wind farms, mathematical modeling

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00382, <https://rscf.ru/project/23-21-00382/>.

References

1. Goncharov A.S., Saklakov V.M. Cifrovoy dvojniki: obzor suschestvuyuschih reshenij i perspektivy razvitiya tehnologii [Digital twin: overview of existing solutions and prospects for technology development]. Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Article in the proceedings of the national scientific and practical conference], 2018, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36585718>.
2. Aaron Parrott, Lane Warshaw. Industry 4.0 and the digital twin technology. Deloitte Insights Manufacturing meets its match, 2017, available at: <https://www2.deloitte.com/content/www/xen/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
3. Borovkov A.I. Ryabov Yu.A. Tsifrovye dvoyniki: opredelenie, podkhody i metody razrabotki [Digital Twins: definition, approaches and development methods]. Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti: Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii s zarubezhnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 20–22 iyunya 2019 goda [Digital transformation of the economy and industry: Proceedings of the scientific and practical conference with foreign participation, St. Petersburg, June 20–22, 2019], Edited by A.V. Babkin, Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo" [St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University"], 2019, pp. 234-245, EDN ZUPIWC.
4. Sosfenov, D. A. Tsifrovoy dvoyniki: istoriya vozniknoveniya i perspektivy razvitiya [Digital twin: history of origin and development prospects]. Intellekt. Innovatsii. Investitsii [Intellect. Innovations. Investments], 2023, vol. 4, pp. 35–43, DOI:10.25198/2077-7175-2023-4-35.
5. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Tsifrovyye dvoyniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikatsiya, tekhnologii, stsenarii ispol'zovaniya [Digital twins in industry: development history, classification, technologies, use cases]. Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye [News of universities. Instrumentation], 2021, vol. 64, no. 7. pp. 517-531.
6. Menegon L., Isatto E.J. Digital twins as enablers of structure inspection and maintenance. Gestão & Produção, 2023, 30, e4922, DOI:10.1590/1806-9649-2022v30e4922.
7. GOST R 57700.37-2021. Komp'yuternyye modeli i modelirovaniye. Tsifrovyye dvoyniki izdeliy. Obshchiye polozheniya [State Standard P 57700.37-2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions].
8. Anokhov I.V. Tsifrovaya ten' kak instrument dlya issledovaniya otrasli [Digital shadow as a tool for industry exploring]. E-Management, 2022, vol. 5, n 1, pp. 80-92, DOI:10.26425/2658-3445-2022-5-1-80-92.
9. Pimenta F., Pacheco J., Branco C.M. et al. Development of a digital twin of an onshore wind turbine using monitoring data. Journal of physics: conference series, 2020, 1618, 022065, DOI:10.1088/1742-6596/1618/2/022065
10. Jahanshahi Zeitouni M., Parvaresh A., Abrazeh S. et al. Digital twins-assisted design of next-generation advanced controllers for power systems and electronics: wind turbine as a case study. Inventions, 2020, 5(2), 19, DOI:10.3390/inventions5020019.
11. Chetan, M., Yao, S., Griffith, D. T. Multi-fidelity digital twin structural model for a sub-scale downwind wind turbine rotor blade. Wind energy, 2021, DOI:10.1002/we.2636.

12. Merz K., Chabaud V., Garsia Rosa P.B. et al. A hierarchical supervisory wind power plant controller // Journal of physics: Conference serie, 2018, DOI:10.1088/1742-6596/2018/1/012026.
13. Solman H., Kirkegaard J.K., Smits M. et al. Digital twinning as an act of governance in the wind energy sector. Environmental science & policy, 2022, vol. 127, pp. 272-279, DOI:10.1016/j.envsci.2021.10.027.
14. Obafemi O., Adedeji P.A., Madushele N. et al. Overview of digital twin technology in wind turbine fault diagnosis and condition monitoring. 2021 IEEE 12th International conference on mechanical and intelligent manufacturing technologies, 2021, pp. 201-207, DOI:10.1109/ICMIMT52186.2021.9476186.
15. Poddaeva O.I. Arhitekturno-stroitel'naya aerodinamika [Architectural and construction aerodynamics]. M., NIU MGSU, 2015, 88p.

Shchukin Nikita Igorevich. Research engineer, department of artificial intelligence systems in power engineering, L.A. Melentiev institute of power engineering systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, niksha14@mail.ru, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X, Russia, Irkutsk, 130 Lermontova str.

Shchukina Victoria Mikhailovna. Postgraduate student of IrNRTU, assistant of heat power engineering department, vitapiskunova98@gmail.com, AuthorID:921278, SPIN: 6951-4829, ORCID: 0000-0003-4019-8472.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 28.11.2024.

The article was submitted 09/02/2024; approved after reviewing 11/28/2024; accepted for publication 11/28/2024.

УДК 621.311.1

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.012

Создание расчетной схемы газоснабжающей системы России с детализацией Восточной Сибири и Дальнего Востока

Калинина Жанна Вадимовна, Дзюбина Татьяна Владимировна, Илькевич Николай Иванович

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

Аннотация. Существующая геополитическая ситуация привела к сокращению экспортных объемов газа в западные страны, в связи с этим необходимо исследовать возможности переориентации газовых потоков на восток (внутренний рынок и экспорт) и активное развитие поставок СПГ морским путем. Планирование развития системы газоснабжения на перспективу проводится с помощью оптимизационных расчетов. Невозможно создать подробную расчетную модель системы, достаточно точно описывающую все ее компоненты. Расчетная схема должна иметь меньше узлов и связей по сравнению с подробной схемой, при этом должны сохраняться все ее основные характеристики.

Отсюда возникает актуальность и важность уточнения существующих методов укрупнения схем и определения показателей их объектов. Предложенная методика агрегирования исходной схемы позволяет создать укрупненную расчетную схему Единой системы газоснабжения и на её основе проводить расчеты по развитию газовой отрасли России, а также отдельных ее регионов, на перспективу. В статье рассматриваются возможные направления развития газотранспортной системы, сформирована подробная схема газоснабжения восточного крыла страны. Сформирована расчетная схема ЕСГ РФ с детализацией Восточной Сибири и Дальнего Востока для исследования развития данного региона в комплексе с газоснабжающей системой всей страны.

Ключевые слова: газоснабжающая система, газотранспортные и газодобывающие предприятия, исходная схема, агрегирование, технико-экономические характеристики, расчетная схема

Цитирование: Калинина Ж.В. Создание расчетной схемы газоснабжающей системы России с детализацией Восточной Сибири и Дальнего Востока / Ж.В. Калинина, Т.В. Дзюбина, Н.И. Илькевич // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 123-131. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.012.

Введение. В России около 300 предприятий добывают и транспортируют природный газ. Большинство из них связаны друг с другом и составляют Единую систему газоснабжения (ЕСГ). Она объединяет системы газоснабжения стран СНГ, Восточной и Западной Европы, сотрудничает с производителями газа в Средней Азии и поставляет газ в страны Северо-Восточной Азии. ЕСГ включает в себя: объекты добычи, переработки, транспорта, а также подземные хранилища и потребителей газа.

Однако, в настоящее время, из-за сложившейся геополитической ситуации и санкционного давления, имеется большая неопределенность в перспективах развития газовой отрасли. Сокращение поставок российского трубопроводного газа в Европу создает необходимость переориентации потоков газа: экспортных поставок с запада на восток, в страны Азиатско-Тихоокеанского региона; активное развитие транспорта сжиженного природного газа в акватории Северного морского пути; увеличение внутреннего потребления газа (газификация регионов страны); строительство и расширение газоперерабатывающих заводов (строительство ГПЗ в Ленинградской области, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, увеличение мощностей в центральной России).

Поиск оптимального развития системы требует решения различных задач, в которых элементы системы рассматриваются с разной степенью детализации. Таким образом, разработка и уточнение методов упрощения газоснабжающих схем и технико-экономических характеристик их объектов крайне необходимы и актуальны.

Моделирование газоснабжающих систем включает в себя следующие этапы:

- 1) формирование расчетной схемы;

- 2) определение показателей существующих и новых объектов расчетной схемы, может включать прогнозирование спроса на оптовых рынках природного газа;
- 3) сбор информации по годам расчетного периода.

Построение расчетной схемы газоснабжающей системы происходит путем укрупнения подробной схемы, при этом должны сохраняться все необходимые свойства первичной схемы.

1. Анализ методик моделирования газоснабжающих систем и их объектов. Масштабность и разрастание больших технических систем, в частности, газоснабжающей системы, обусловили необходимость создания укрупненных расчетных схем и определения показателей составляющих их объектов для комплексного рассмотрения и поиска оптимального пути их развития.

Обычно укрупненные расчетные схемы по системе создаются экспертным методом: на карту рассматриваемого региона наносятся основные потребители и источники газа, а также основные потоки газа и точки их пересечения. Схемы, созданные таким методом, обычно слишком упрощены и недостаточно точно раскрывают особенности газоснабжения некоторых регионов и субъектов страны. Существуют методы определения технико-экономических показателей для подробных [1, 2] и расчетных укрупненных схем [1, 3-5]. Так, в [2] описаны структура, состав и определение основных показателей объектов газоснабжающей системы, при этом они обычно рассчитываются как усредненные величины. В [3, 4] показаны подходы к укрупнению показателей из нижележащего уровня иерархии в более высокий уровень, используется метод сверток частных значений показателей. В [5] рассматривается итеративное агрегирование, согласно которому изучаются особенности системы, статистические данные и далее определяются основные показатели системы, задаются их весовые коэффициенты, с помощью которых и рассчитываются агрегированные характеристики. Использование этого метода ограничено невозможностью сбора огромного количества подробной исходной информации по системе.

Несмотря на отсутствие в мире аналога по размерам ЕСГ России, за рубежом также проводятся исследования развития больших газоснабжающих систем [6 – 11]. Достаточно подробный анализ и сравнение математических моделей газоснабжающих систем, созданных в разных странах, приводится в работах [12, 13]. Там же указывается на отсутствие прозрачности получения агрегированной сети в разных моделях. В работе [14] рассматриваются сети с различной степенью детализации, например, на уровне страны, города или района.

Ввод в эксплуатацию новых источников газа и газотранспортных связей занимает несколько лет, поэтому необходимо планировать развитие газоснабжающей системы на перспективу. Для этого создается избыточная расчетная схема, отражающая возможные варианты развития системы. Важным вопросом при этом является прогнозирование спроса на газ. Предлагаются различные методики для долгосрочного прогнозирования, основанные на изменении параметров экономического развития [15, 16], как на уровне страны, так и на региональном уровне с учетом местных особенностей [17].

За рубежом спрос на газ определяется, исходя из данных по площади и населению страны, используются удельные коэффициенты потребления газа на душу населения [14].

Анализ российского и зарубежного научно-практического опыта показывает, что проблема агрегирования газоснабжающих систем недостаточно изучена и не систематизирована.

В статье описывается моделирование газоснабжающей системы, а именно: создание ее расчетной схемы на основе данных по газотранспортным и газодобывающим предприятиям, а также магистральным газопроводам, поставкам СПГ морским путем, месторождениям, подземным хранилищам газа и потребителям. Предлагается алгоритм создания модельной расчетной схемы газоснабжающей системы до уровня субъектов РФ. С помощью предложенного

алгоритма подробные схемы системы газоснабжения преобразуются в более простые, содержащие значительно меньшее число объектов, что делает их удобным для визуализации результатов расчетов и выполнения исследований, при этом достаточно точно отображаются основные показатели объектов системы. На основе предложенного алгоритма агрегирования создается схема ЕСГ с детализацией Восточной Сибири и Дальнего Востока.

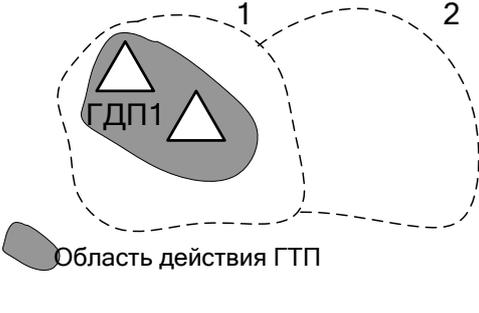
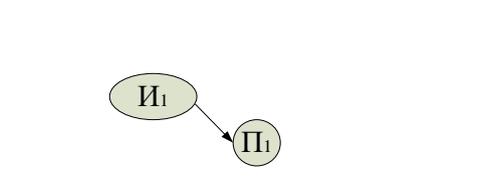
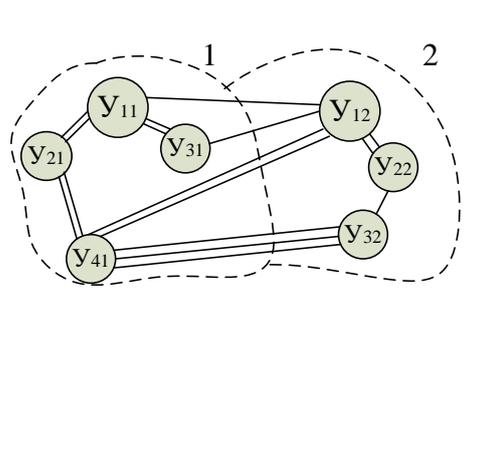
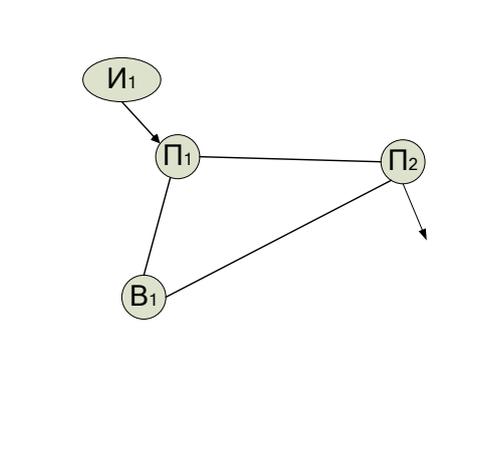
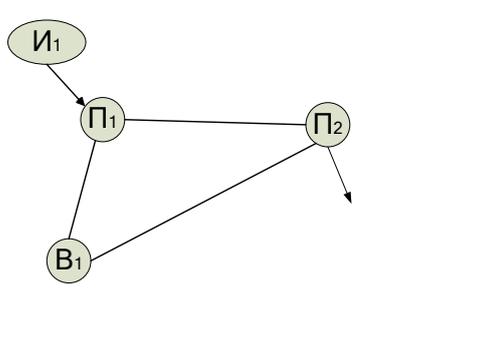
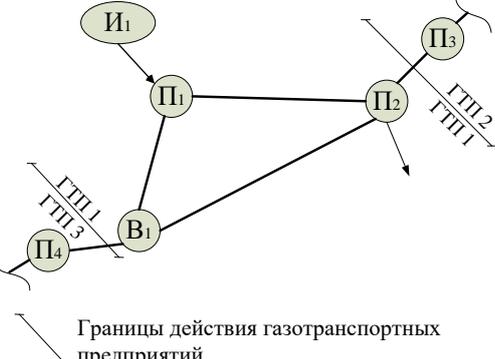
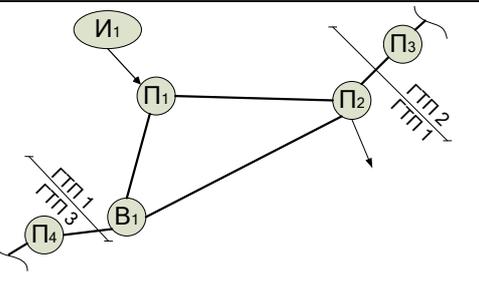
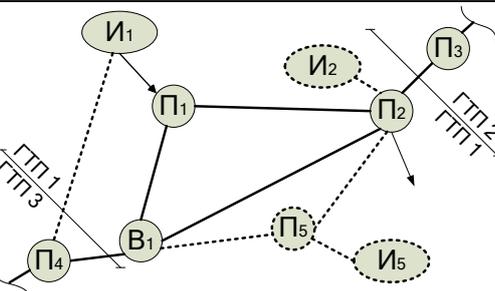
2. Алгоритм создания расчетной схемы газоснабжения. В данной работе система газоснабжения рассматривается, как многоуровневая модель: 1-ый уровень – магистральные газопроводы и маршруты морским транспортом, месторождения, подземные хранилища газа; 2-ой уровень – газодобывающие и газотранспортные предприятия; 3-ий уровень – ЕСГ РФ. Определение оптимальных параметров развития ЕСГ: объемов и направлений транспорта газа по системе, издержек на транспорт и добычу, последовательности введения новых объектов добычи и транспорта проводится на верхнем уровне (ЕСГ) с помощью оптимизационной потоковой модели. Для расчетов требуется исходная информация, которая извлекается из статистических данных и расчетов уровней, находящихся ниже. Сначала рассматриваются технико-экономические характеристики элементов нижнего уровня (магистральные газопроводы, месторождения). Эти данные укрупняются, добавляются данные по газодобывающим и газотранспортным предприятиям, создается агрегированная расчетная схема.

Полученные расчетные данные верхнего уровня, при возникновении расхождений, согласуются с данными нижних уровней. Проводится следующий цикл расчетов, пока не будет найдено решение, приемлемое для всех уровней.

С помощью разработанного ранее алгоритма [18], показанного пошагово в табл. 1, получаем агрегированную расчетную схему ЕСГ, доведенную до уровня субъектов РФ. В итоге каждый субъект будет представлен одним узлом-потребителем, одним узлом-источником, если в субъекте есть месторождения. Сеть магистральных газопроводов и морские маршруты транспортировки между узлами будут представлены дугами в однониточном исполнении.

Таблица 1. Алгоритм создания расчетной схемы газоснабжающей системы

Шаг	Исходная схема	Полученная схема
<p>Обозначение в каждом субъекте основных узлов ветвления. Выделяем на схеме узлы, из которых потоки идут в трех направлениях и более (количество смежных узлов ≥ 3)</p>	<p>U_{ij} - узел потребитель подробной схемы, i - номер узла потребителя, j - номер субъекта РФ</p>	
<p>Обозначение основных узлов потребителей и узлов ветвления 1. Выделяем в каждом субъекте узлы с максимальной потребностью, совмещаем со смежными узлами ветвления. 2. Суммируем потребность в газе субъекта. 3. При необходимости оставляем основной узел ветвления в субъекте</p>	<p>Экспорт</p>	<p>На экспорт</p> <p>P_i – узел потребитель агрегированной схемы; B_i - узел ветвления агрегированной схемы</p>

<p>(если он не совпадает с узлом потребителем).</p>		
<p>Обозначение узлов источников 1. Наносим узлы источники по границам действия ГДП 2. Определяем суммарную добычу месторождений ГДП. 3. Определяем цену добычи газа в узлах источников.</p>		 <p>Иi – узел потребитель агрегированной схемы</p>
<p>Нанесение газотранспортных связей 1. Представляем многониточные МГ или транспорт СПГ по морскому пути в односторонние дуги. 2. Определяем пропускную способность полученных дуг и их длины. 3. Определяем цены транспорта газа по дугам графа.</p>		
<p>Объединение полученных агрегированных схем ГТП Соединяем агрегированные схемы по границам действия ГТП.</p>		 <p>Границы действия газотранспортных предприятий</p>
<p>Формирование избыточной схемы Добавляем в схему проекты новых газотранспортных систем, готовящихся к разработке месторождений и потенциальных потребителей.</p>		

В соответствии с таблицей 1 результирующие значения по спросу на газ (шаг 2), добыче (шаг 3), пропускной способности и длине магистральных газопроводов или объемам морской перевозки СПГ (шаг 4) для агрегированной схемы ГСС определяются суммированием соответствующих значений подробной схемы, исходя из условия их равенства в исходной и агрегированной схемах.

3. Создание расчетной схемы ЕСГ для проведения исследований её развития. В настоящее время из-за сложившейся геополитической ситуации значительно снижены объемы поставок газа в Европу, остро встал вопрос о диверсификации поставок.

В связи с этим существуют следующие возможности реализации газа:

- Разворот на восток:
 - Развитие транспорта СПГ в акватории Северного морского пути для снабжения рынков потребителей Крайнего Севера, Дальнего Востока и стран АТР.
 - Строительство газопроводов в Китай.
- Развитие газовой промышленности внутри РФ:
 - Строительство в РФ мощных газоперерабатывающих предприятий, которые будут использовать природный газ, как сырье.
 - Развитие инженерных коммуникаций газоснабжения жилых и промышленных комплексов Восточной Сибири и Дальнего Востока.

В представленных направлениях сделан упор на активное развитие ГСС северных и восточных регионов РФ.

Уровень детализации расчетной схемы зависит от поставленной задачи и от степени детализации доступных исходных данных по объектам газоснабжающей системы. Допустимо делать акцент на отдельных регионах и представлять их на схеме более детально. В таком случае развитие обозначенных регионов будет рассматриваться в комплексе с развитием всей системы газоснабжения страны. Для исследования развития восточного направления, учитывающего программы газификации Восточной Сибири и Дальнего Востока, а также развития транспорта СПГ в акватории Северного морского пути, составлена подробная схема этих регионов, рис.1. На основе данных ПАО «Газпром», ПАО «НК Роснефть» и ПАО «Новатэк» на карту рассматриваемых регионов нанесены месторождения, существующие и проектируемые магистральные газопроводы, подземные хранилища и населенные пункты, через которые либо уже идут поставки газа, либо планируются в будущем (потенциальные потребители газа).

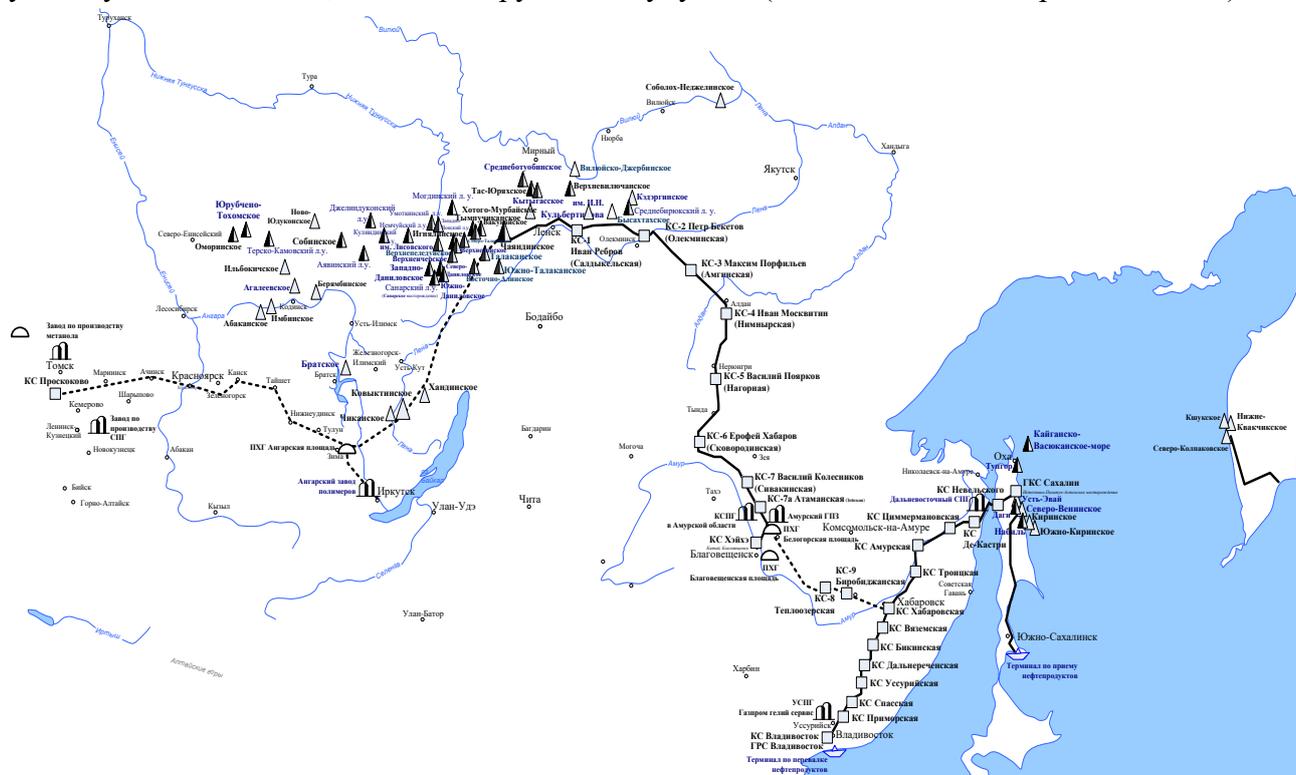


Рис. 1. Подробная схема ГСС Восточной Сибири и Дальнего Востока

На основе предложенного алгоритма была составлена более детальная избыточная расчетная схема восточного крыла (схема Восточной Сибири и Дальнего Востока) и добавлена к

расчетной схеме ЕСГ (агрегированной до уровня субъектов РФ), рис. 2. Помимо магистральных газопроводов, на схему добавлены поставки СПГ морским транспортом [19].

Представленная методика используется для разработки детальной схемы развития экспортных поставок российского СПГ в восточных направлениях.

Полученная расчетная схема позволяет с помощью сетевой потоковой модели проводить оценку возможностей развития системы газоснабжения России с учетом обеспечения потребности внутреннего рынка и заданных экспортных поставок в страны ближнего и дальнего зарубежья, а также рассчитывать квазидинамику развития системы газоснабжения России на средне- и долгосрочную перспективу.

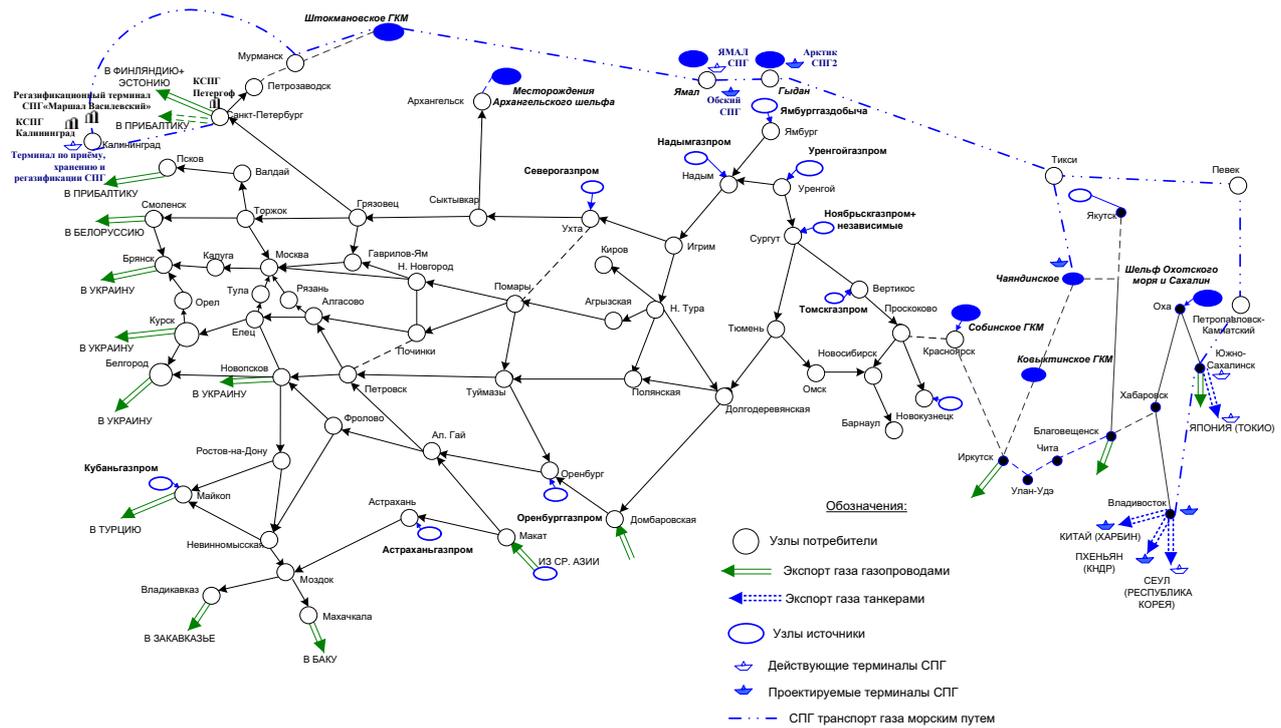


Рис. 2. Избыточная расчетная схема ЕСГ РФ с детализацией северных и восточных регионов РФ

Заключение.

1. Проведен анализ методик агрегирования газоснабжающих систем и их объектов.
2. Кратко изложен алгоритм создания расчетной схемы из реальной подробной схемы газоснабжающей системы, т.е. представления её в виде более простой схемы, характеризующейся меньшим числом узлов и связей.
3. Рассмотрены актуальные направления развития ГСС страны в связи с новыми геополитическими условиями.
4. Сформирована подробная схема газоснабжения Восточной Сибири и Дальнего Востока.
5. С помощью предложенного алгоритма для преобразования реальной схемы ГСС в более простую создана расчетная схема ЕСГ с детализацией северных и восточных регионов РФ. На схему добавлен морской транспорт СПГ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. Регистрационный номер: AAAA-A21-121012090012-1.

Список источников

1. Илькевич Н. И. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения / Н.И. Илькевич, Т.В. Дзюбина, Ж.В. Калинина. – Новосибирск: Наука, 2014. – 217 с.
2. Дунаев В.Ф. Экономика предприятий (организаций) нефтяной и газовой промышленности / В.Ф. Дунаев, В.А. Шпаков, В.Н. Лындин и др. – Москва: ЦентрЛитНефтеГаз, 2015.– 330 с.
3. Козлов В.В. Агрегирование показателей свойств сложных технических систем на основе информационной свертки / В.В. Козлов, А.В. Лагун, Е.А. Миронов и др. // Информация и космос, 2018. – № 3. – С. 44-48.
4. Козлов В.В. Особенности оценивания свойств сложных технических систем на этапе проектирования / В. В. Козлов и др. // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования, 2017. – № 4. – EDN: ZGRZXD
5. Дудкин Л.М. Итеративное агрегирование и его применение в планировании / Л.М. Дудкин. – М.: Экономика, 1979. – 328 с.
6. Ten year network development plan 2024. Available at: <https://www.entsog.eu/sites/default/files/2023-09/Draft%20Guidelines%20for%20Project%20Inclusion%20for%20TYNDP%202024.pdf> (accessed: 11/17/2023).
7. In focus: EU energy security and gas supplies. Available at: [https://energy.ec.europa.eu/news/focus-eu-energy-security-and-gas-supplies-2024-02-15_en\(accessed: 02/27/2024\)](https://energy.ec.europa.eu/news/focus-eu-energy-security-and-gas-supplies-2024-02-15_en(accessed: 02/27/2024)).
8. Миронова И.Ю. Газовые рынки стран Восточной Азии / И.Ю. Миронова // ЭНЕРПО, 2016. – URL: https://eusp.org/sites/default/files/archive/centres/ENERPO_RC/Reports/2016-08-16_WP_Mironova.pdf (дата обращения: 15.03.2021)
9. Gas market report 2023. Available at: <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q1-2023> (accessed: 01/26/2024)
10. Global gas report 2023. Available at:https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/10/IGU-Global-Gas-Report_2023_10.pdf (accessed: 01/26/2024)
11. Inman M., Aitken G., Zimmerman S. Global energy monitor. San Francisco, April 2021, 25 p., available at: <https://globalenergymonitor.org/wpcontent/uploads/2021/03/GEM-Europe-Gas-Tracker-Report-2021.pdf> (accessed: 04/11/2022)
12. Hobbs B.F. Imperfect models of imperfect competition in EU gas markets: great potential, great shortcomings, University of Cambridge, 2010, pp. 12.
13. Smeers Y. Gas models and three difficult objectives. University Catholique de Louvain, 2008, pp. 59.
14. Carvalho R., Buzna L., Bono F., Masera M. et al. Resilience of natural gas networks during conflicts, crises and disruptions. PLoS ONE, 2014, pp. 9, DOI:10.1371/journal.pone.0090265.
15. Медведева Е.А. Энергопотребление и уровень жизни / Е.А. Медведева, В.М. Никитин. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1991 –137 с.
16. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН–Московская школа управления СКОЛКОВО, 2019. – 210 с. – ISBN 978-5-91438-028-8.
17. Кононов Ю.Д. Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики / Ю.Д. Кононов, Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов и др. – Новосибирск: Наука, 2009 – 178 с.
18. Kalinina Zh.V., Dzyubina T.V., Ilkevich N.I. A metod to aggregate schemes of gas systems for an in-depth study of their expansion. energy systems research, 2022, vol.5, no 1, pp.21-30.
19. Распоряжение Правительства РФ от 16.03.2021 N 640-р «О долгосрочной программе развития производства сжиженного природного газа в Российской Федерации».

Калинина Жанна Вадимовна. К.т.н., научный сотрудник института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Область научных интересов – агрегирование расчетных схем газовой системы, подготовка и анализ технико-экономической информации по объектам Единой системы газоснабжения. SPIN: 2281-2096, AuthorID: 709740, г. Иркутск, Лермонтова, 130.

Дзюбина Татьяна Владимировна. К.т.н., старший научный сотрудник института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Область научных интересов – математическое моделирование надежности крупных энергетических систем, проблемы расчета цен и тарифов на природный газ. SPIN: 1754-8118, AuthorID: 311806, г. Иркутск, Лермонтова, 130.

Илькевич Николай Иванович. Д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Развитие систем газоснабжения института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Область научных интересов – многоуровневое моделирование развития газовых систем. SPIN: 1447-3862, AuthorID: 3314716. Россия, г. Иркутск, Лермонтова, 130.

UDC 621.311.1

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.012

Development of a calculation scheme of Russia's gas system with a focus on Eastern Siberia and the Far East

Zhanna V. Kalinina, Tatyana V. Dzyubina, Nikolay I. Ilkevich

Melentiev energy systems institute SB RAS,

Russia, Irkutsk, tvleo@isem.irk.ru

Abstract. The present geopolitical situation has caused a decrease in gas export volumes to Western countries. In this context, it is essential to explore the potential for redirecting gas flows to the east, including the domestic market and exports. Additionally, it is crucial to actively develop LNG supplies by sea. The future expansion of the gas system is planned using optimization calculations. It is impossible to build a detailed computational model of a system that sufficiently accurately describes all its components. The calculation scheme must have fewer nodes and connections compared to the detailed scheme, while still preserving all of its main characteristics. Therefore, it is crucial to clarify the existing methods for aggregating the schemes and determining the indices of their components. The proposed methodology for aggregating the initial calculation scheme allows designing an expanded calculation scheme of the Unified gas system, which can then be used to perform calculations for the future development of the gas industry in Russia and its individual regions. The paper explores potential directions for the expansion of the gas transmission system and provides a detailed gas supply scheme for the eastern part of the country. The calculation scheme was developed for Russia's Unified gas system with a specific focus on Eastern Siberia and the Far East to investigate the region's development in conjunction with the country's gas system.

Keywords: gas system, gas transmission and gas production companies, initial scheme, aggregation, technical and economic characteristics, calculation scheme

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the project State Assignment No. FWEU-2021-0002 of the Program of Fundamental Research of the Russian Federation for 2021-2030. Registration number: AAAA-A21-121012090012-1.

References

1. Ilkevich N.I., Dzyubina T.V., Kalinina Zh.V. *Mnogourovnevoe modelirovanie razvitiya sistem gazosnabzheniya* [Multilevel modeling of the gas system development]. Novosibirsk, Nauka [Science], 2014, 217 p.
2. Dunaev V.F., Shpakov V.A., Lyndin V.N. et al. *Ekonomika predpriyatij (organizacij) neftyanoj i gazovoj promyshlennosti* [Economics of enterprises (organizations) of the oil and gas industry]. Moscow: TsentrLitNefteGaz Publ. [CenterLitOilGas], 330 p., 2015.
3. Kozlov V.V., Lagun A.V., Mironov E.A. et al. *Agregirovanie pokazatelej svoystv slozhnyh tekhnicheskikh sistem na osnove informacionnoj svertki* [Aggregation of indicators of characteristics for complex engineering systems based on information convolution]. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space], no. 3, pp. 44-48, 2018.
4. V.V. Kozlov [et al.] *Osobennosti ocenivaniya svoystv slozhnyh tekhnicheskikh sistem na etape proektirovaniya* [Specific features of evaluating the properties of complex engineering systems at the design stage]. *Informatsionno-ekonomicheskiye aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya* [Information and economic aspects of standardization and technical regulation], 2017, no. 4 (38), EDN: ZGRZXD.
5. Dudkin L.M. *Iterativnoe agregirovanie i ego primenenie v planirovanii* [Iterative aggregation and its application in planning]. Moscow, *Ekonomika* [Economy], 328 p, 1979.
6. Ten year network development plan 2024. Available at: <https://www.entsog.eu/sites/default/files/2023-09/Draft%20Guidelines%20for%20Project%20Inclusion%20for%20TYNDP%202024.pdf> (accessed: 11/17/2023).
7. In focus: EU energy security and gas supplies. Available at: https://energy.ec.europa.eu/news/focus-eu-energy-security-and-gas-supplies-2024-02-15_en(accessed: 02/27/2024).
8. Mironova I.Y. *Gazovye rynki stran Vostochnoj Azii* [Gas markets in East Asia], ENERPO, 2016, available at: https://eusp.org/sites/default/files/archive/centres/ENERPO_RC/Reports/2016-08-16_WP_Mironova.pdf (accessed: 03/15/2021)
9. Gas market report 2023. Available at: <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q1-2023> (accessed: 01/26/2024)
10. Global gas report 2023. Available at: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/10/IGU-Global-Gas-Report_2023_10.pdf (accessed: 01/26/2024)

11. Inman M., Aitken G., Zimmerman S. Global energy monitor. San Francisco, April 2021, 25 p., available at: <https://globalenergymonitor.org/wpcontent/uploads/2021/03/GEM-Europe-Gas-Tracker-Report-2021.pdf> (accessed: 04/11/2022)
12. Hobbs B.F. Imperfect models of imperfect competition in EU gas markets: great potential, great shortcomings, University of Cambridge, 2010, pp. 12.
13. Smeers Y. Gas models and three difficult objectives. University Catholique de Louvain, 2008, pp. 59.
14. Carvalho R., Buzna L., Bono F., Masera M. et al. Resilience of natural gas networks during conflicts, crises and disruptions. PLoS ONE, 2014, pp. 9, DOI:10.1371/journal.pone.0090265.
15. Medvedeva E.A., Nikitin V.M. Energopotreblenie i uroven' zhizni [Energy consumption and living standards]. Novosibirsk: Nauka [Science], 137 p, 1991.
16. Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2019 [Forecast for the energy development in the world and Russia 2019]. ed. by A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagin; INEI RAN–Moskovskaya shkola upravleniya SKOLKOVO [ERI RAS, Moscow school of management SKOLKOVO], 2019, 210 p., ISBN 978-5-91438-028-8.
17. Kononov Yu. D., Galperova E.V., Kononov D.Yu. et al. Metody i modeli prognoznykh issledovaniy vzaimosvyazey energetiki i ekonomiki [Methods and models for predictive studies of the relationship between energy and economics]. Novosibirsk: Nauka [Science], 178 pp., 2009.
18. Kalinina Zh.V., Dzyubina T.V., Ilkevich N.I. A metod to aggregate schemes of gas systems for an in-depth study of their expansion. Energy systems research, 2022, vol.5. no. 1, pp.21-30.
19. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 16.03.2021 N 640-r "O dolgosrochnoy programme razvitiya proizvodstva szhizhennogo prirodnogo gaza v Rossiyskoy Federatsii" [Order of the Government of the Russian Federation dated March 16, 2021 N 640-r "On the long-term program for the development of liquefied natural gas production in the Russian Federation."]

Kalinina Zhanna Vadimovna. Ph.D., researcher Melentiev energy systems institute SB RAS, Main research interests: aggregation of design schemes for a gas system, preparation and analysis of technical and economic information on the Unified Gas System facilities SPIN: 2281-2096, AuthorID: 709740, tvleo@isem.irk.ru, Irkutsk, Lermontova, 130.

Dzyubina Tatyana Vladimirovna. Ph.D. Senior researcher Melentiev energy systems institute SB RAS. Scientific interests: mathematical modeling of reliability of large energy systems, the problems of calculation of natural gas prices and tariffs. SPIN: 1754-8118, AuthorID: 311806, Irkutsk, Lermontova, 130.

Ilkevich Nikolay Ivanovich. Dr.Sc., Chief Researcher at the Department of Pipeline Energy Systems. Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. Main research interests: multi-level modeling of the gas system development. SPIN: 1447-3862, AuthorID: 331471, Irkutsk, Lermontova, 130.

Статья поступила в редакцию 02.04.2024; одобрена после рецензирования 01.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 04/02/2024; approved after reviewing 12/01/2024; accepted for publication 12/17/2024.

Информационные системы и технологии

УДК 504.3: (519.25)

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.013

Обработка статистики метеорологических данных для оценки потенциала загрязнения атмосферы антропогенными выбросами в городах Ангарск, Братск, Иркутск

Плеханова Ольга Сергеевна¹, Асламова Вера Сергеевна¹, Асламов Александр Анатольевич²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *aslamovav@yandex.ru*

²Ангарский государственный технический университет,
Россия, Ангарск

Аннотация. В статье разработана онтология самоочищающейся способности атмосферы от антропогенных загрязнителей и выявлено влияние на нее значимых факторов. По данным сайта <https://tr5.ru>, в созданной базе данных в СУБД MySQL рассчитаны и проанализированы среднегодовые и среднемесячные значения метеорологических показателей накопления загрязнения атмосферы (МПЗА), МПЗА2, МПЗА3, и показателей самоочищения атмосферы (ПСА), усовершенствованный метеорологический показатель атмосферы (УМПА) для крупных промышленных городов Ангарск, Братск, Иркутск с высоким уровнем загрязнения атмосферы за 2010-2023 годы. Показано, что с коэффициентом детерминации 95,8-99,9% вместо показателя МПЗА3 можно использовать более простой для вычисления МПЗА2, вместо сложного для вычисления показателя ПСА – применять показатель 1/МПЗА. В Иркутске в мае только в 7,1% случаев в атмосфере формируются благоприятные условия для рассеивания загрязнений, а в Ангарске и Братске благоприятных условий для их рассеивания нет.

Ключевые слова: метеорологический потенциал загрязнения атмосферы (МПЗА), онтология факторов, регрессионная модель

Цитирование: Плеханова О.С. Обработка статистики метеорологических данных для оценки потенциала загрязнения атмосферы антропогенными выбросами в городах Ангарск, Братск, Иркутск / О.С. Плеханова, В.С. Асламова, А.А. Асламов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 132-145. –DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.013.

Введение. По данным многолетних наблюдений во многих городах Иркутской области зафиксирован высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха (ЗАВ) [1-5]. Наиболее неблагоприятная обстановка с ЗАВ складывается в городах Ангарск, Братск, Шелехов, в которых на уровне ЗАВ сильное влияние оказывают природные и климатические факторы, мешающие рассеиванию промышленных выбросов. ЗАВ устанавливалось путем сравнения фактических среднегодовых концентраций (СГК) загрязняющих веществ (ЗВ) со значениями среднегодовых ПДК_{сг} ЗВ, максимальных разовых концентраций (МРК) ЗВ – со значениями максимальных разовых ПДК_{мр}, наибольших из среднемесячных концентраций (НСМК) – со значениями среднесуточных ПДК [4]. В таблице 1 приведены степени превышения ПДК фактическими концентрациями ЗВ (бенз(а)пирен (БП), формальдегид (Ф), взвешенные вещества (ВВ), фенол (Фе)) в атмосфере городов Иркутской области из приоритетного списка городов РФ с наибольшим уровнем ЗАВ в 2021, 2022 годах [1, 6].

Из таблицы 1 видно, что наибольшее превышение разовых концентраций большинства ЗВ зарегистрировано в Ангарске. Следует отметить, что Братске в 2022 г. были зарегистрированы 6 случаев СИ>10 по БП, а наибольшая повторяемость превышения ПДК отмечалась для частиц РМ 2,5.

По сравнению с 2021 г. уровень загрязнения в рассматриваемых городах не изменился. Отмечается улучшение качества атмосферы в жилой зоне городов [1].

На уровень ЗАВ в рассматриваемых городах влияют промышленные предприятия, крупнейшие в РФ (Братский алюминиевый завод, завод ферросплавов ОАО «МЕЧЕЛ», Братский лесоперерабатывающий комплекс, АО «Ангарская нефтехимическая компания»), ТЭЦ, котельные и автотранспорт [1, 3-5].

Сравним динамику объемов выбросов основных загрязняющих веществ (ЗВ), таких, как: взвешенные частицы, CO, SO₂, NO₂ в промышленных городах Иркутск, Ангарск и Братск (см. рисунки 1-4).

Таблица 1. Состояние ЗАВ в 2022 г. в городах ИО

Город	Ангарск	Иркутск	Братск
Уровень ЗАВ	высокий	высокий	очень высокий
Максимальный вклад в ЗАВ	БП, Ф, ВВ	БП, ВВ, Ф, NO ₂ , озон	БП, Ф
МРК/ПДК _{мр}			
SO ₂	4,1	2,2	1,2
NO ₂	5,2	2,9	1,8
CO	3,4	2,0	2,0
ВВ	6,4	1,4	2,1
PM10	3,0	3,0	2,8
PM2,5	2,3	2,7	3,0
Ф	1,6	1,7	1,5
Фе	1,3		
СГК/ПДК _{сг}			
БП	2,6	2,6	7,2
Ф	2	2,7	3,3
NO ₂		1,3	
ВВ		2,0	
НСМК/ПДК _{сс}			
БП	8,8	7,0	33,7
Ф		2,1	

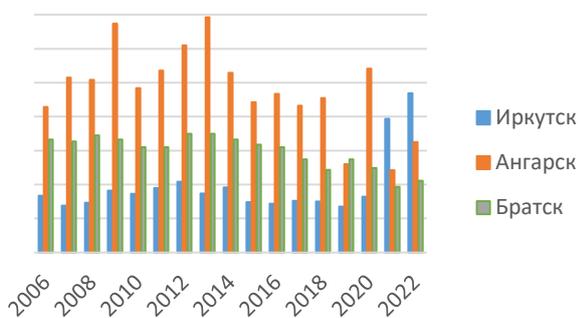


Рис. 1. Динамика выбросов взвешенных частиц, тыс. т.

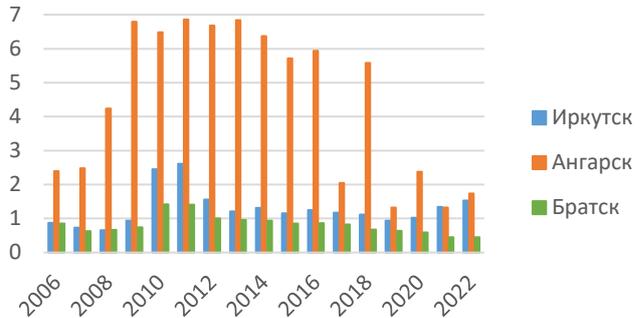


Рис. 2. Динамика выбросов NO₂, тыс. т.

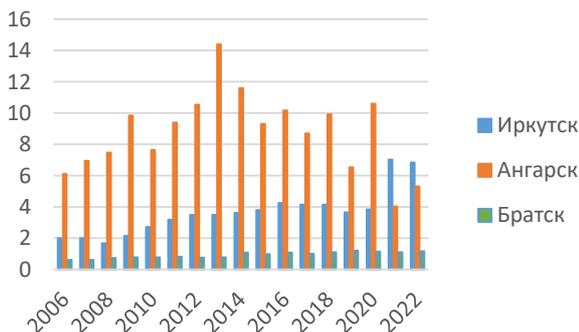


Рис. 3. Динамика выбросов SO₂, тыс. т.

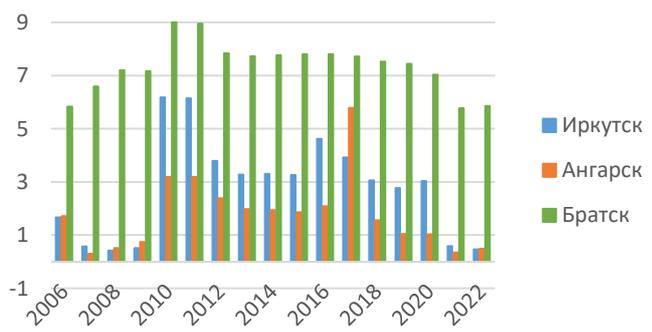


Рис. 4. Динамика выбросов CO, тыс. т.

Видно, что до 2020 г. по выбросам взвешенных частиц, SO_2 , NO_2 лидировал г. Ангарск. В 2021, 2022 гг. больший объем выбросов, взвешенных частиц и SO_2 наблюдался в Иркутске. Наибольший объем выбросов CO характерен для Братска. При такой экологической обстановке исследование самоочищающей способности атмосферы (ССА) актуально. Об актуальности исследования говорит включение 5 городов Иркутской области (Ангарск, Братск, Вихоревка, Усолье-Сибирское, Шелехов) в приоритетный список городов Иркутской области с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха (индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) не менее 14) [7].

Цель работы: онтологическое моделирование процессов самоочищения и рассеивания ЗВ атмосферой, исследование в СУБД MySQL различных моделей загрязнения и рассеивания ЗВ атмосферой городов Ангарска, Братска и Иркутска по метрологическим данным сайта <https://rp5.ru> и их анализ.

1. Онтологическое моделирование процессов самоочищения и рассеивания ЗВ атмосферой. Известно, что на качество атмосферного воздуха (АВ) влияют не только объемы промышленных выбросов ЗВ, но и технические характеристики источников выбросов, планировка населенных пунктов, физико-химические процессы, метеорологические и топографические условия, климатообразующие и орографические факторы, которые способствуют эффективному рассеиванию ЗВ или их накоплению в околосредних слоях АВ [6, 8-17]. На рис. 5 представлена онтология факторов, влияющих на ССА.

Самоочищение атмосферы в приземном слое определено комплексным воздействием процессов: поступление ЗВ, их виды и объемы; физические процессы (перенос ЗВ и рассеивание за счет адвекции (горизонтального перемещения) и конвекции (вертикального движения) воздушных масс, оседание под действием гравитации); химические и фотохимические реакции (преобразование ЗВ под воздействием солнечной радиации, кислорода, атмосферных окислителей); температурная стратификация; вымывание ЗВ осадками и туманами, адсорбция их подстилающей поверхностью [8, 13, 15-19]. Влияние температурной стратификации на ССА неоднозначно. Самой неблагоприятной для рассеивания ЗВ является инверсия, но приподнятая инверсия может повышать ССА, если источник ЗВ расположен выше ее нижней границы [6]. Таким образом, скорость и интенсивность протекания перечисленных процессов в значительной степени зависят от ССА, объемов и вида примесей, от технических характеристик источников выбросов, климатических и метеорологических факторов [9-14, 20, 21]. По мнению В.В. Крючкова (1979), при сочетании средней годовой скорости ветра менее 3 м/с, повторяемости штилей более 50 %, характеризующих застойные явления, и наименьшей суммы осадков (менее 300 мм) самоочищения атмосферы практически не происходит [20]. Ее самоочищение начинает проявляться с усилением скорости ветра, уменьшением повторяемости штилей и повышением количества осадков. В городских условиях на рассеивание ЗВ значительно влияют планировка улиц, их направление и ширина, высота зданий. Распространению ЗВ способствуют вертикальные упорядоченные движения, вызванные неоднородностью подстилающей поверхности [11]: так, поверхностям на крутых склонах и возвышенностях присуща средняя ССА, а территория долин межгорных понижений и рек характеризуется повышенным уровнем загрязнения АВ [22]. В сибирских территориально-промышленных центрах зимой при антициклональном типе погоды часто формируется «остров тепла», с устойчивым потоком АВ к центру «острова», в результате чего ЗВ концентрируется преимущественно именно в нём [6, 8].

2. Количественные оценки способности атмосферы к самоочищению или загрязнению. Существует множество математических моделей определения потенциала загрязнения АВ, но, поскольку Росгидромет не проводит оперативные замеры всех параметров, используемых этими моделями, максимальное распространение обрели методики, которые используют общедоступные метеорологические параметры и без затруднений адаптируются к любой территории [11].

Среднегодовые метеорологические показатели загрязнения атмосферы (МПЗА, МПЗА2, МПЗА3, усовершенствованный УМПА) и показатель самоочищения атмосферы (ПСА, 1/МПЗА) Иркутска, Ангарска, Братска за период с 2010 по 2023 годы вычислялись по данным сайта [22] в созданной БД (СУБД MySQL). Объем обработанных метеорологических данных (строк в базе) составил для Ангарска – 33825, Братска – 40849, Иркутска – 40851. Среднегодовые значения исследуемых показателей находились в среднеинтегральном смысле, то есть в виде отношения накопленной суммы наблюдений соответствующих событий за все месяцы года к общему числу измерений в рассматриваемом году. Среднемесячные значения показателей также вычислялись в среднеинтегральном смысле, как отношение накопленной суммы наблюдений соответствующих событий за рассматриваемый месяц разных годов к общему числу измерений за это же время наблюдений.

Расчетные формулы показателей оценки процессов загрязнения и рассеивания ЗВ атмосферой представлены в таблице 2. Обозначено: частота наблюдения осадков более 0,5 мм – P_o , не менее 10 мм – $P_{o \geq 10}$; частота наблюдения относительной влажности АВ не более 30% – $P_{вл \leq 30}$, не менее 80% – $P_{вл \geq 80}$; P_r – частота наблюдения грозы; частота случаев скоростей ветра не менее 6 м/с – P_v ; частота штиля при слабом ветре не более 1 м/с – $P_{ш}$; K_t – коэффициент теплообеспеченности года; K_v – годовой коэффициент ветра; K_o – годовой коэффициент осадков.

Таблица 2. Расчетные формулы показателей

Формула показателя	Интервал	Характеристика ССА	Ис-точ-ник
Модели оценки метеорологического потенциала загрязнения атмосферы (МПЗА)			
$МПЗА = \frac{P_{ш} + P_r}{P_o + P_v}$	$МПЗА < 0,8$	хорошие условия для рассеивания ЗВ	[10]
	$0,8 \leq МПЗА < 1,2$	зона риска, где равны вероятности накопления ЗВ и рассеивания ЗВ	
	$1,2 \leq МПЗА < 2,4$	неблагоприятные условия для рассеивания ЗВ	
	$МПЗА \geq 2,4$	крайне неблагоприятные условия для рассеивания ЗВ	
$МПЗА2 = \frac{P_{ш} + P_r + P_{вл \geq 80}}{P_o + P_v + P_r}$	$МПЗА2 < 0,8$	хорошие условия для рассеивания ЗВ	[24]
	$МПЗА2 = 0,8 - 1,0$	преобладают процессы накопления ЗВ или с одинаковой частотой идут процессы рассеивания и накопления ЗВ	
	$МПЗА2 = 1,0 - 1,2$	с равной частотой идут процессы накопления и рассеивания ЗВ или преобладают процессы накопления ЗВ	
	$МПЗА2 > 1,2$	преобладают процессы накопления ЗВ	

$\text{МПЗА3} = \frac{P_{\text{ш}} + P_{\text{т}} + P_{\text{вл}\geq 80} + P_{\text{вл}\leq 30}}{P_{\text{о}} + P_{\text{в}} + P_{\text{г}} + P_{\text{о}\geq 10\text{мм}}}$	Idem МПЗА2	Idem МПЗА2	[24]
Модели оценки потенциала самоочищения атмосферы (ПСА, 1/МПЗА, УМПА)			
$\text{ПСА} = \frac{P_{\text{о}} + P_{\text{в}} - P_{\text{о}}P_{\text{в}}}{P_{\text{ш}} + P_{\text{т}} - P_{\text{ш}}P_{\text{т}/\text{ш}}}$	Не указан		[11]
$1/\text{МПЗА} = \frac{P_{\text{о}} + P_{\text{в}}}{P_{\text{ш}} + P_{\text{т}}}$	$1/\text{МПЗА} > 1,25$	хорошие условия для рассеяния ЗВ	Определено из интервала МПЗА
	$0,83 \leq \frac{1}{\text{МПЗА}} < 1,25$	зона риска, где равны вероятности накопления ЗВ и рассеивания ЗВ	
	$0,42 < 1/\text{МПЗА} < 0,83$	неблагоприятные условия для рассеяния ЗВ	
	$1/\text{МПЗА} \leq 0,42$	крайне неблагоприятные условия для рассеяния ЗВ	
Усовершенствованный метеорологический показатель рассеивающей способности атмосферы $\text{УМПА} = K_t + K_v + K_o = \exp(0,176t_{cp}) + \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{ш}}} + \frac{O_{\text{г}}}{400}$	$\text{УМПА} < 2$	крайне неблагоприятными условиями рассеивания ЗВ	[25]
	$2 \leq \text{УМПА} < 3$	неблагоприятные условия для рассеивания ЗВ	
	$\text{УМПА} \geq 3$	благоприятные условия для рассеивания ЗВ	

В таблицах 3-5 приведены значения параметров показателей из табл. 2 для рассматриваемых городов.

Таблица 3. Значение параметров показателей, указанных в табл. 2, для г. Ангарск

Год	$P_{\text{ш}}$	$P_{\text{в}}$	$P_{\text{о}}$	$P_{\text{т}}$	$P_{\text{т}/\text{ш}}$	$P_{\text{вл}\geq 80}$	$P_{\text{г}}$	$P_{\text{вл}\leq 30}$	$P_{\text{о}\geq 10}$	K_t	K_o	K_v
2010	0,4421	0,0186	0,6293	0,077	0,006	0,42	0,099	0,029	0,129	1,084	1,246	0,042
2011	0,5233	0,009	0,6304	0,117	0,008	0,491	0,073	0,038	0,08	1,194	0,941	0,017
2012	0,5613	0,0099	0,4641	0,078	0,006	0,537	0,096	0,02	0,059	0,783	1,261	0,018
2013	0,4655	0,0091	0,2197	0,031	0,002	0,507	0,078	0,043	0,013	0,717	0,412	0,020
2014	0,5278	0,0075	0,2548	0,101	0,007	0,47	0,091	0,047	0,036	1,066	0,931	0,014
2015	0,4620	0,0072	0,2251	0,012	0,001	0,376	0,096	0,09	0,016	1,07	0,337	0,016
2017	0,5970	0,0067	0,4762	0,019	0,002	0,449	0	0,002	0	0,957	0,158	0,011
2018	0,5221	0,0057	0,3104	0,069	0,005	0,323	0,079	0,047	0,014	1,021	0,888	0,011
2019	0,5409	0,0043	0,259	0,132	0,009	0,38	0,079	0,076	0,03	1,115	1,264	0,008
2020	0,5217	0,0045	0,2896	0,092	0,006	0,416	0,107	0,059	0,041	1,293	1,465	0,009
2021	0,5375	0,0052	0,3233	0,056	0,004	0,452	0,019	0,031	0,058	1,057	1,690	0,010
2022	0,5716	0,0047	0,2707	0,076	0,005	0,488	0,101	0,053	0,022	0,979	0,908	0,008
2023	0,6292	0,0021	0,2727	0,083	0,003	0,456	0,021	0,025	0,034	1,201	0,295	0,003

Таблица 4. Значение параметров показателей, указанных в табл. 2, для г. Братск

Год	$P_{\text{ш}}$	$P_{\text{в}}$	$P_{\text{о}}$	$P_{\text{т}}$	$P_{\text{т}/\text{ш}}$	$P_{\text{вл}\geq 80}$	$P_{\text{г}}$	$P_{\text{вл}\leq 30}$	$P_{\text{о}\geq 10}$	K_t	K_o	K_v
2010	0,4615	0,0513	0,4905	0,031	0,003	0,496	0,070	0,002	0,034	0,651	1,020	0,111
2011	0,4954	0,0348	0,4907	0,072	0,006	0,474	0,076	0,003	0	1,118	0,611	0,07
2012	0,5069	0,0255	0,4982	0,092	0,009	0,545	0,112	0,009	0,025	0,792	1,026	0,05
2013	0,4416	0,063	0,3507	0,036	0,003	0,494	0,090	0,002	0,005	0,997	0,777	0,143
2014	0,4137	0,0555	0,3104	0,03	0,003	0,405	0,110	0,007	0,008	1,123	0,914	0,134
2015	0,3505	0,0666	0,3022	0,043	0,004	0,419	0,091	0,012	0,019	1,444	0,966	0,19

2016	0,4856	0,0239	0,2978	0,087	0,008	0,449	0,065	0,015	0,008	1,022	0,684	0,049
2017	0,5310	0,0247	0,3342	0,052	0,004	0,451	0,072	0,018	0,019	1,201	1,018	0,046
2018	0,5666	0,0212	0,3205	0,038	0,003	0,373	0,087	0,011	0,022	0,945	1,001	0,037
2019	0,5631	0,0226	0,2904	0,07	0,006	0,358	0,103	0,022	0,025	1,129	0,948	0,04
2020	0,5167	0,029	0,3415	0,029	0,003	0,335	0,116	0,039	0,016	1,438	1,025	0,056
2021	0,5450	0,025	0,3233	0,046	0,004	0,276	0,073	0,016	0,014	1,007	0,707	0,046
2022	0,5739	0,0158	0,3671	0,041	0,004	0,386	0,110	0,027	0,036	1,024	1,282	0,027
2023	0,5890	0,0274	0,2986	0,051	0,005	0,382	0,087	0,021	0,014	1,129	0,735	0,047

Таблица 5. Значение параметров показателей, указанных в табл. 2, для г. Иркутск

Год	$P_{ш}$	$P_{в}$	$P_{о}$	$P_{т}$	$P_{т/ш}$	$P_{вл \geq 80}$	$P_{г}$	$P_{вл \leq 30}$	$P_{о \geq 10}$	K_t	K_o	K_v
2010	0,3386	0,0121	0,5155	0,109	0,01	0,359	0,062	0,03	0,046	0,948	0,970	0,036
2011	0,3743	0,012	0,5562	0,146	0,011	0,436	0,059	0,05	0,067	1,293	1,052	0,032
2012	0,4105	0,0145	0,427	0,123	0,011	0,465	0,061	0,033	0,045	1,040	1,191	0,035
2013	0,3395	0,011	0,2658	0,119	0,01	0,42	0,099	0,034	0,025	1,325	0,824	0,032
2014	0,3755	0,014	0,2795	0,156	0,012	0,427	0,08	0,044	0,038	1,430	1,001	0,037
2015	0,4049	0,0075	0,25	0,143	0,012	0,394	0,102	0,055	0,027	1,737	0,967	0,019
2016	0,5193	0,0034	0,2596	0,117	0,011	0,355	0,062	0,06	0,041	1,299	1,484	0,007
2017	0,4743	0,0038	0,3041	0,051	0,004	0,36	0,064	0,055	0,022	1,607	1,063	0,008
2018	0,4438	0,0045	0,3151	0,095	0,008	0,331	0,095	0,034	0,027	1,264	1,179	0,01
2019	0,4728	0,0051	0,2658	0,096	0,007	0,286	0,11	0,055	0,038	1,483	1,188	0,011
2020	0,4628	0,0034	0,2951	0,063	0,005	0,286	0,131	0,061	0,036	1,651	1,396	0,007
2021	0,461	0,0058	0,3123	0,107	0,008	0,28	0,06	0,041	0,044	1,339	1,484	0,013
2022	0,5687	0,0024	0,2822	0,108	0,009	0,291	0,087	0,049	0,027	1,412	0,967	0,004
2023	0,5176	0,0038	0,3178	0,127	0,01	0,223	0,096	0,065	0,049	1,404	1,499	0,007

При обработке измерений полагали, что к состоянию штиля относится и состояние слабого ветра, скорость которого не превышает 1 м/с, т.е. в моделях заменяли его на более значимый $P_{ш}$. На рис. 6-9 показана динамика годовых показателей загрязнения АВ рассматриваемых городов ЗВ. За 2016 г. по г. Ангарск не приведены данные по осадкам, поэтому на рис. 7 имеется пропуск.

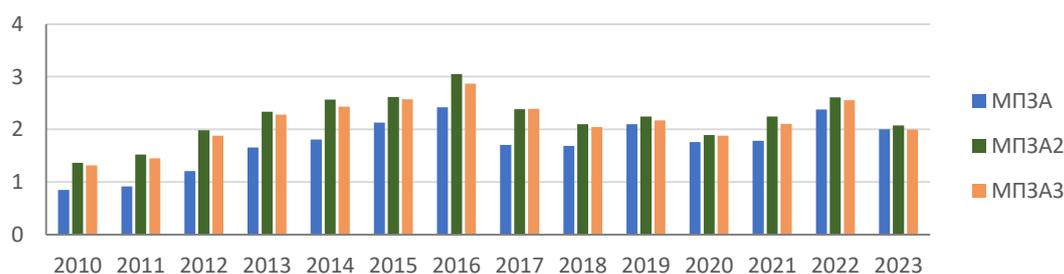


Рис. 6. Динамика показателей загрязнения АВ загрязнителями в г. Иркутск

Как видно из рис. 6-8, что, начиная с 2012 г., значения МПЗА, МПЗА2, МПЗА3 превышают 0,8, что свидетельствует об отсутствии благоприятных условий для рассеивания ЗВ. Наблюдается также близость значений МПЗА2 и МПЗА3 для всех рассматриваемых городов. Поэтому можно при исследовании использовать более простой показатель МПЗА2 [23].

Оценим степень близости показателей по регрессии:

$$\text{МПЗА2} = a + b\text{МПЗА3} \quad (1)$$

Регрессии получали в пакете Statgraphics Plus. Об адекватности регрессий судили по критерию: коэффициенту детерминации R^2 , который иллюстрирует процент рассчитанных данных,

описываемых регрессией; скорректированному коэффициенту детерминации R_c^2 , используемый для оценки тесноты связи между зависимой и независимой переменными; отсутствие автокорреляции устанавливали по коэффициенту Дарбина-Уотсона (ДУ), точность регрессии устанавливали по абсолютной (Δ) и среднеквадратической (σ^2) ошибкам.

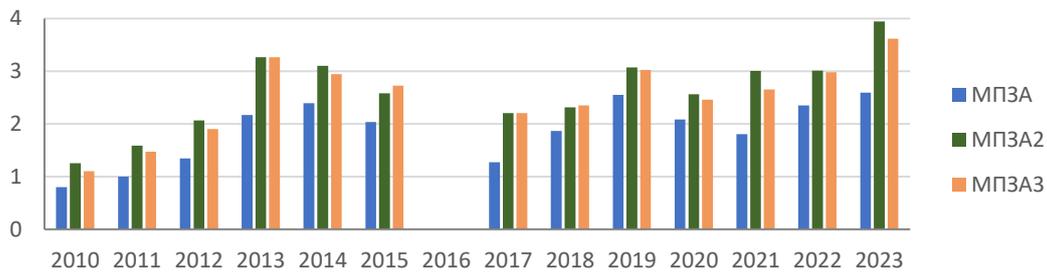


Рис. 7. Динамика показателей загрязнения АВ загрязнителями в г. Ангарск

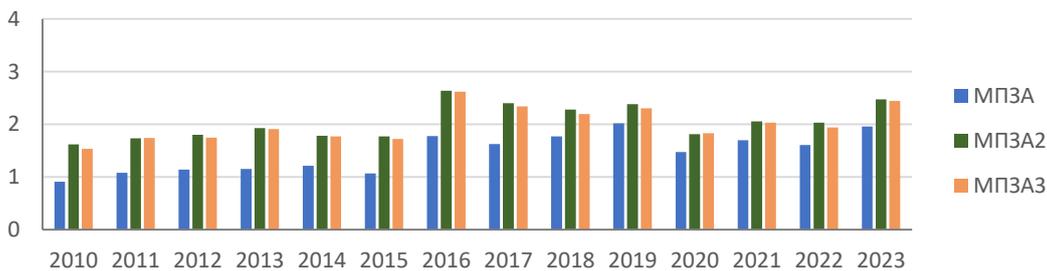


Рис. 8. Динамика показателей загрязнения АВ загрязнителями в г. Братск

Критерии адекватности модели (1) и значения параметров регрессии приведены в табл. 6.

Таблица 6. Критерии адекватности модели (1)

Город	a	b	$R^2, \%$	$R_c^2, \%$	ДУ	σ^2	Δ
Ангарск	-0,1740	1,0018	99,9877	99,9866	1,9113	0,1568	0,1186
Братск	0,3302	0,8594	95,7926	95,4689	2,1632	0,1476	0,088
Иркутск	0,0693	0,9202	99,3949	99,3484	1,8081	0,0567	0,0405

На рис. 9, в качестве примера, представлена модель (1) для г. Иркутск. Видно, что в 99,4% случаев действительно можно для расчета загрязнения атмосферы использовать показатель МПЗА2 и не учитывать используемые в МПЗА3 параметры, редкие в условиях резко континентального климата Восточной Сибири событий $P_{вл \leq 30}$ и $P_{o \geq 10}$, т.к. в суммарном объёме их влияние на показатель мало. Для регионов с преимущественно сухим климатом, либо с регулярными и существенными осадками (полупустынный, горный, мягкий и умеренно континентальный, муссонный) события $P_{вл \leq 30}$ и $P_{o \geq 10}$ получают более весомую числовую оценку, и тогда показатель МПЗА3, скорей всего, получит более респектабельную значимость по сравнению с МПЗА2.

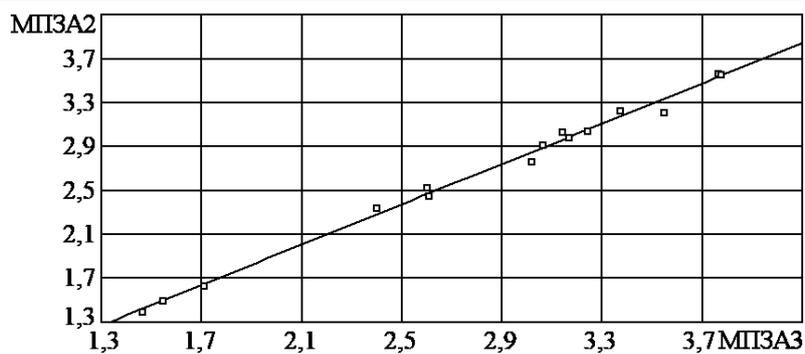


Рис. 9. Модель (1) для г. Иркутск

На рис. 10, 11 представлены динамика среднемесячных значений показателей ПСА, 1/МПЗА для рассматриваемых городов соответственно.

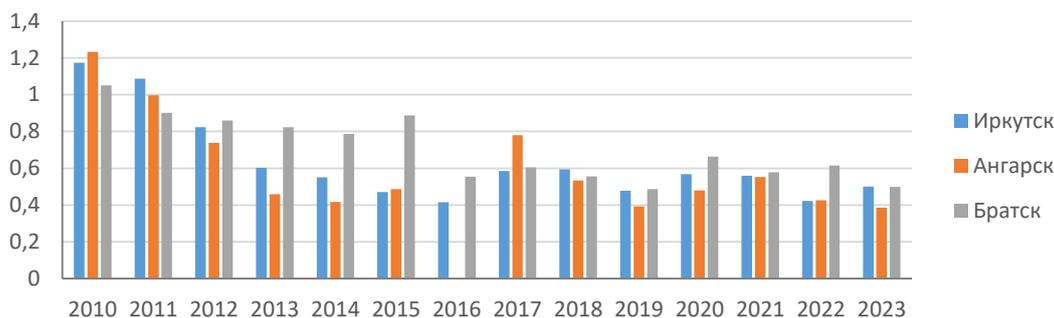


Рис. 10. Динамика показателей ПСА городов

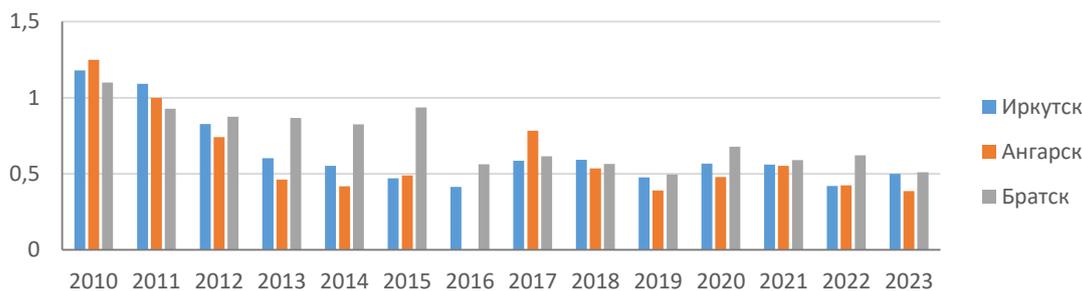


Рис. 11. Динамика показателя 1/МПЗА городов

На рис. 12 представлена динамика показателя УМПА городов.

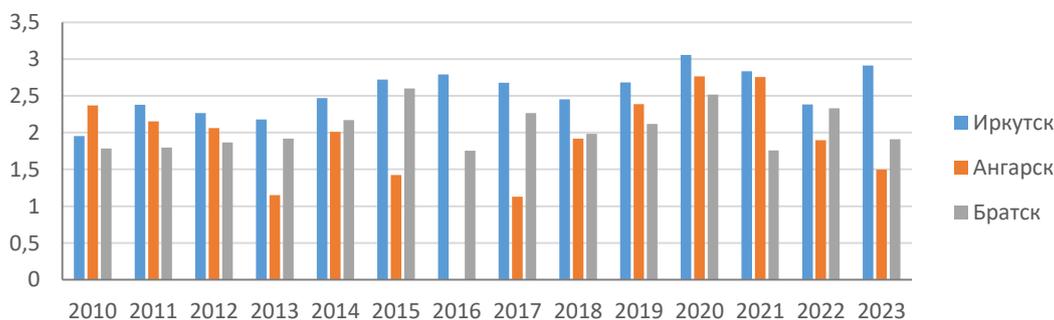


Рис. 12. Динамика показателя УМПА городов

Из сопоставления рис. 10 и 12 видно, что УМПА характеризуется более высокими значениями, чем ПСА, так как УМПА учитывает влияние:

- коэффициента теплообеспеченности K_t , который характеризует продолжительность холодного периода года по сравнению с теплым периодом. Если $K_t < 1$, то продолжительность холодного периода преобладает над продолжительностью теплого. Если $K_t > 1$, то

теплый период продолжительнее холодного. Чем меньше значение K_t , тем хуже условия для рассеивания ЗВ [24];

- отношения годовой суммы осадков O_r , мм к норме количества осадков, необходимых для очищения атмосферы (400 мм).

В табл. 7 указаны среднегодовые значения параметров, определяющих УМПА, % по городам.

Из табл. 7 следует, что в 85,71% случаев в Иркутске складывается неблагоприятные условия для рассеивания ЗВ, обусловленные малым значением коэффициента K_t и осадками менее 1 мм, что не способствует выносу ЗВ из города и их рассеиванию. При этом наблюдалась частая повторяемость штилей (см. таблицу 5), которые приводят к застойным ситуациям и увеличению загрязнения атмосферы.

Таблица 7. Среднегодовые значения параметров, определяющих УМПА, % по городам

Условия для рассеивания ЗВ	Диапазон параметров	Ангарск,%	Братск,%	Иркутск,%
крайне неблагоприятные	УМПА < 2	46,15	57,14	7,14
	$K_t < 0,3$	0	0	0
	$K_v < 0,5$	100	100	100
	$K_o < 0,5$	30,77	0	0
неблагоприятные:	$2 \leq \text{УМПА} < 3$	53,85	42,86	85,71
	$0,3 \leq K_t \leq 1$	30,77	28,57	7,14
	$0,3 < K_v < 1$	0	0	0
	$0,5 \leq K_o < 1$	30,77	57,14	28,57
благоприятные	УМПА ≥ 3	0	0	7,14
	$K_t > 1$	69,23	71,43	92,86
	$K_v \geq 1$	0	0	0
	$K_o \geq 1$	38,46	42,86	71,43

Что касается Ангарска и Братска, то в этих городах благоприятных значений K_v для рассеивания ЗВ нет. В рассматриваемых городах значение K_v мало (не превышает 0,19), что не способствует рассеиванию ЗВ. Видно, что в рассматриваемых городах характер ССА – неустойчивый, наблюдается процесс снижения способности очищения АВ. С 2018 г. в Ангарске более низкий уровень ССА по сравнению с Иркутском и Братском.

Рис. 10 и 11 свидетельствуют, что значения ПСА и 1/МПЗА достаточно близки. В работе [11] предлагается использовать вместо показателя ПСА величину 1/МПЗА, в формулу расчета которой входит меньшее число параметров. Проверим эту возможность на модели регрессии (2):

$$\text{ПСА} = a + b(1/\text{МПЗА}). \quad (2)$$

Критерии адекватности модели (2) и значения параметров регрессии приведены в табл. 4. На рис. 13, в качестве примера, представлена модель (2) для г. Ангарск. Видно, что в 99,99% случаев действительно можно для расчета ССА использовать вместо показателя ПСА более простой показатель 1/МПЗА, вычисляя который, просто следует поменять местами знаменатель и числитель в МПЗА.

Таблица 4. Критерии адекватности модели (2)

Город	a	b	$R^2, \%$	$R^2_c, \%$	ДУ	σ^2	Δ
Ангарск	0,0015	0,9976	99,9906	99,9897	1,8585	0,0036	0,0025
Братск	0,0075	0,9825	99,8692	99,8591	1,2835	0,0096	0,0066
Иркутск	-0,0002	1,0039	99,9955	99,9952	1,9070	0,0026	0,0019

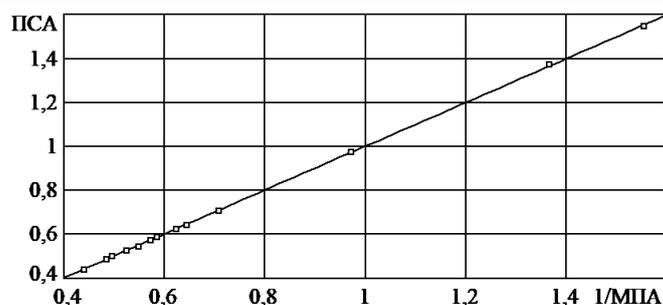


Рис. 13. Модель (2)

На рис. 14 приведены среднемесячные показатели МПЗА по городам.

В зимний и осенний периоды времени более высокие значения МПЗА (неблагоприятные условия для рассеивания ЗВ) в Ангарске, что объясняется большими значениями вероятности штиля и меньшими значениями вероятности осадков, чем в Иркутске и Братске. Лишь в ноябре и декабре в Братске, в мае в Иркутске и Ангарске процессы способствуют самоочищению атмосферы от ЗВ благодаря увеличению частоты P_v (МПЗА < 1).

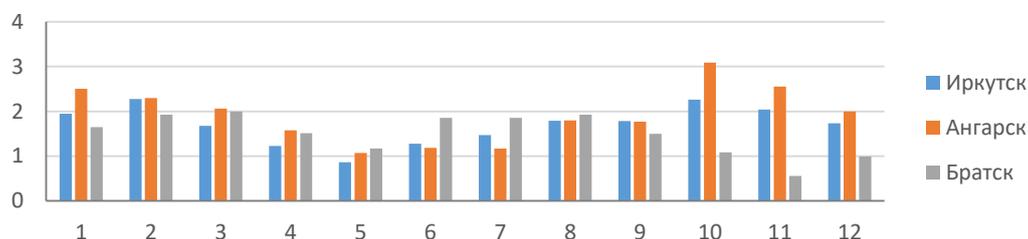


Рис. 14. Среднемесячные показатели МПЗА по городам

Заключение. Анализ полученных результатов показывает неутешительную статистику по чистоте атмосферы в городах ИО. С одной стороны, усиливается техногенное давление на атмосферные процессы, так как, по данным [25], индекс промышленного производства по Иркутской области с 2010 г. устойчиво держится свыше 100 %. С другой стороны, выявлено, что ослабевают ССА. Последнее подтверждается исследованиями [11]. Такие выводы актуализируют развитие экологически чистых технологий и экологических природовосстановительных программ.

Список источников

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2022 году». – Иркутск: ООО «Максима», 2023. – 285 с.
2. Распоряжение Правительства РФ № 1852-р от 07.07.2022. Дата введения 01.09.2023.
3. Асламова В.С. Регрессионные модели оценки комплексного техногенного загрязнения атмосферы городов Иркутского региона / В.С. Асламова, О.В. Плеханова, А.А. Асламов // Математические методы в технологиях и технике, 2023. – № 8. – С. 62-65.
4. Асламова В.С. Регрессионные модели оценки атмосферных выбросов загрязняющих веществ в городах Братск и Черемхово / В.С. Асламова, О.В. Плеханова, А.А. Асламов // Математические методы в технологиях и технике, 2023. – № 11. – С. 80-83.
5. Асламова В.С. Регрессионные модели оценки атмосферных выбросов загрязняющих веществ в городах Иркутск и Ангарск / В.С. Асламова, О.В. Плеханова, А.А. Асламов // Образование - наука - производство. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Чита, 2023. – С. 212-217.
6. РД 52.04.667-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. Дата введения 2006.02.01.
7. Город Братск – участник национального проекта «Экология» федерального проекта «Чистый воздух». – URL: <https://www.irmeteo.ru/index.php?id=424> (дата обращения: 10.03.2024).

8. Асламова В.С. Онтологическое моделирование предметной области «антропогенное загрязнение атмосферного воздуха» / В.С. Асламова, О.С. Плеханова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 1 (33). – С. 40-49. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.004.
9. Селегей Т.С. Потенциал рассеивающей способности атмосферы / Т.С. Селегей, И.П. Юрченко // География и природные ресурсы, 1990. – № 2. – С. 132-137.
10. Селегей Т.С. О методике определения метеорологического потенциала загрязнения атмосферы / Т.С. Селегей, Н.Н. Филоненко, Т.Н. Ленковская // Оптика атмосферы и океана, 2015. – Т. 28. – № 8. – С. 725-729. – DOI:10.15372/AOO20150808.
11. Аргучинцева А.В. Потенциал самоочищения атмосферы / А.В. Аргучинцева, Е.А. Кочугова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле, 2019. – Т. 27. – С. 3-15.
12. Шагидуллин А.Р. Динамика уровней загрязнения основными газовыми примесями и показателей рассеивающей способности атмосферного воздуха в г. Казани / А.Р. Шагидуллин // Системы контроля окружающей среды, 2022. – № 2 (48). – С. 84-91.
13. Осипова О.П. Метеорологический потенциал рассеивающей способности атмосферы / О.П. Осипова // География и природные ресурсы, 2020. – № 1. – С. 185-190.
14. Аргучинцева А.В. Климатические особенности рассеивающей способности атмосферы в котловине озера Байкал / А.В. Аргучинцева, С.Ж. Воложжина // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле, 2010. – Том 3. – № 1. – С. 3-17.
15. Корытный Л.М. Природно-климатические факторы экологической безопасности в контексте социально-экономического развития Байкальского региона / Л.М. Корытный, Л.Б. Башалханова, В.Н. Веселова и др. // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле, 2018. – Т. 25. – С. 88-106. – DOI:10.26516/2073-3402.2018.25.88.
16. Хаширова Т.Ю. Моделирование загрязненности атмосферного воздуха / Т.Ю. Хаширова, Г.А. Акбашева, О.А. Шакова, Е.А. Акбашева // Фундаментальные исследования, 2017. – № 8. – С. 325-330.
17. Miao Y, Zhang G, Li X., Xue C. Editorial: Physical and chemical processes within the planetary boundary layer and their impacts on air pollution. *Front. Environ. Sci.*, 2023, DOI:10.3389/fenvs.2023.1221546.
18. Рассеивание примесей в атмосфере. – URL: <https://ecoproverka.ru/rasseivanie-primesej-v-atmosfere/> (дата обращения: 14.04.2024).
19. Велиева Н.А. Очистка атмосферы от выбросов / Н.А. Велиева // Современные научные исследования и инновации, 2021. – № 11. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/11/97040> (дата обращения: 03.06.2024).
20. Крючков В.В. Природа и человек / В.В. Крючков. – М.: Наука, 1979. – 127 с.
21. Ахтиманкина А.В. Исследование рассеивающей способности атмосферы Иркутской области / А.В. Ахтиманкина // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле, 2016. – Т. 15. – С. 15-27.
22. Сайт ООО «Расписание Погоды». – URL: <https://rp5.ru>.
23. Трофимец Л.Н. Метеорологический потенциал в изменяющихся условиях увлажнения / Л.Н. Трофимец, А.В. Тарасов // Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: естественные, технические и медицинские науки, 2009. – № 2. – С. 168-175.
24. Отчет о НИР 1.4.3.15 ФБГУ СибНИГМИ, рук. Селегей Т.С., Новосибирск, 2014. – 132 с.
25. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области. Промышленное производство. – URL: <https://38.rosstat.gov.ru/folder/169004> (дата обращения: 22.06.2024).

Плеханова Ольга Сергеевна. Соискатель, ассистент кафедры Информационные системы и защита информации Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), AuthorID: 641329, SPIN: 2708-5758, ORCID: 0000-0001-6297-8870, plekhanova_os@bk.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.

Асламова Вера Сергеевна. Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры Техносферная безопасность Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), AuthorID:683194, SPIN: 3063-0626, ORCID: 0000-0003-3306-0651, aslamovav@yandex.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.

Асламов Александр Анатольевич. Доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры Машины и аппараты химических производств Ангарского государственного технического университета, AuthorID:504134, SPIN:7550-9381, ORCID: 0009-0009-6548-8848, aaa_mx@angtu.ru.

UDC 504.3: (519.25)

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.013

Processing statistics of meteorological data to assess the potential for air pollution by anthropogenic emissions in the cities of Angarsk, Bratsk, Irkutsk

Olga S. Plekhanova¹, Vera S. Aslamova¹, Alexander A. Aslamov²

¹Irkutsk state transport university,

Irkutsk, Russia, *aslamovav@yandex.ru*

²Angarsk state technical university, Angarsk, Russia

Abstract. The article developed an ontology of the self-cleaning ability of the atmosphere from anthropogenic pollutants and identified the influence of significant factors on it. According to the website <https://rp5.ru> in the created database in the My SQL DBMS the average annual and average monthly values of meteorological indicators of accumulation of MPZA, MPZA2, MPZA3, and self-purification of the atmosphere PSA, UMPA were calculated and analyzed for the large industrial cities of Angarsk, Bratsk, Irkutsk with a high level of air pollution for 2010-2023. It has been shown that with a determination coefficient of 95.8-99.9%, instead of the MPZA3 indicator, the simpler MPZA2 indicator can be used, and instead of the difficult-to-calculate PSA indicator, the 1/MPZA indicator can be used. In Irkutsk in May, only in 7.1% of cases are favorable conditions for the dispersion of pollution formed in the atmosphere, while in Angarsk and Bratsk there are no favorable conditions for their dispersion.

Keywords: meteorological potential of air pollution, ontology of factors, regression model

References

1. Gosudarstvennyj doklad "O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy Irkutskoj oblasti v 2022 godu" [State report "On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2022"], Irkutsk: Maxima LLC, 2023, 285 p.
2. Rasporyazheniye pravitel'stva RF № 1852-r ot 07.07.2022. Data vvedeniya 01.09.2023. [Order of the Government of the Russian Federation No. 1852-r of 07.07.2022. Date of introduction: 01.09.2023.]
3. Aslamova V.S., Plekhanova O.S., Aslamov A.A. Regressionnyye modeli otsenki kompleksnogo tekhnogenogo zagryazneniya atmosfery gorodov Irkutskogo regiona [Regression models for assessing complex technogenic atmospheric pollution in cities of the Irkutsk region]. *Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and engineering], 2023, no. 8, pp. 62-65.
4. Aslamova V.S., Plekhanova O.S., Aslamov A.A. Regressionnyye modeli ocenki atmosferynyh vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v gorodah Bratsk i Cheremhovo [Regression models for assessing atmospheric emissions of pollutants in the cities of Bratsk and Cheremkhovo]. *Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and engineering], 2023, no. 11, pp. 80-83.
5. Aslamova V.S., Plekhanova O.V., Aslamov A.A. Regressionnyye modeli ocenki atmosferynyh vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v gorodah Irkutsk i Angarsk [Regression models for assessing atmospheric emissions of pollutants in the cities of Irkutsk and Angarsk]. *Obrazovanie - nauka - proizvodstvo. Materialy VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Education - science - production. Materials of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)], Chita, 2023, pp. 212-217.
6. RD 52.04.667-2005. Dokumenty o sostoyanii zagryazneniya atmosfery v gorodakh dlya informirovaniya gosudarstvennykh organov, obshchestvennosti i naseleniya. Obshchiye trebovaniya k razrabotke, postroyeniyu, izlozheniyu i soderzhaniyu [Documents on the state of air pollution in cities to inform government agencies, the public and the population. General requirements for development, construction, presentation and content]. Data vvedeniya 2006.02.01.
7. Gorod Bratsk – uchastnik nacional'nogo proekta "Ekologiya" federal'nogo proekta "Chistyj vozduh" [The city of Bratsk is a participant in the national project "Ecology" of the federal project "Clean Air"]. Available at: <https://www.irmeteo.ru/index.php?id=424> (accessed: 03/10/2024).
8. Aslamova V.S., Plekhanova O.S. Ontologicheskoe modelirovanie predmetnoj oblasti "antropogennoe zagryaznenie atmosfernogo vozduha" [Ontological modeling of the subject area "anthropogenic air pollution"]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 1 (33), pp. 40-49, DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.004.
9. Selegey T.S., Yurchenko I.P. Potentsial rasseivayushchey sposobnosti atmosfery [Potential of the scattering ability of the atmosphere]. *Geografiya i prirod. Resursy* [Geography and nature. Resources], 1990. no. 2, pp. 132-137.

10. Selegej T.S., Filonenko N.N., Lenkovskaya T.N. O metodike opredeleniya meteorologicheskogo potentsiala zagryazneniya atmosfery [On the methodology for determining the meteorological potential of atmospheric pollution]. Optika atmosfery i okeana [Atmosphere and ocean optics], 2015, vol. 28, no. 8, pp. 725-729, DOI: 10.15372/AOO20150808.
11. Arguchintseva A.V., Kochugova Ye.A. Potentsial samoochishcheniya atmosfery [Potential for self-purification of the atmosphere]. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle [News of Irkutsk state university. Series of earth sciences], 2019, vol. 27, pp. 3-15.
12. Shagidullin A.R. Dinamika urovnej zagryazneniya osnovnymi gazovymi primesyami i pokazatelej rasseivayushchej sposobnosti atmosfernogo vozduha v g. Kazani [Dynamics of pollution levels with the main gas impurities and indicators of the dispersive capacity of atmospheric air in the city of Kazan]. Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy [Environmental control systems], 2022, no. 2 (48), pp. 84-91.
13. Osipova O.P. Meteorologicheskij potentsial rasseivayushchej sposobnosti atmosfery [Meteorological potential of the dispersive capacity of the atmosphere]. Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources], 2020, no. 1, pp. 185-190.
14. Arguchinceva A.V., Vologzhina S.Zh. Klimaticheskie osobennosti rasseivayushchej sposobnosti atmosfery v kotlovine ozera Bajkal [Climatic features of the dispersive capacity of the atmosphere in the basin of Lake Baikal]. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle [News of Irkutsk state university. Series of earth sciences], 2010, vol. 3, no. 1, pp. 3-17.
15. Korytnyj L.M., Bashalhanova L.B., Veselova V.N. et al. Prirodno-klimaticheskie faktory ekologicheskoy bezopasnosti v kontekste social'no-ekonomicheskogo razvitiya Bajkal'skogo regiona [Natural and climatic factors of environmental safety in the context of socio-economic development of the Baikal region]. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle [News of Irkutsk state university. Series of earth sciences], 2018, vol. 25, pp. 88-106, DOI 10.26516/2073-3402.2018.25.88.
16. Hashirova T.Yu., Akbasheva G.A., Shakova O.A., Akbasheva E.A. Modelirovanie zagryaznennosti atmosfernogo vozduha [Modeling of atmospheric air pollution]. Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research], 2017, no. 8, pp. 325-330.
17. Miao Y, Zhang G, Li X., Xue C. Editorial: Physical and chemical processes within the planetary boundary layer and their impacts on air pollution. Front. Environ. Sci., 2023, DOI:10.3389/fenvs.2023.1221546.
18. Rasseivanie primesej v atmosphere [Dispersion of impurities in the atmosphere]. Available at: <https://ecoproverka.tnweb.ru/rasseivanie-primesej-v-atmosfere> (accessed: 04/14/2024).
19. Velieva N.A. Ochistka atmosfery ot vybrosov [Cleaning the atmosphere from emissions]. Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii [Modern scientific research and innovation], 2021, no. 11, available at: <https://web.snauka.ru/issues/2021/11/97040> (access: 06/03/2024).
20. Kryuchkov V.V. Priroda i chelovek [Nature and man]. Moscow, Nauka [Science], 1979, 127 p.
21. Ahtimankina A.V. Issledovanie rasseivayushchej sposobnosti atmosfery Irkutskoj oblasti [Study of the scattering ability of the atmosphere of the Irkutsk region]. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle [News of Irkutsk State University. Series of earth sciences], 2016, vol. 15, pp. 15-27.
22. Sajt OOO «Raspisanie Pogody» [Website of Weather Schedule LLC]. Available at: <https://rp5.ru>.
23. Trofimec L.N., Tarasov A.V. Meteorologicheskij potentsial v izmenyayushchihsya usloviyah uvlazhneniya [Meteorological potential in changing humidification conditions]. Uchenye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye, tekhnicheskie i medicinskie nauki [Scientific notes of the Oryol state university. Series: natural, technical and medical sciences], 2009, no. 2, pp. 168-175.
24. Research report 1.4.3.15 FBGU "SibNIGMI", director. Selegej T.S., Novosibirsk, 2014, 132 p.
25. Territorial'nyj organ Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki po Irkutskoj oblasti. Promyshlennoe proizvodstvo [Industrial production], available at: <https://38.rosstat.gov.ru/folder/169004> (accessed: 06/22/2024).

Plekhanova Olga Sergeevna. Applicant, assistant at the department of information systems and information security at the Irkutsk state university of transport and communications (IrGUPS), AuthorID: 641329, SPIN: 2708-5758, ORCID: 0000-0001-6297-8870, plekhanova_os@bk.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Aslamova Vera Sergeevna. Professor, doctor of technical sciences, professor of the department of technosphere safety at the Irkutsk state university of transport and communications (IrGUPS), AuthorID:683194, SPIN:3063-0626, ORCID: 0000-0003-3306-0651, aslamovav@yandex.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Aslamov Alexander Anatolyevich. Associate professor, candidate of technical sciences, associate professor of the department of machines and apparatuses for chemical production, Angarsk state technical university, AuthorID: 504134, SPIN: 7550-9381, ORCID: 0009-0009-6548-8848, aaa_mx@angtu.ru.

Статья поступила в редакцию 09.07.2024; одобрена после рецензирования 06.11.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 07/09/2024; approved after reviewing 11/06/2024; accepted for publication 12/17/2024.

УДК 004

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.014

Информационное проектирование инструментария для динамического когнитивного моделирования в энергетике

Козлов Максим Васильевич^{1,2}, Михеев Алексей Валерьевич¹

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

Иркутск, Россия, *max28k@gmail.com*

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация: Представлен обзор современного состояния в области динамического когнитивного (системного) моделирования и соответствующего программно-вычислительного инструментария для анализа разнородных факторов, влияющих на развитие сложных слабо формализованных систем в энергетике. Проанализированы существующие методы анализа многофакторных динамических систем, а также применение современных инструментов имитационного моделирования для проведения их качественного анализа. Получено представление о подходах к динамическому когнитивному моделированию в контексте его применения для анализа влияния комплексных факторов и оценки системных эффектов на научно-технологическое развитие в энергетике. Результаты исследования могут быть использованы как для разработки программно-вычислительного инструментария динамического когнитивного моделирования, так и для совершенствования подхода к анализу разнородных факторов, влияющих на развитие в энергетике в целом.

Ключевые слова: системный анализ, когнитивное моделирование, динамические когнитивные модели, системные динамические модели, комплексные сети

Цитирование: Козлов М.В. Информационное проектирование инструментария для динамического когнитивного моделирования в энергетике / М.В. Козлов, А.В. Михеев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 146-158. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.014.

Введение. В настоящее время мировые и региональные энергетические системы претерпевают существенную трансформацию, обобщенно называемую глобальным энергетическим переходом. Подобные изменения в формате 3D (цифровизация, децентрализация, декарбонизация) происходят с достаточно высокой скоростью, затрагивая не только энергетику, но и смежные области. Особую роль в этом сложном процессе занимает развитие энергетических технологий, на которое оказывает влияние множество разнородных и зачастую взаимосвязанных факторов – от технико-экономических до социально-политических [1]. Эти факторы могут как ускорять технологические изменения, так и создавать барьеры, препятствуя внедрению новых технологий. Часто требуется оценить не только ожидаемое повышение технико-экономической и экологической эффективности предлагаемых инноваций, но и выполнить оценку системных эффектов, то есть анализ воздействий от внедрения новых технологий на энергетику, экономику, социальную сферу и окружающую среду [2].

Для исследования и поиска возможных эффективных путей трансформации энергетических систем необходимо учитывать комплекс взаимосвязанных разнородных факторов, которые определяют направление, скорость и эффективность развития энергетических технологий в контексте социально-экономической, политической, технологической и природно-экологической среды [3]. Взаимосвязи между факторами формируют сложную динамическую систему, причем ее функционирование и взаимодействие с окружающим миром часто трудно формализовать в виде строгой математической модели.

Для подобных исследований, когда необходим учет сложных взаимосвязей, нелинейного характера изменений и взаимодействий, социальных поведенческих паттернов, стохастических переменных, временной композиции изменений как внутренних параметров системы, так и внешних условий, можно применить аппарат системного динамического

моделирования [4] и, как его расширение, динамическое когнитивное моделирование. Такой подход позволяет в понятной для исследователя форме осуществлять поиск решения комплексных задач системных исследований в энергетике – таких, как: прогнозирование долгосрочных трендов, идентификация барьеров и драйверов инноваций, определение возможных путей внедрения новых технологий, оценка системных эффектов от ожидаемых инноваций, анализ состояния и перспектив научно-технологического развития энергетики.

Предмет исследования предлагаемой статьи – это программный инструментарий и подходы к информационному проектированию для построения динамических когнитивных моделей, описывающих технологическую трансформацию энергетики. Цель исследования – повышение оперативности составления динамических когнитивных карт для проведения исследований в области развития энергетики.

Для этого выполнены:

1. Обзор современного состояния в области динамического когнитивного (системного) моделирования и соответствующего программно-вычислительного инструментария.
2. Разработка необходимых спецификаций информационной системы (типология и структура факторов, их базовые характеристики и механизмы влияния, входные и выходные данные и т.п.) для построения динамических когнитивных моделей системных факторов, влияющих на научно-технологическое развитие энергетики.
3. Разработка необходимых спецификаций информационных и программно-вычислительных компонентов технологии динамического когнитивного моделирования для исследований структуры и влияния разнородных факторов с обзором возможного применения в энергетике.

2. Анализ существующих подходов и методов исследования.

2.1. Подходы к исследованию влияния разнородных факторов на развитие энергетики. Развитие энергетики – достаточно сложный процесс, на который оказывается огромное влияние со стороны технико-экономических и социо-политических систем. Таким образом, изменения в любой из систем могут значительно повлиять на развитие энергетики и наоборот, значительные скачки в развитии энергетики могут оказать значительное влияние на остальные системы. [5]

Наглядно продемонстрировано влияние в исследовании внешних систем, формирующих энергетические переходы энергетического сектора Германии и Японии [6]. При этом подчеркивается важность того, что для объяснения и описания энергетических переходов необходимо учитывать развитие внешних систем.

В работе [7] представлен онтологический подход к построению структуры знаний предметных областей для исследования влияния функционирования объектов энергетики на окружающую среду и человека, построена онтологическая модель влияния тепловой электростанции на окружающую среду и человека. Аналогичные подходы используются в работах [8, 9] для описания взаимовлияния социальных и технико-экономических факторов в различных областях энергетики.

Стоит отметить, что онтологическое, когнитивное и событийное моделирование также применяется в исследовании устойчивости [10, 11] энергетических систем при взаимодействии с смежными внешними системами. Конечно, такие исследования содержат разнородные системные факторы, которые необходимо учесть в ходе исследований.

2.2. Применение системных динамических моделей для исследования сложных динамических систем. Подход, основанный на применении динамических когнитивных карт (ДКК), реализован в исследованиях различных областей энергетики, например, для выявления киберугроз в энергетическом секторе [12]. В работе оценивалась применимость

использования ДКК для выявления и оценки ущерба кибератак на отдельные области энергетики.

В [13] затрагивается влияние внедрения зеленых источников “чистой” энергии на развитие энергетики, на фоне необходимости уменьшения выбросов CO₂ в воздух. Автор в своей работе использует модель системной динамики, составленную путем внедрения в линейную модель развития энергетики нелинейных факторов, обусловленных значительным влиянием на процесс значительных изменений в обществе.

В [14] приведено использование подхода системной динамики для построения интегрированной модели для анализа поведения энергетического сектора в Австралии. Анализ показал, что расширение долгосрочных инвестиций в добычу газа в Австралии сопряжено с большими рисками, и уголь может стать единственным доступным ископаемым к 2032 году.

Еще одним примером исследования развития энергетики является системная динамическая модель прогнозирования потребностей центров обработки данных [15]. Предпосылкой к созданию модели является возрастающая потребность в электроэнергии, потребляемой ЦОД. Автор доказывает, что стандартное прогнозирование с использованием закона Мура является недостаточно точным, ввиду того что при прогнозировании не учитывается существенное влияние факторов извне.

В исследовании [16] приведена системная динамическая модель энергетического перехода в Германии. Модель позволяет проанализировать динамические взаимосвязи между углем, газом и возобновляемыми источниками энергии на энергетическом рынке, с целью определения подходящих стратегических решений для стимуляции потребления возобновляемых источников энергии.

Работа [17] иллюстрирует использование метода системной динамики для изучения и анализа динамических проблем устойчивости производства электроэнергии, в условиях энергетического перехода от старых технологий к новым. Автор предлагает подход поэтапного усложнения системной модели, путем добавления в неё факторов, описывающих неопределенность в исследовании.

Использование системного динамического моделирования в работе [18] было вызвано необходимостью в исследовании взаимодействия между энергетикой и экономикой, которое происходит в процессе энергетического перехода. Приведен обзор моделей энергетической экономики, иллюстрирующих динамику изменения факторов роста стоимости ресурсов для производства первичной энергии, краткосрочного распределения энергии и экономической стабильности.

В работе [19] был применен метод построения нечетких когнитивных карт, который способен выявлять взаимосвязи критических факторов, влияющих на энергетические переходы к вариантам биоэкономики. С помощью системной динамической модели было показано, что экономическое и энергетическое развитие региона находится в тесной взаимосвязи с множеством биологических, социальных и технологических факторов.

Также, подобный метод был применен в работе [20] для исследования энергетического перехода при внедрении на рынок источников фотоэлектрической солнечной энергии в Бразилии. Развитие энергетического сектора добычи фотоэлектрической энергии, по мнению автора, нуждается в эффективном управлении, учитывающем социально-экономические, экологические и политические условия страны, для поддержки принятия решений на всех уровнях управления.

Наглядным примером совмещения подходов системной динамики и когнитивного моделирования является исследование качества жизни Чусовского муниципального района [21]. Исследование качества жизни было представлено когнитивной моделью, параметры которой изменяются во времени. По результатам исследования выяснилось, что подобное

совмещение значительно расширяет возможности когнитивного моделирования при исследовании сложных динамических систем.

Исследование [22] посвящено применению нечетких реляционных когнитивных карт для проведения системного динамического анализа слабоструктурированных систем и процессов. Результатом исследования являются варианты решений по построению моделей развития энергетики, которые повышают точность прогнозирования.

2.3. Обзор программного инструментария для построения ДКК. Существует множество решений для анализа динамических систем, одним из которых является программный инструментарий DCoGMap, разработанный в ИСЭМ СО РАН. DCoGMap использовался для построения динамических когнитивных карт для исследования влияния похолодания на объекты энергетики [23].

Среди исследований сложных динамических систем также фигурирует программное средство CMSS [24]. CMSS основано на импульсном моделировании, при котором для модели, как системы взаимосвязанных факторов, задается возмущение с некоторыми параметрами. После запуска возмущения для одного из факторов, параметры остальных изменяются по predetermined пользователем сценарию.

Anylogic предоставляет огромный набор инструментов для имитационного и динамического системного моделирования различных сфер науки и бизнеса. При наличии навыков программирования, пользователь может самостоятельно вносить изменения в существующие библиотеки или разрабатывать свои собственные. [25, 26]

Программное средство FCM Expert [27] предоставляет возможность системного динамического моделирования сложных систем ТЭК. Ключевой особенностью инструментария является использование обученных моделей нейронных сетей для просчета показателей факторов.

Программное средство Insight Maker [28] – веб-инструмент для моделирования и симуляции общего назначения. Решение объединяет три общих подхода к моделированию – системную динамику, агентное моделирование и императивное программирование – в единую среду моделирования. Также описаны дополнительные возможности, такие, как создание сценариев моделирования и инструмент оптимизации (сравнение основных функциональных возможностей рассмотренных выше программных инструментов приведено в таблице 1).

Исходя из того, что все рассмотренные программные инструментарии были разработаны для своих сфер задач, было принято решение разработать собственный программный инструментарий, позволяющий строить динамические когнитивные карты и сценарии на их основе, для последующего анализа развития динамических систем.

2.4. Применение когнитивного и динамического когнитивного моделирования для исследования развития энергетики. Под когнитивным моделированием понимается построение когнитивных моделей, или, иначе, когнитивных карт (ориентированных графов), в которых вершины соответствуют факторам (концептам), а дуги – связям между факторами (положительным или отрицательным), в зависимости от характера причинно-следственного отношения. Так как развитие энергетики – это динамический процесс, который требует анализа на временном интервале, традиционное когнитивное моделирование не удовлетворяет всем требованиям, так как предназначено для исследования статических процессов.

Динамическая когнитивная карта (ДКК) отличается от обычной когнитивной карты тем, что представляет собой набор когнитивных карт, представленных в разные моменты времени:

$$\{D\} = \{D_{t_0}, D_{t_1} \dots D_{t_n}\},$$

где $\{D\}$ – множество динамических когнитивных карт, $\{D_{t_0}\}, \{D_{t_1}\}, \{D_{t_n}\}$ – множество когнитивных карт в моменты времени t_0, t_1, t_n .

Моделирование с помощью ДКК позволяет строить имитационные модели и проводить анализ развития энергетики на основе комплексной системы взаимосвязанных факторов.

Таблица 1. Сравнение основных функциональных возможностей программных инструментов

Функции	DCogMap	CMSS	Anylogic	FCM Expert	Insight Maker
Построение ДКК и проведение экспериментов					
Построение когнитивных карт	Есть	Есть	Да/Нет	Есть	Есть
Генерация сценариев	Есть	Есть	Нет	Есть	Нет
Настройка границ ключевых параметров факторов	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Экспорт сценариев	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
Импорт сценариев	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
Связь между факторами					
Весовые коэффициенты	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Математические формулы	Нет	Нет	Есть	Есть	Нет
Вероятностное распределение	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
Модели нейронных сетей	Нет	Нет	Нет	Есть	Нет

3. Проектирование программного обеспечения для динамического когнитивного моделирования. Необходимо спроектировать программный инструмент, позволяющий строить имитационные модели развития энергетики с использованием динамических когнитивных карт, проводить вычислительные эксперименты и генерировать сценарии для их дальнейшего применения в энергетических системных моделях.

3.1. Функциональные требования. Программный инструмент для построения динамических когнитивных карт должен предоставлять следующие возможности:

- **Разработка когнитивных карт.** Возможность построения когнитивных карт, т.е. определение ключевых факторов (концептов) и их взаимосвязей;
- **Настройка взаимосвязей между факторами.** Возможность установления связей между факторами следующих типов:
 1. Простой (линейная зависимость): влияние одного фактора на другой определяется через задание пользователем весовых коэффициентов;
 2. Выражение: взаимосвязь между факторами задается в виде произвольного математического выражения;
 3. Вероятностный: влияние одного фактора на другой определяется законом распределения, указанным пользователем.
- **Использование обученных моделей нейронных сетей.** Пересчет параметров всех ключевых факторов определяется с помощью конкретной модели нейронной сети.
- **Определение ключевых параметров и их изменение.** Для исследуемых факторов должна быть предоставлена возможность установления ключевых параметров, которые могут быть подвержены изменениям в соответствии с установленными пользователем условиями;
- **Определение временного горизонта для эксперимента.** Возможность установления границ временного горизонта для исследуемой динамической когнитивной карты и временного разрешения (шага по времени);
- **Генерация и экспорт сценариев.** Возможность экспорта и импорта сгенерированных сценариев для внешних подсистем, например, моделей систем энергетики для решения различных оптимизационных задач.

3.2. Нефункциональные требования

1. Программное обеспечение должно обеспечивать высокую производительность при построении динамических когнитивных карт и последовательном расчете ключевых параметров факторов с достаточно подробным шагом по времени.

2. Программное обеспечение должно быть совместимо с программными комплексами моделирования и оптимизации энергетических систем и топливно-энергетического комплекса, например, программный комплекс ИНТЭК [29], для возможности проведения исследований на сгенерированных сценариях.

3.3. Модель процесса генерации сценариев (ТО ВЕ). Исходя из имеющихся на данный момент требований к программному инструменту, построена модель процесса генерации сценариев (рисунок 1).

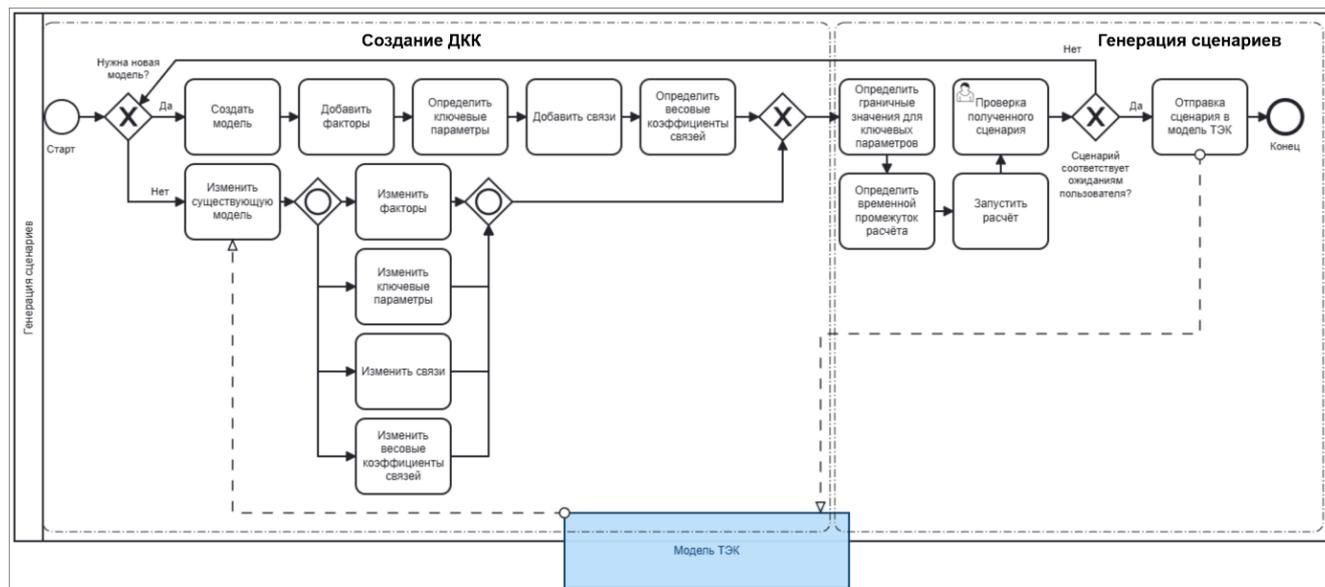


Рис. 1. Моделирование процесса генерации сценариев

Процесс «Генерация сценариев» делится на 2 основных подпроцесса: «Создание ДКК» и «Проведение эксперимента».

3.3.1. Модель подпроцесса «Создание ДКК». Создание динамических когнитивных карт – процесс, включающий следующие этапы:

- **Назначение факторов.** Факторы ДКК описывают субъективное представление участвующих субъектов в моделируемой ситуации, обозначая её структуру.
- **Определение ключевых параметров.** Для оценки факторов динамической когнитивной карты, описывающей субъективную модель ситуации, необходимо для каждого из факторов общей структуры определить показатели (ключевые параметры), которые будут изменяться в ходе проведения эксперимента и генерации сценариев.
- **Определение весов и типов связей между факторами.** Для формирования системы факторов модели определенной ситуации необходимо определить взаимосвязи между факторами: их тип и веса, в соответствии с функциональными требованиями.

3.3.2. Модель подпроцесса «Проведение эксперимента». Проведение эксперимента – подпроцесс, который представляет собой набор действий по настройке и запуску эксперимента, результатом которого является сценарий (набор ограничений для системы). Далее представлено описание подпроцессов проведения эксперимента:

- **Определение граничных значений ключевых параметров.** Процесс, при котором пользователь определяет диапазон возможных значений для каждого из ключевых параметров факторов.

- **Определение временного промежутка для эксперимента.** Процесс, который представляет собой определение временных ограничений для эксперимента.
- **Запуск расчета (эксперимента).** Процесс, при котором пользователь может запустить эксперимент и сгенерировать сценарий.
- **Проверка сгенерированного сценария и его оптимизация.** Процесс, при котором пользователь проверяет сгенерированный сценарий, и принимает решение о том, насколько он точен и адекватен. После он может пересчитать его с помощью оптимизационной модели ТЭК.

3.4. Варианты использования. На рисунке 2 представлена схема, отображающая варианты взаимодействия пользователя с программным инструментарием.

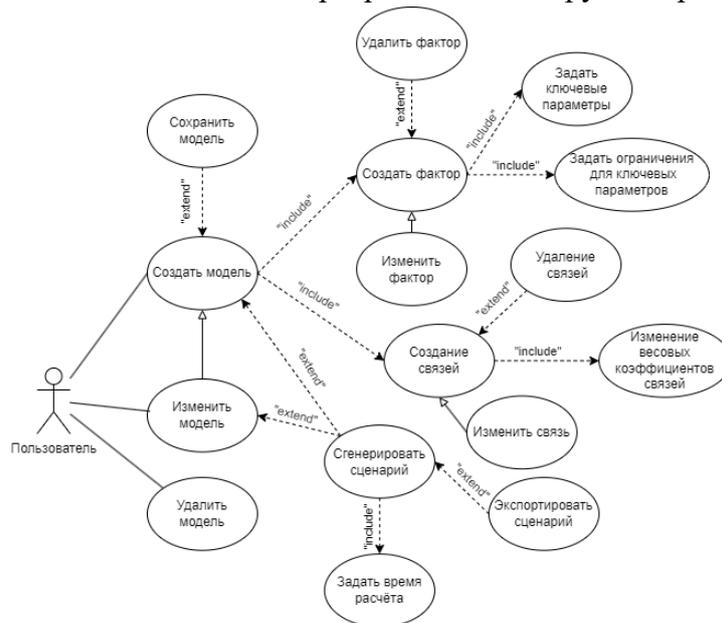


Рис. 2. Функциональные возможности приложения

Изначально пользователь может создать модель: определить факторы и связи между ними, для связей определить их тип и весовые коэффициенты. Далее пользователь может сохранить данную модель, и, при необходимости, изменить её структуру и характеристики.

3.5. Модель данных. Исходя из потребностей программного инструмента в сохранении созданных динамических когнитивных карт, построена модель данных (рисунок 3).

Модель данных состоит из следующих сущностей:

- Проект – содержит все необходимые данные для отображения и запуска имитационного расчета на основе данных динамической когнитивной карты;
- Период – содержит параметры рассматриваемого временного интервала моделирования;
- Сценарий – описывает конкретный сценарий: ограничения и параметры сценария;
- Фактор – описывает ключевой концепт, который имеет важность для рассматриваемой модели динамической системы;
- Связь – описывает характер связи между факторами;
- Функция – описывает конкретную функциональную математическую зависимость, в соответствии с которой будут изменяться ключевые параметры факторов в ходе расчетов;
- Параметр – свойство фактора динамической когнитивной карты: название параметра, тип значения и единицы измерения.

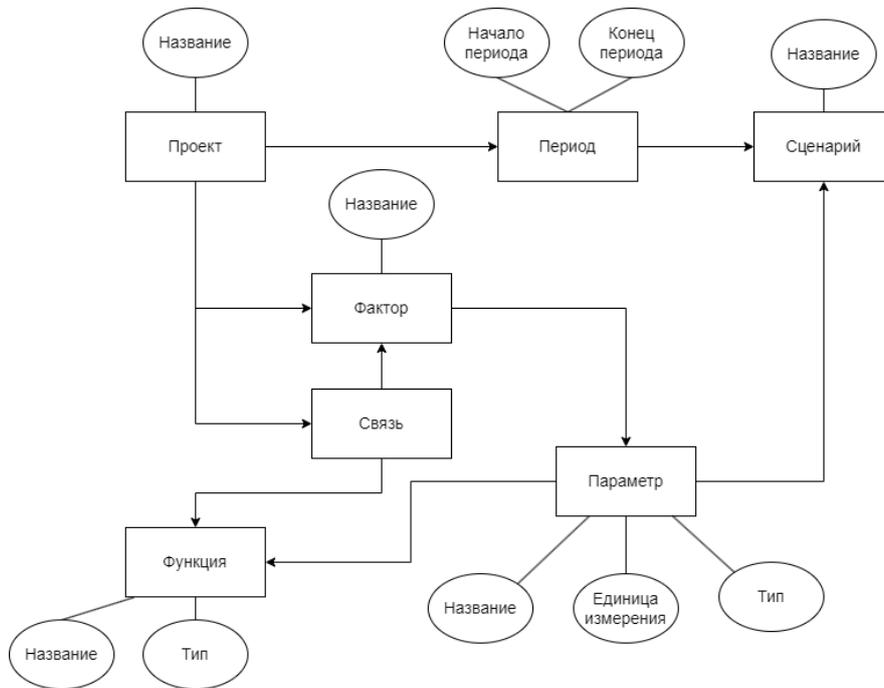


Рис. 3. Модель данных

Таким образом, предлагаемая модель предназначена для хранения всех необходимых компонентов данных, входящих в состав динамической когнитивной карты (проекта), тем самым позволяя их хранить, изменять, передавать и воспроизводить при необходимости.

3.6. Описание постановки задачи: «Составление динамической когнитивной карты». Программный инструмент для построения ДКК должен предоставлять возможности построения динамических когнитивных карт. Данная задача является комплексной и включает в себя ряд подзадач.

3.6.1. Информационное обеспечение задачи. На рисунке 4 представлена диаграмма потока данных процесса, описывающая информационное обеспечение для решения задачи «Составление динамической когнитивной карты».

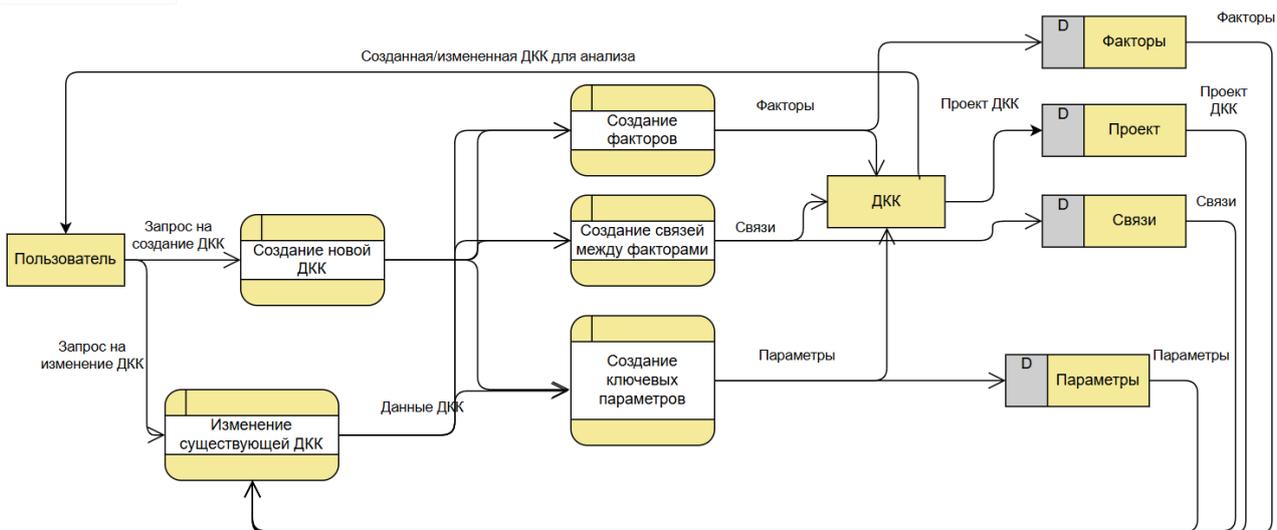


Рис. 4. Диаграмма потока данных процесса «Построение динамической когнитивной карты»

3.7. Описание постановки задачи: «Проведение эксперимента»

3.7.1. Общее описание задачи. Описываемая задача предназначена для генерации сценариев на основе построенной пользователем ДКК. В ходе проведения эксперимента ключевые параметры изменяются в соответствии с ранее описанными правилами при составлении ДКК. Эксперимент ограничен по времени, которое задается пользователем. По

завершению эксперимента **генерируется сценарий**, который может быть интегрирован в оптимизационную модель ТЭК, изменен или сохранен.

3.7.2. Информационное обеспечение задачи. На рисунке 5 представлена диаграмма потока данных процесса, описывающая информационное обеспечение для решения задачи «Проведение эксперимента».

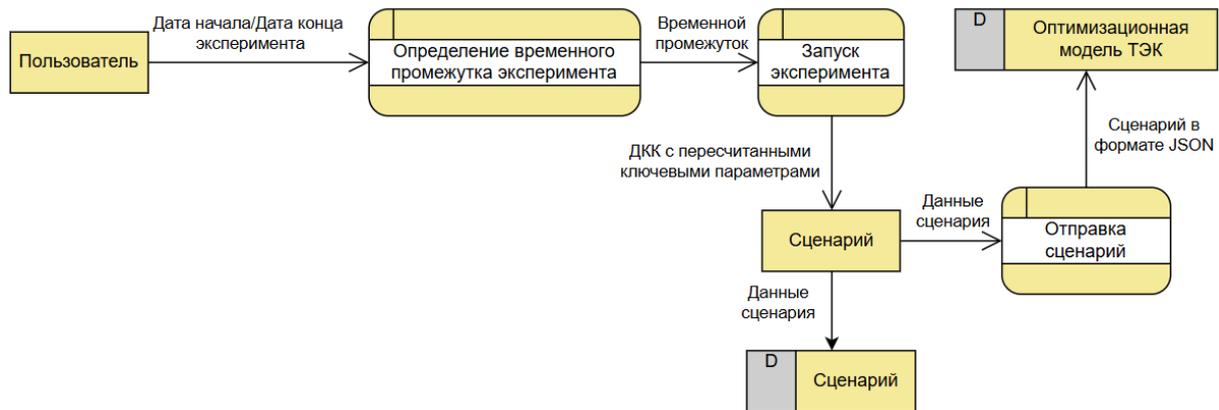


Рис. 4. Диаграмма потока данных процесса «Проведение эксперимента»

4. Возможности практического использования. Спектр прикладных задач в сфере энергетики, для которых может быть использован инструментарий построения динамических когнитивных карт, достаточно широк. Он включает:

- Анализ устойчивого развития энергосистем.
- Оценка эффективности политики в энергетике.
- Планирование развития энергетической инфраструктуры.
- Моделирование перехода к низкоуглеродной экономике.
- Оценка рисков и управление кризисами в энергетике.
- Интеграция новых технологий в существующие энергосистемы: возобновляемые источники энергии (ВИЭ), атомно-водородная энергетика.
- Оценка изменений антропогенного воздействия на окружающую среду.
- Моделирование цепочек поставок в энергетике, прогнозирование динамики спроса и предложения энергии.
- Определение эффективного потенциала и использования биомассы в рамках взаимосвязи вода-продовольствие-энергия в условиях меняющегося климата.

Заключение. Динамическое когнитивное моделирование – одно из перспективных расширений моделей системной динамики для приложений в сфере исследований развития энергетических систем. Подход с использованием динамического когнитивного моделирования требует реализации соответствующего программного инструментария для более эффективного проведения многофакторного анализа слабоформализованных динамических процессов комплексных систем, включающих социально-политические аспекты, что важно, например, для поиска возможных эффективных путей научно-технологического развития энергетики.

Благодарности. Работа выполняется в рамках проекта государственного задания «Методология построения ИТ-инфраструктуры для разработки интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики» (№ FWEU-2021-0007, рег. № АААА-А21-121012090007) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

Список источников

1. Hassan Qusay, Patrik Viktor, Tariq J. Al-Musawi, et al. The Renewable energy role in the global energy transformations. Renewable energy focus, 2024, vol. 48, 100545, DOI:10.1016/j.ref.2024.100545.

2. Rogge Karoline S., Kristin Reichardt Policy mixes for sustainability transitions: an extended concept and framework for analysis. *Research policy*, 2016, vol. 45, no. 8, 1620-1635, DOI:10.1016/j.respol.2016.04.004.
3. Qudrat-Ullah, H. (). Energy policy modeling in the 21st Century: an introduction. *Understanding complex systems*, 2013, pp. 3-13, DOI:10.1007/978-1-4614-8606-0_1.
4. Leopold A. Energy related system dynamic models: a literature review. *Central european journal of operations research*, 2016, vol. 24, pp. 231-261, DOI:10.1007/s10100-015-0417-4.
5. Филиппов С.П. Технологическое развитие энергетики в индустриальный период: достижения и разочарования, опыт на будущее / С.П. Филиппов // *Энергетическая политика*, 2018. – № 3. – С. 45-53.
6. Cherp A., Vinichenko V., Jewell J. et al. Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: a meta-theoretical framework. *Energy research & social science*, 2018, vol. 37, pp. 175-190.
7. Массель Л.В. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики / Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова // *Онтология проектирования*, 2020. – Т.10. – №3(37). – С.327-337. – DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
8. Ворожцова Т.Н. Семантическое моделирование в исследованиях устойчивости энергетических и социо-экологических систем / Т.Н. Ворожцова, Д.В. Пестерев, В.Р. Кузьмин // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2021. – № 4 (24). – С. 31-43. – DOI:10.38028/ESI.2021.24.4.003.
9. Массель Л.В. Онтологические аспекты исследования взаимовлияния энергетики и геоэкологии / Л.В. Массель, И.Ю. Иванова, Т.Н. Ворожцова и др. // *Онтология проектирования*, 2018. – Т. 8. – №4(30). – С.550-561. – DOI:10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561.
10. Массель Л.В. Оценка рисков природных и техногенных угроз устойчивости энергетических, экологических и социальных систем на основе интеллектуальных информационных технологий / Л.В. Массель, Н.П. Комендантова // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2019. – № 4 (16). – С. 31 45. – DOI:10.25729/2413-0133-2019-4-03.
11. Массель Л.В. Качество жизни как фактор интеграции исследований устойчивости энергетических, социо-экологических и социо-экономических систем / Л.В. Массель, Д.В. Пестерев // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2021. – №3 (23). – С. 5-16. – DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.001.
12. Гаськова Д.А. Технология анализа киберугроз и оценка рисков нарушения кибербезопасности критической инфраструктуры / Д.А. Гаськова, А.Г. Массель // *Вопросы кибербезопасности*, 2019. – № 2 (30). – С. 42-49.
13. Bolwig Simon; Bazbauers Gatis; Klitkou Antje et al. Review of modelling energy transitions pathways with application to energy system flexibility. *Renewable & sustainable energy reviews* 2019; vol. 101. pp. 440-452.
14. Mohamd L., Thanh M., Steven G. et al. Energy sector development: system dynamics analysis. *Applied sciences*, 2019, 10, 134, DOI:10.3390/app10010134.
15. Koot M., Wijnhoven F. Usage impact on data center electricity needs: A system dynamic forecasting model. *Applied Energy*, 2021, vol. 291, 116798, DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116798.
16. Savio A., Giovanni L., Guidolin M. Modelling energy transition in germany: an analysis through ordinary differential equations and system dynamics. *Forecasting*, 2022, 4, 438-455, DOI:10.3390/forecast4020025.
17. Höffken J., Pols A., Kumar A. Energy transitions in the global South: Towards just urgency and urgent justice. *Dilemmas of energy transitions in the global South: balancing urgency and justice*, 2021, pp. 154-162, DOI:10.4324/9780367486457-9.
18. Rye C., Jackson T. A review of EROEI-dynamics energy-transition models. *Energy policy*, 2018, vol. 122, pp. 260-272, DOI:10.1016/j.enpol.2018.06.041.
19. Kokkinos K., Karayannis V., Moustakas K. Circular bio-economy via energy transition supported by Fuzzy Cognitive Map modeling towards sustainable low-carbon environment. *Science of the total environment*, 2020, vol. 721, 137754, DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.137754.
20. Papageorgiou K., Carvalho G., Papageorgiou E., et al. Decision-making process for photovoltaic solar energy sector development using Fuzzy Cognitive Map technique. *Energies*, 2020, 13(6), 1427, DOI:10.3390/en13061427.
21. Горелова Г.В. Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных систем / Г.В. Горелова // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, 2013. – № 3 (140). – С. 239-250.
22. Федулов А.С. Модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт / А.С. Федулов, В.В. Борисов // *Системы управления, связи и безопасности*, 2016. – № 1). – С. 66-80.
23. Массель А.Г. Динамические когнитивные карты для обоснования решений по стратегическому управлению развитием энергетики / А. Г. Массель // *Проблемы управления и моделирования в сложных*

- системах. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Офорт", 2016. – С. 253-257. – ISBN 978-5-473-01088-6
24. Калининченко, А.И. Применение когнитивного инструментария к исследованию трудовых аспектов качества жизни / А.И. Калининченко. – Текст: непосредственный // Вопросы экономики и управления. — 2019. – № 2 (18). – С. 1-14. – URL: <https://moluch.ru/th/5/archive/117/3937/> (дата обращения: 17.01.2024).
25. Системная динамика – инструмент имитационного моделирования. – URL: <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/system-dynamics/> (дата обращения: 16.01.2024)
26. Козырев С.С. AnyLogic – мнение о программе / С.С.Козырев, Д.Р. Абдулин, Н.А.Абрамов, Г.А. Гусельман // Современные научные исследования и инновации, 2020. – №. 12. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2020/12/94126> (дата обращения: 16.01.2024)
27. Nápoles G. et al. FCM expert: software tool for scenario analysis and pattern classification based on Fuzzy Cognitive Maps. International journal of artificial intelligence tools, 2018, 27, DOI:10.1142/S0218213018600102.
28. Fortmann-Roe S. Insight Maker: A general-purpose tool for web-based modeling & simulation. Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, vol. 47, pp. 28-45. DOI:10.1016/j.simpat.2014.03.013
29. Massel L.V., Massel A.G., Mamedov T.G. Integration of mathematical and cognitive modelling in the software package “INTEC-A”. Proceedings of 15th International Conference “Intelligent Systems”, 2022, DOI:10.3390/engproc2023033026.

Козлов Максим Васильевич. Магистрант ИрННТУ, инженер научно-аналитического центра ИСЭМ СО РАН. Основные направления исследований: когнитивное моделирование, семантический анализ, графовые нейронные сети, разработка информационных систем, tax28k@gmail.com.

Михеев Алексей Валерьевич. К.т.н., заведующий научно-аналитическим центром ИСЭМ СО РАН, Основные направления исследований: математические моделирование энергетических систем, моделирование какскадов ГЭС, визуализация потоков, обработка изображений, научно-технологическое прогнозирование в энергетике, наукометрический анализ, ORCID: 0000-0003-4219-8812, Author ID: 149774, Scopus: 7007142352, mikheev@isem.irk.ru.

UDC 004

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.014

Information design for dynamic cognitive modeling in energy sector

Maxim V. Kozlov^{1,2}, Alexey V. Mikheev¹

¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia, tax28k@gmail.com

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This paper provides an overview of the current state in the field of dynamic cognitive (system) modeling and the corresponding software tools for analyzing heterogeneous factors affecting the development of complex, poorly formalized systems in the energy sector. Existing methods for analyzing multifactor dynamic systems, as well as the application of modern simulation tools for conducting qualitative analysis, are reviewed. Approaches to dynamic cognitive modeling are presented in the context of its application for analyzing the influence of complex factors and assessing systemic effects on scientific and technological development in the energy sector. The results of the study can be used both for the development of software tools for dynamic cognitive modeling and for improving approaches to the analysis of heterogeneous factors influencing the development of energy systems.

Keywords: systems analysis, cognitive modeling, dynamic cognitive models, system dynamic models, complex networks

Acknowledgments. The work is carried out within the framework of the state assignment project "Methodology for constructing an IT infrastructure for developing intelligent systems for managing the development and operation of energy systems" (No. FWEU-2021-0007, reg. No. AAAA-A21-121012090007) of the fundamental research program of the Russian Federation for 2021-2030.

References

1. Hassan Qusay, Patrik Viktor, Tariq J. Al-Musawi, et al. The Renewable energy role in the global energy transformations. *Renewable energy focus*, 2024, vol. 48, 100545, DOI:10.1016/j.ref.2024.100545.
2. Rogge Karoline S., Kristin Reichardt Policy mixes for sustainability transitions: an extended concept and framework for analysis. *Research policy*, 2016, vol. 45, no. 8, 1620-1635, DOI:10.1016/j.respol.2016.04.004.
3. Qudrat-Ullah, H. (). Energy policy modeling in the 21st Century: an introduction. *Understanding complex systems*, 2013, pp. 3-13, DOI:10.1007/978-1-4614-8606-0_1.
4. Leopold A. Energy related system dynamic models: a literature review. *Central european journal of operations research*, 2016, vol. 24, pp. 231-261, DOI:10.1007/s10100-015-0417-4.
5. Filippov S.P. Tekhnologicheskoye razvitiye energetiki v industrial'nyy period: dostizheniya i razocharovaniya, opyt na budushcheye [Technological development of energy in the industrial period: achievements and disappointments, experience for the future]. *Energeticheskaya politika [Energy policy]*, 2018, no. 3, pp. 45-53.
6. Cherp A., Vinichenko V., Jewell J. et al. Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: a meta-theoretical framework. *Energy research & social science*, 2018, vol. 37, pp. 175-190.
7. Massel L.V., Vorozhczova T.N. Ontologicheskij podhod k postroeniyu cifrovyyh dvojn'nikov ob'ektov i sistem energetiki [An ontological approach to the construction of digital counterparts of energy facilities and systems]. *Ontologiya proektirovaniya [Ontology of design]*, 2020., v.10., no 3(37)., pp.327-337, DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
8. Vorozhczova T.N., Pesterev D.V., Kuzmin V.R. Semanticheskoe modelirovanie v issledovaniyax ustojchivosti e`nergeticheskix i socio-e`kologicheskix system [Semantic modeling in research on the sustainability of energy and socio-ecological systems]. *Informacionny`e i matematicheskie texnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management]*, 2021, no 4 (24), pp. 31-43, DOI:10.38028/ESI.2021.24.4.003.
9. Massel L.V., Ivanova I.Yu., Vorozhczova T.N. et al. Ontologicheskie aspekty` issledovaniya vzaimovliyaniya e`nergetiki i geoe`kologii [Ontological aspects of the study of the mutual influence of energy and geoecology]. *Ontologiya proektirovaniya [Ontology of design]*, 2018, v. 8, no 4(30), pp.550-561, DOI:10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561.
10. Massel L.V., Komendantova N.P. Ocenka riskov prirodny`x i texnogenny`x ugroz ustojchivosti e`nergeticheskix, e`kologicheskix i social`ny`x sistem na osnove intellektual`ny`x informacionny`x texnologij [Risk assessment of natural and man-made threats to the sustainability of energy, environmental and social systems based on intelligent information technologies]. *Informacionny`e i matematicheskie texnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management]*, 2019, no 4 (16), pp. 31 45, DOI:10.25729/2413-0133-2019-4-03.
11. Massel L.V., Pesterev D.V. Kachestvo zhizni kak faktor integracii issledovaniy ustojchivosti e`nergeticheskix, socio-e`kologicheskix i socio-e`konomicheskix system [Quality of life as a factor of integration of sustainability studies of energy, socio-ecological and socio-economic systems]. *Informacionny`e i matematicheskie texnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management]*, 2021, no. 3 (23). – pp. 5-16, DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.001.
12. Gas`kova D.A., Massel A.G. Texnologiya analiza kiberugroz i ocenka riskov narusheniya kiberbezopasnosti kriticheskoy infrastruktury [Technology of cyber threat analysis and risk assessment of cybersecurity violations of critical infrastructure]. *Voprosy` kiberbezopasnosti [Issues of cybersecurity]*, 2019, no. 2 (30), pp. 42-49.
13. Bolwig Simon; Bazbauers Gatis; Klitkou Antje et al. Review of modelling energy transitions pathways with application to energy system flexibility. *Renewable & sustainable energy reviews* 2019; vol. 101. pp. 440-452.
14. Mohamd L., Thanh M., Steven G. et al. Energy sector development: system dynamics analysis. *Applied sciences*, 2019, 10, 134, DOI:10.3390/app10010134.
15. Koot M., Wijnhoven F. Usage impact on data center electricity needs: A system dynamic forecasting model. *Applied Energy*, 2021, vol. 291, 116798, DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116798.
16. Savio A., Giovanni L., Guidolin M. Modelling energy transition in germany: an analysis through ordinary differential equations and system dynamics. *Forecasting*, 2022, 4, 438-455, DOI:10.3390/forecast4020025.
17. Höffken J., Pols A., Kumar A. Energy transitions in the global South: Towards just urgency and urgent justice. *Dilemmas of energy transitions in the global South: balancing urgency and justice*, 2021, pp. 154-162, DOI:10.4324/9780367486457-9.
18. Rye C., Jackson T. A review of EROEI-dynamics energy-transition models. *Energy policy*, 2018, vol. 122, pp. 260-272, DOI:10.1016/j.enpol.2018.06.041.

19. Kokkinos K., Karayannis V., Moustakas K. Circular bio-economy via energy transition supported by Fuzzy Cognitive Map modeling towards sustainable low-carbon environment. *Science of the total environment*, 2020, vol. 721, 137754, DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.137754.
20. Papageorgiou K., Carvalho G., Papageorgiou E., et al. Decision-making process for photovoltaic solar energy sector development using Fuzzy Cognitive Map technique. *Energies*, 2020, 13(6), 1427, DOI:10.3390/en13061427.
21. Gorelova G.V. Kognitivny`j podxod k imitacionnomu modelirovaniyu slozhny`x system [Cognitive approach to simulation modeling of complex systems]. *Izvestiya Yuzhnogo federal`nogo universiteta [Proceedings of the Southern Federal University]. Texnicheskie nauki [Technical sciences]*, 2013, no. 3 (140), pp. 239-250.
22. Fedulov A.S., Borisov V.V. Modeli sistemnoj dinamiki na osnove nechetkix relyacionny`x kognitivny`x kart [Models of system dynamics based on fuzzy relational cognitive maps]. *Sistemy` upravleniya, svyazi i bezopasnosti [Control systems, communications and security]*, 2016, no. 1, pp. 66-80.
23. Massel` A.G. Dinamicheskie kognitivny`e karty` dlya obosnovaniya reshenij po strategicheskomu upravleniyu razvitiem e`nergetiki [Dynamic cognitive maps for substantiating decisions on strategic management of energy development]. *Problemy` upravleniya i modelirovaniya v slozhny`x sistemax [Problems of management and modeling in complex systems]*, Samara: LLC "Ofort", 2016, pp. 253-257, ISBN 978-5-473-01088-6.
24. Kalinichenko, A.I. Primenenie kognitivnogo instrumentariya k issledovaniyu trudovy`x aspektov kachestva zhizni [Application of cognitive tools to the study of labor aspects of quality of life]. *Voprosy` e`konomiki i upravleniya [Economic and management issues]*, 2019, no. 2 (18), pp. 1-14, available at: <https://moluch.ru/th/5/archive/117/3937/> (accessed: 01/17/2024).
25. Sistemnaya dinamika – instrument imitacionnogo modelirovaniya [System dynamics is a simulation tool]. Available at: <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/system-dynamics/> (accessed: 01/16/2024)
26. Kozyrev S.S., Abdulin D.R., Abramov N.A., Gusel`man G.A. AnyLogic – mnenie o programme [opinion on the program]. *Sovremennyye nauchny`e issledovaniya i innovacii [Modern scientific research and innovations]*, 2020, no. 12, available at: <http://web.snauka.ru/issues/2020/12/94126> (accessed: 01/16/2024)
27. Nápoles G. et al. FCM expert: software tool for scenario analysis and pattern classification based on Fuzzy Cognitive Maps. *International journal of artificial intelligence tools*, 2018, 27, DOI:10.1142/S0218213018600102.
28. Fortmann-Roe S. Insight Maker: A general-purpose tool for web-based modeling & simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, vol. 47, pp. 28-45, DOI:10.1016/j.simpat.2014.03.013.
29. Massel L.V., Massel A.G., Mamedov T.G. Integration of mathematical and cognitive modelling in the software package “INTEC-A”. *Proceedings of 15th International Conference “Intelligent Systems”*, 2022, DOI:10.3390/engproc2023033026.

Kozlov Maxim Vasilievich. Master's student at Irkutsk national research technical university (IrNITU), engineer at the Scientific and Analytical Center of the Melentiev energy systems institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISEM SB RAS). Research interests: cognitive modeling, semantic analysis, graph neural networks, development of information systems, max28k@gmail.com.

Mikheev Alexey Valerievich. Doctor of Engineering, Head of the Scientific and Analytical Center at MESI SB RAS. Research interests: mathematical modeling of energy systems, modeling of hydropower cascades, flow visualization, image processing, scientific and technological forecasting in the energy sector, scientometric analysis. ORCID: 0000-0003-4219-8812, Author ID: 149774, Scopus: 7007142352, mikheev@isem.irk.ru.

Статья поступила в редакцию 09.10.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 10/09/2024; approved after reviewing 12/12/2024; accepted for publication 12/17/2024.

УДК 001.891.5

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.015

Аналитическая статистика научных изданий на Scilit (на примере публикаций ИСЭМ СО РАН)

Ермаков Алексей Викторович

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
Россия, Москва, *Ermakov@Keldysh.ru*

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы, связанные с представлением информации о публикациях научных сотрудников ИСЭМ СО РАН, а также о научных изданиях Института в информационно-аналитических материалах системы Scilit. На конкретных примерах показаны преимущества полного и корректного задания метаданных научных публикаций, а также возникающие проблемы при небрежном обращении с библиографической информацией.

Ключевые слова: аналитическая статистика, библиографические базы данных, метаданные публикаций, Scilit

Цитирование: Ермаков А.В. Аналитическая статистика научных изданий на Scilit (на примере публикаций ИСЭМ СО РАН) / Ермаков А.В. // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 159-171. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.015.

Введение. Последние 10 лет показатели публикационной активности российских ученых неуклонно растут [1]. С точки зрения оценки показателей результатов научной деятельности безусловно важны индекс цитируемости публикаций и индекс Хирша, но, с точки зрения автора, одним из наиболее важных показателей является интерес читателей (количество просмотров). Многие библиографические системы дают возможность автору увидеть различные статистические показатели не только в статике (общее число просмотров), но и в динамике (за день, за месяц, в виде графиков и т.д.).

Работы по исследованию методов оценки web-аналитики ведутся как в России [2], так и за рубежом [3]. В российском сегменте это прежде всего проект Science Space от eLibrary [4].

Среди зарубежных следует отметить инструменты Crossref [5] – API от Crossref (<https://www.crossref.org/documentation/retrieve-metadata/rest-api/>) и, конечно же, разработку швейцарско-китайского издательства MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) – комплексной платформы-агрегатора для научных публикаций Scilit.

Издательство MDPI, выпускающее порядка 390 журналов, часто находится на передовой инноваций в области цифровой публикации. Одним из примеров является Scilit [6] – база данных, которая ежедневно собирает, индексирует и извлекает новейшие данные и материалы из CrossRef и PubMed, обеспечивает поиск нужной информации среди 167 миллионов публикаций, 19 миллионов ученых со всего мира, 24 533 издательств, 1 миллиона научных организаций.

Платформа Scilit была разработана в 2014 году. Потенциал этой базы данных позволил достаточно быстро охватить все статьи с цифровым идентификатором объекта (DOI) из CrossRef и с идентификатором PMID (Pubmed). Scilit анализирует метаданные CrossRef и сохраняет их в своей информационной базе. Затем они индексируются в поисковой системе для быстрого использования в режиме реального времени.

В своих аналитических отчетах Scilit четко указывает, является ли материал открытым или нет, и какие издатели публикуют работы в максимально доступном читателю формате. Поскольку академический издательский ландшафт смещается в сторону модели открытого доступа, это очень важный индикатор.

На основе рассматриваемого в данной статье инструментария нами были проведены исследования, связанные с представлением информации о публикациях сотрудников ИПМ им.

М.В. Келдыша РАН и научных изданиях Института [7]. Это вызвало большой интерес научной общественности и подтолкнуло нас к проведению данного исследования.

Такого рода исследования безусловно важны не только для научных организаций, но и для ВУЗов [8], отдельных секторов экономики [9, 10, 11], издательств и научных журналов [12]. Данное исследование предлагает некоторый подход к проведению подобных аналитических работ.

1. Scilit – комплексная платформа-агрегатор для научных публикаций. Главное меню Scilit (www.scilit.net) позволяет выбрать формат представления аналитической информации (рис. 1): по публикациям; по ученым (авторам); по издателям (издательствам); по источникам; по организациям

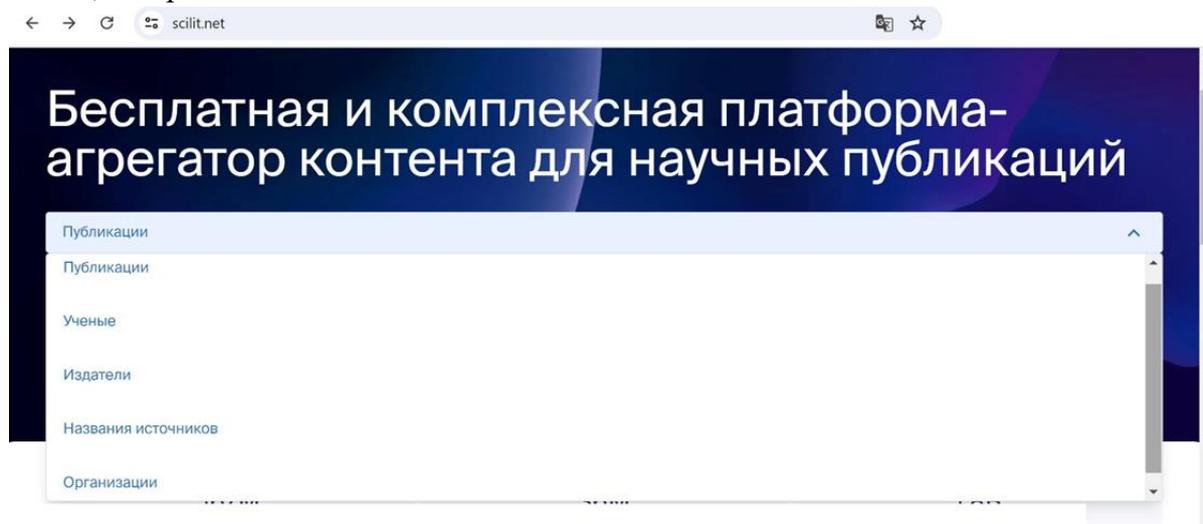


Рис. 1. Главное меню Scilit

Безусловно, все предлагаемые направления интересны для изучения, но, на наш взгляд, проще и понятней начать рассмотрение с последнего пункта – «Организации».

Выбираем этот пункт и указываем название организации – Melentiev Energy Systems Institute (можно сократить до 1-го слова ИСЭМ).

Здесь следует отметить, что в метаданных параметр «ROR» (Research Organization Registry) появился сравнительно недавно, а до этого авторы не всегда точно указывали в статьях названия организаций, да и издатели далеко не всегда утруждали себя заданием корректной аффилиации авторов. В некоторых зарубежных и в очень малом количестве отечественных журналов этот параметр появился в начале 20-х годов. А до этого использовалось текстовое название организации ("affiliation":[{"name":"Melentiev Energy Systems Institute"}]). Кто-то указывал полное название, кто-то сокращенное, а многие не указывали вовсе. В результате значительное количество публикаций сотрудников ИСЭМ не попали в статистику, приведенную на рис. 2.

Акцент на открытость и доступность публикаций читателям очень важен и является ведущим трендом в издательской области. Справа на рис. 2. представлен график публикаций открытого доступа – публикаций, доступ к которым не связан с лицензионными и коммерческими ограничениями издательств.

Как же получается, что авторы и редакции журналов заинтересованы в попадании своих публикационных материалов в отчеты, статистику, аналитику, но информационно-аналитические системы эти материалы не находят?

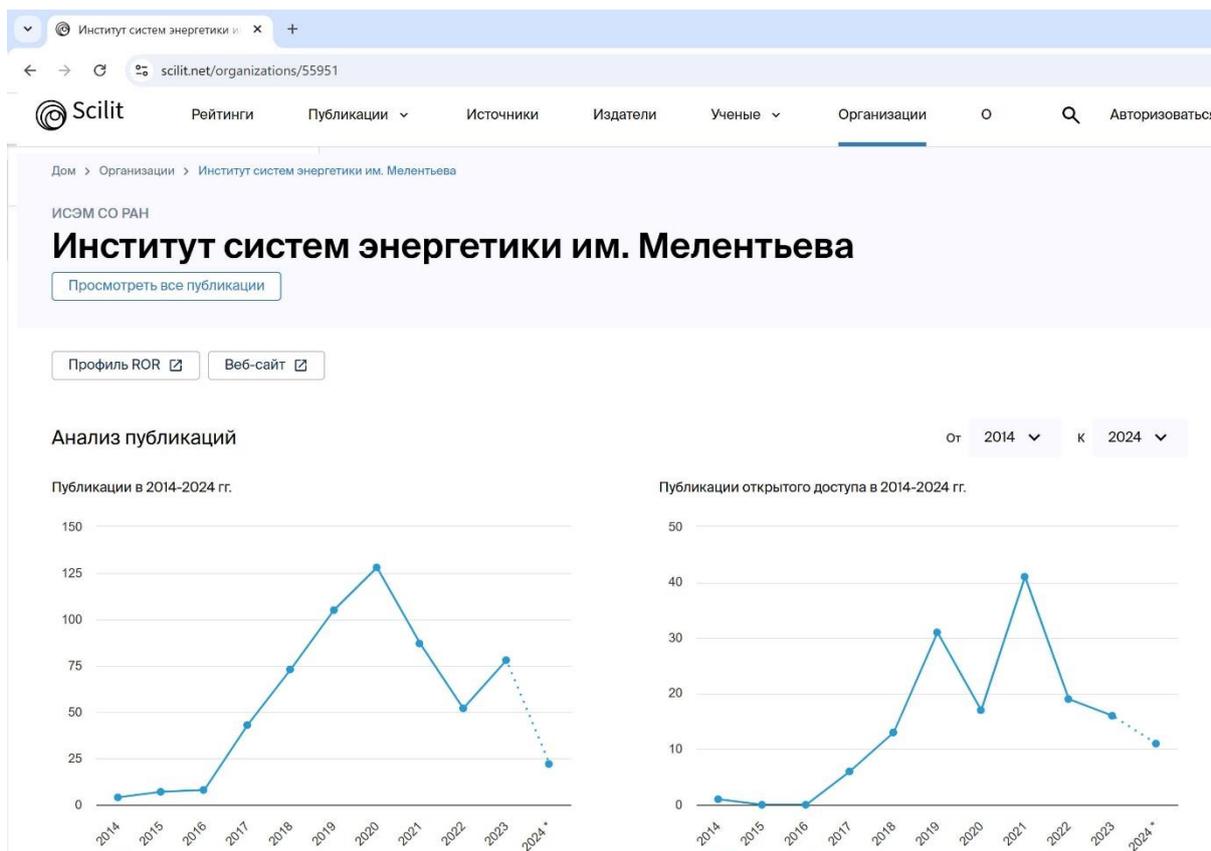


Рис. 2. Анализ публикационной активности сотрудников ИСЭМ

Первая причина – это небрежность авторов, опечатки в названии или использование транслитерации вместо корректных англоязычных названий своих организаций. Таким образом, некорректная аффилиация автора статьи зачастую автоматически переносится в метаданные публикации и отсылается в библиографические базы данных.

Вторая причина – это работа редакции и издательства.

Возьмем для примера статью в журнале Energy Systems Research.

30 April 2024

Published by Melentiev Energy Systems Institute in Energy Systems Research

Vol. 7 (1(25)), 5-16

Dissociation of Gas Hydrates in the Combustion Environment

by Igor Donskoy

<https://doi.org/10.25729/esr.2024.01.0001>

Способы получения метаданных из базы Crossref описаны в [13], здесь покажем эту функцию коротко:

`https://api.crossref.org/works/<DOI>`

В приведенном примере DOI – 10.25729/esr.2024.01.0001, тогда запрос метаданных указанной статьи будет выглядеть:

`https://api.crossref.org/works/10.25729/esr.2024.01.0001`

Получаем ответ в формате JSON и контекстным поиском находим данные об аффилиации автора:

```
"author": [{"given": "Igor", "family": "Donskoy",
"sequence": "first", "affiliation": []}]
```

Показана «пустая» аффилиация, хотя на сайте журнала и в pdf-версии статьи указаны правильные данные аффилиации – *Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия.*

Другой пример не совсем корректного подхода к указанию аффилиации автора – издательство MDPI.

Регистрируясь на сайте издательства [14], каждый автор заполняет шаблон (рис. 3, 4) – здесь я привожу фрагменты заполнения своего авторского профиля, так как невозможно получить доступ к шаблонам других авторов.

Рис. 3. Шаблон для регистрации автора в издательстве MDPI

Рассмотрим статью в журнале MDPI «Mathematics».

9 September 2024

Published by MDPI AG in Mathematics Vol. 12 (17), 2796

<https://doi.org/10.3390/math12172796>

A Method for Transforming Non-Convex Optimization Problem to Distributed Form
by Oleg O. Khamisov, Oleg V. Khamisov, Todor D. Ganchev, Eugene S. Semekin

В метаданных статьи указанное издательство в поле аффилиации записывает все обязательные поля своего регистрационного шаблона (рис.4) – *Affiliation, Address1, Zip Code, City, Country*.

Рис. 4. Поля шаблона, связанные с аффилиацией

```
"author": [{"given": "Oleg O.", "family": "Khamisov",
"sequence": "first", "affiliation": [{"name": "Department of Applied Mathematics, Melentiev Energy Systems Institute, 664033 Irkutsk, Russia"}]}
```

Конечно, такое указание аффилиации избыточно, но это, безусловно, лучше, чем «пустая» аффилиация. Информационно-аналитическая система при обработке этой информации и читатель при изучении аналитики могут узнать не только организацию автора, но и город, и страну проживания.

На рис. 5 показаны «источники» метаинформации – издания, в которых публиковались статьи сотрудников ИСЭМ и которые стали источником метаданных научных публикаций для приведенной статистики.

Publications in 2014-2024.

Source Title	Publications
Energy Systems Research	32
Journal of Physics: Conference Series	14
IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	13
Mathematics	12
MATEC Web of Conferences	10
EPJ Web of Conferences	9
Energies	9
Energy Reports	9
AIP Conference Proceedings	8
Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering	8

Рис. 5. Источники метаинформации о публикациях сотрудников ИСЭМ

На рис.6 показана «тематическая направленность» публикаций, но в метаданных тематическое направление исследований не задается.

Публикации в 2014-2024 гг.

Предмет	Публикации
Управление рисками и оценка	317
Социальная справедливость и реформа	238
Энергетические системы и электромобили	185
Электробезопасность	151
Энергетические системы и технологии	70
Управление операциями	70
Исследования устойчивого развития	64
Термодинамика	61
Управление объектами	46
Численные методы	36

Рис. 6. Тематическая направленность публикаций сотрудников ИСЭМ

На основе модели машинного обучения Scilit автоматически классифицирует публикации по различным темам. Модель классификации тем была обучена только на англоязычных публикациях и может привести к «слабым» результатам для публикаций на других языках (если тематическое направление вообще можно определить). Т.е. система сама, возможно по названиям статей или аннотациям, построила таблицу тематических направлений.

В целом, это безусловно хорошо и удобно исследователю. Однако, на текущий момент корректность отнесения той или иной публикации к определенной теме вызывает вопросы. Это легко проверить – справа указано количество публикаций, отнесенное к данной теме. Это поле является «кликабельным», т.е. можно получить весь список статей.

Рассмотрим, например, публикации по первой теме указанного списка – «Управление рисками и оценка». Система ИИ отнесла к этой тематике статью «Подход «агент-сервис» к созданию цифровых двойников».

Конечно, стремительное развитие систем ИИ в ближайшем будущем сможет исправить такого рода ошибки и, возможно, начнет работать и с русскоязычными аннотациями статей, но даже нынешнее положение на наш взгляд полезно и интересно.

Также следует обратить внимание на статистику по цитированию (рис. 7), которую можно получить за любой диапазон лет с начала наполнения базы данных Scilit (2014 год).

Анализ цитирования (?)

Данные по цитированию за все время.

Всего цитирований	2,544
Всего публикаций	625
Среднее количество цитирований	4.07
Цитируемые публикации	364
Прочитанные публикации %	58.2%
Самоцитирование	367
% самоцитирования	14,4%

Рис.7. Статистика по цитированию публикаций сотрудников ИСЭМ

«Кликнув» на вопросительный знак «?» в верхней части рисунка, можно получить подробную информацию по каждой позиции данного статистического отчета.

На рис. 8 показаны данные по цитированию в графическом виде.

Цитирования в год

Все цитирования за 2014-2024 гг.

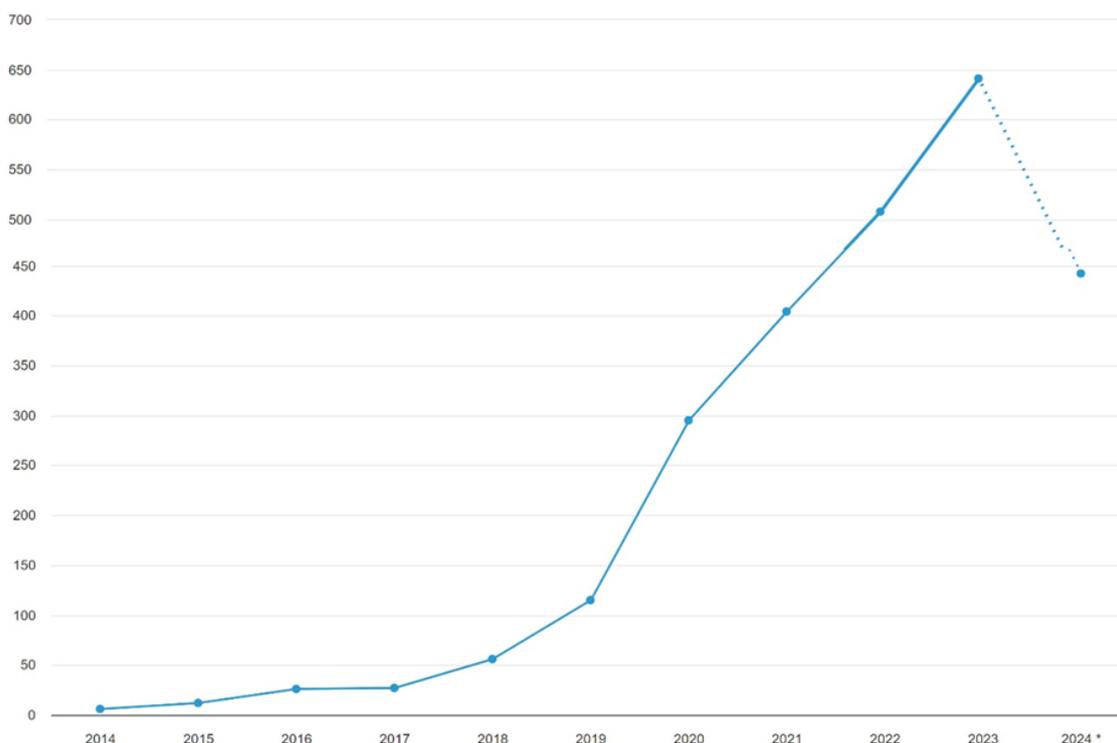


Рис.8. Графическое представление статистики цитирования публикаций сотрудников ИСЭМ

Еще одним, интересным на наш взгляд показателем, являются данные о сотрудничестве – соавторстве с сотрудниками других организаций (рис. 9).

Анализ сотрудничества



Рис. 9. Данные по научным публикациям, подготовленным в соавторстве с сотрудниками других организаций

2. Издательство Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Теперь рассмотрим статистику публикаций, которые вышли в издательстве ИСЭМ – журналы, монографии, сборники конференций (рис. 10).

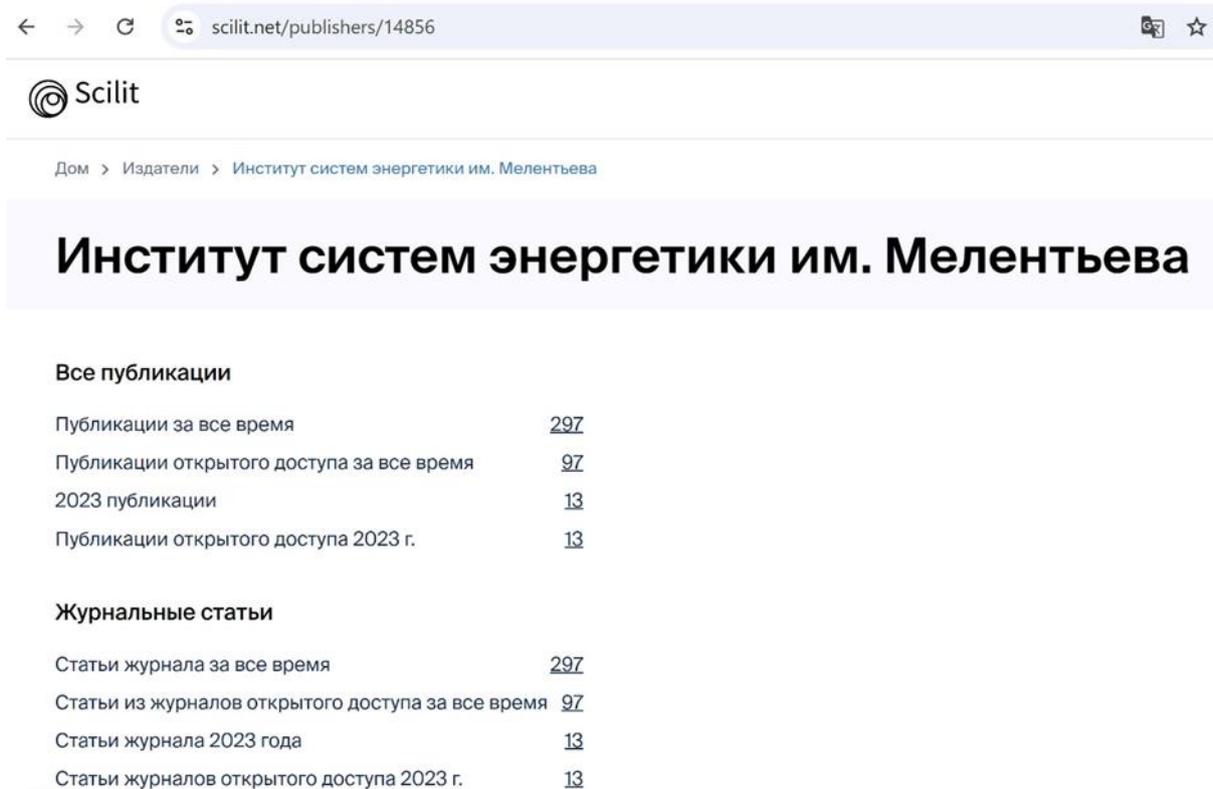


Рис. 10. Статистика по изданиям ИСЭМ
 Далее на рис. 11 представлены издания ИСЭМ СО РАН.

Публикации в 2014-2024 гг.

Название источника	Публикации
Информационные и математические технологии в науке и управлении	<u>190</u>
Исследования энергетических систем	<u>107</u>

Рис. 11. Издания ИСЭМ СО РАН

По каждому из приведенных в этой иллюстрации журналов можно провести отдельное интересное исследование, но мы в следующем разделе ограничимся журналом «Информационные и математические технологии в науке и управлении» [15].

Безусловно, интересна тематическая направленность публикаций в изданиях ИСЭМ (рис. 12).

Публикации в 2014-2024 гг.

Предмет	Публикации
Управление рисками и оценка	<u>85</u>
Социальная справедливость и реформа	<u>67</u>
Электробезопасность	<u>39</u>
Энергетические системы и электромобили	<u>38</u>
Управление операциями	<u>23</u>
Исследования устойчивого развития	<u>21</u>
Энергетические системы и технологии	<u>15</u>
Диагностическое и терапевтическое УЗИ	<u>12</u>
Физика плазмы	<u>10</u>
ИИ и машинное обучение	<u>6</u>

Рис. 12. Темы публикаций в изданиях ИСЭМ

Эта тематическая таблица также построена при помощи ИИ, и к ней также возникают вопросы, но, скорее всего, с развитием модели ИИ эти вопросы будут постепенно сниматься.

Однако здесь необходимо сделать одно важное замечание. Если журнал не размещает в метаданных статей англоязычные аннотации, то в аналитических обзорах Scilit эти материалы в ближайшем будущем не будут отражены в тематических рубриках.

Безусловно интересной является статистика по сотрудничеству ученых ИСЭМ с зарубежными специалистами (рис. 13).

Публикации в 2014-2024 гг.

Страна	Публикации
Россия	<u>91</u>
Беларусь	<u>3</u>
Монголия	<u>3</u>
Египет	<u>2</u>
Италия	<u>2</u>
Армения	<u>1</u>
Азербайджан	<u>1</u>
Бельгия	<u>1</u>
Германия	<u>1</u>
Португалия	<u>1</u>

Рис. 13. Сотрудничество с зарубежными специалистами

Публикации в 2014-2024 гг.

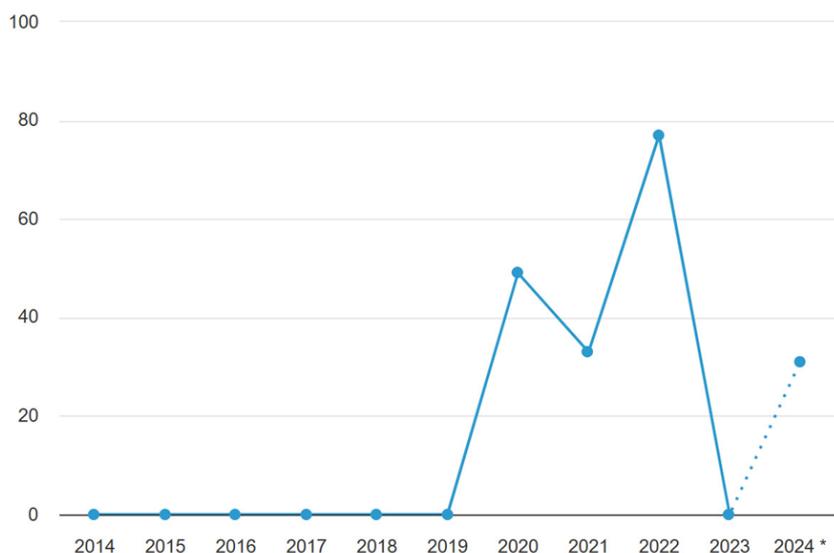


Рис. 15. Графическое представление статистики по публикациям журнала «Информационные и математические технологии в науке и управлении»

Резкое падение на графике в районе 2023 г. связано с тем, что или DOI опубликованным статьям не присваивались, или метаданные в Crossref не пересылались. Это можно увидеть, пролистнув аналитические таблицы и графики Scilit до раздела «Последние публикации». Увидим разрыв между № 4 (24) (11 января 2022 г.) и № 2 (34) (16 июля 2024 г.).

Возможно это связано с переходом на новые DOI:

№ 4(24) – <https://doi.org/10.38028/esi.2021.24.4.011>,

а № 2(34) – <https://doi.org/10.25729/esi.2024.34.2.011>

Если есть такая возможность, то мы рекомендовали бы редакции загрузить недостающие метаданные.

Рассматривать тематический каталог, построенный системой, не имеет смысла, так как только русскоязычные аннотации статей журнала загружались в Crossref. Остается ждать и надеяться, что ИИ сможет в будущем корректно работать с русским языком, но лучше все-таки в англоязычные информационные системы загружать англоязычные аннотации статей.

Еще один важный аспект, который интересно рассмотреть – это сотрудничество авторов журнала с другими организациями в плане соавторства (рис. 16).

Анализ сотрудничества

Публикации в 2014-2024 гг.



Тип сотрудничества	Публикации	Процент
Внутреннее межорганизационное сотрудничество	4	2.1%
Внутреннее внутриорганизационное сотрудничество	23	12.1%
Едиличное авторство (без соавторства)	43	22,6%
Отсутствующие данные	120	63,2%

Рис. 16. Показатели сотрудничества авторов журнала «Информационные и математические технологии в науке и управлении»

Здесь следует обратить внимание на последнюю строку в таблице справа на рис. 16 – «Отсутствующие данные – 63,2 %». Это связано как раз с тем, о чем мы писали в начале статьи – некорректности или отсутствии аффилиации авторов.

Возьмем для примера одну из последних опубликованных статей:

17 октября 2024 г.

Опубликовано Институт систем энергетики им. Мелентьева в Информационные и математические технологии в науке и управлении № 3(35), стр. 20-32

<https://doi.org/10.25729/esi.2024.35.3.002>

Онтологический анализ приемов аргументации в научном дискурсе

автор: Е.А. Сидорова, И.С. Кононенко

В метаданных этой статьи указано русскоязычное название организации автора:

```
"author": [{"given": "\u0418.\u0410.", "family": "\u0421\u0438\u0434\u043e\u0440\u043e\u0432", "sequence": "first", "affiliation": [{"name": "\u0418\u043d\u0441\u0442\u0438\u0442 \u0441\u0438\u0441\u0442\u0435\u043c \u044d\u043d\u0435\u0440\u0433\u0435\u0442\u0438\u043a\u0438 \u0438\u043c. \u041c\u0435\u043b\u0435\u043d\u0442\u044c\u0435\u0432\u0430"}]}]
```

Если взять статью из предыдущего номера:

16 июля 2024 г.

Опубликовано Институт систем энергетики им. Мелентьева в Информационные и математические технологии в науке и управлении № 2(34), стр. 19-32

<https://doi.org/10.25729/esi.2024.34.2.002>

Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 3. Пирамидальные нейронные сети с глубокой степенью обучения

автор А.Ю. Дорогов

То увидим, что задана «пустая» аффилиация:

```
author": [{"given": "\u0410.\u042e.", "family": "\u0414\u043e\u0440\u043e\u0433\u043e\u0432", "sequence": "first", "affiliation": []}]
```

Другие разделы отображенного системой Scilit аналитического исследования также представляют определенный интерес, но они уже были рассмотрены нами в предыдущих разделах статьи.

Заключение. В данной работе мы не ставили задачу максимально подробно рассказать о всех возможностях информационно-аналитической системы Scilit. Нам было важно показать на конкретных примерах некоторые, наиболее интересные, на наш взгляд, ее возможности, показать, какие преимущества дает аккуратное и полное задание метаданных научных публикаций и какие проблемы возникают при небрежном отношении авторов и/или издателей к этой информации. Более аккуратное задание метаданных, исправление возможных ошибок так или иначе обязательно скажется и на статистических показателях научных сотрудников, и на рейтинге организации, что мы получили на собственном опыте, активно взаимодействуя с eLibrary [16, 17].

Список источников

1. Фурсов К.С. Основные показатели публикационной активности / К.С. Фурсов. – URL: <https://issek.hse.ru/news/204169185.html>.
2. Ревякин Ю.Г. Возможности web-аналитики для оценки эффективности научных публикаций / Ю.Г. Ревякин // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, 2020. – № 50. – 42 с. – DOI:10.20948/prepr-2020-50.
3. Naprawski Th. The impact of web analytics tools on knowledge management. 27th International conference on knowledge-based and intelligent information & engineering systems, DOI:10.1016/j.procs.2023.10.335.
4. Информационно-аналитическая система SCIENCE SPACE. – URL: https://elibrary.ru/projects/science_space/science_space_info.asp.
5. API унифицированных ресурсов CrossRef. – URL: <https://api.crossref.org/swagger-ui/index.html>.
6. Платформа-агрегатор для научных публикаций Scilit. – URL: <https://www.scilit.net>.
7. Ермаков А.В. Аналитическая статистика научных изданий на Scilit (на примере публикаций ИПМ им. М.В. Келдыша) / А.В. Ермаков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2024. – № 71. – 17 с. – DOI:10.20948/prepr-2024-71.

8. Рейтинг публикационной активности российских вузов, 2024. – URL: <https://acexpert.ru/publications/rating/reiting-publikatsionnoi-aktivnosti-rossiiskikh-vuzov-2024>.
9. Аксенова Е.И. Оценка публикационной активности и анализ основных тематических кластеров в области управления здравоохранением / Е.И. Аксенова, П.И. Ананченкова, К.Ю. Тархов // Здравоохранение и фармацевтическая деятельность. Ремедиум, 2022. – Т. 26, – № 4. – DOI:10.32687/1561-5936-2022-26-4-331-340.
10. Тархов К.Ю. Анализ публикационной активности организаций столичного здравоохранения / К.Ю. Тархов, Е.И. Аксёнова // Здоровье мегаполиса, 2023. – Т. 4. – № 1. – С. 38-49. – DOI:10.47470/0044-197X-2023-67-5-374-381.
11. 2024 Аналитический отчет по публикационной активности российских специалистов на конференциях в области искусственного интеллекта уровня А* за период с 2019 г. по 2023 г. Часть 1, НЦРИИ. – URL: <https://ai.gov.ru/knowledgebase/>.
12. Аналитический отчет о публикационной активности журнала за 2022 год. – URL: http://www.salogistics.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=253&Itemid=302.
13. Ермаков А.В. Некоторые проблемы при регистрации даты публикации в Crossref / А.В. Ермаков // Научный сервис в сети Интернет: труды XXIV Всероссийской научной конференции (19-22 сентября 2022 г., онлайн). – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2022. – С. 179-182. – DOI:10.20948/abrau-2022-21.
14. Регистрационная форма автора в издательстве MDPI. – URL: <https://susy.mdpi.com/user/edit>.
15. Информационные и математические технологии в науке и управлении. – URL: <https://www.imt-journal.ru/>.
16. Полилова Т.А. Рейтинги журналов в РИНЦ как инструменты анализа и влияния / Т.А. Полилова // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2021. – № 40. – 35 с. – DOI:10.20948/prepr-2021-40.
17. Полилова Т.А. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша в диаграммах Science Space / Т.А. Полилова // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2022. – № 27. – 38 с. – DOI:10.20948/prepr-2022-27.

Ермаков Алексей Викторович. Кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, AuthorID: 99939, SPIN: 5405-3487, ORCID:0000-0002-6054-0813, Ermakov@Keldysh.ru, 125047, Москва, Миусская пл. д.4.

UDC 001.891.5

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.015

Analytical statistics of scientific publications on Scilit (using the example of publications by ISEM SB RAS)

Alexey V. Ermakov

Keldysh institute of applied mathematics RAS,
Russia, Moscow, Ermakov@Keldysh.ru

Abstract. The paper examines issues related to the presentation of information on publications of scientific employees of ISEM SB RAS, as well as on scientific publications of the Institute in information and analytical materials of the Scilit system. Specific examples show the advantage of complete and correct setting of metadata for scientific publications, as well as the problems that arise when handling bibliographic information carelessly.

Keywords: analytical statistics, bibliographic databases, publication metadata, Scilit

References

1. Foursov K.S. Osnovnyye pokazateli publikatsionnoy aktivnosti [Main indicators of publication activity]. Available at: <https://issek.hse.ru/news/204169185.html>
2. Revyakin Y.G. Vozmozhnosti web-analitiki dlya otsenki effektivnosti nauchnykh publikatsiy [The opportunities of web-analysis to estimate the effectiveness of scientific publications]. KIAM Preprint, Moscow, 2020, no. 50, DOI:10.20948/prepr-2020-50.
3. Naprawski Th. The impact of web analytics tools on knowledge management. 27th International conference on knowledge-based and intelligent information & engineering systems, DOI:10.1016/j.procs.2023.10.335.
4. Informatsionno-analiticheskaya sistema SCIENCE SPACE [Information and analytical system SCIENCE SPACE]. Available at: https://elibrary.ru/projects/science_space/science_space_info.asp.

5. API unifitsirovannykh resursov CrossRef [Crossref unified resource API]. Available at: <https://api.crossref.org/swagger-ui/index.html>.
6. Platforma-agregator dlya nauchnykh publikatsiy Scilit [Content aggregator platform for scholarly publications]. Available at: <https://www.scilit.net>.
7. Ermakov A.V. Analiticheskaya statistika nauchnykh izdaniy na Scilit (na primere publikatsiy IPM im. M.V. Keldysha) [Analytical statistics of scientific publications on Scilit (using the example of Keldysh institute publications)]. KIAM Preprint, 2024, no. 71, DOI:10.20948/prepr-2024-71.
8. Reiting publikatsionnoy aktivnosti rossiyskikh vuzov [Rating of publication activity of Russian universities]. 2024, available at: <https://acexpert.ru/publications/rating/reiting-publikatsionnoi-aktivnosti-rossiiskikh-vuzov-2024>.
9. Aksenova E.I., Ananchenkova P.I., Tarkhov K.Yu. Otsenka publikatsionnoy aktivnosti i analiz osnovnykh tematicheskikh klasterov v oblasti upravleniya zdavookhraneniye [Assessment of publication activity and analysis of the main thematic clusters in the field of healthcare management]. Zdravookhraneniye i farmatsevticheskaya deyatel'nost'. Remedium [Healthcare and pharmaceutical activity. Remedium], 2022, vol. 26, no. 4. DOI:10.32687/1561-5936-2022-26-4-331-340.
10. Tarkhov K.Yu., Aksenova E.I. Analiz publikatsionnoy aktivnosti organizatsiy stolichnogo zdavookhraneniya [Analysis of publication activity of metropolitan healthcare organizations]. Zdorov'ye megapolisa [Megalopolis Health], 2023, vol. 4, no. 1, pp. 38-49, DOI:10.47470/0044-197X-2023-67-5-374-381.
11. 2024 Analiticheskiy otchet po publikatsionnoy aktivnosti rossiyskikh spetsialistov na konferentsiyakh v oblasti iskusstvennogo intellekta urovnya A* za period s 2019 g. po 2023 g. Chast' 1, NTSRII [2024 Analytical report on the publication activity of Russian specialists at conferences in the field of artificial intelligence at level A* for the period from 2019 to 2023. Part 1, NCRII]. Available at: <https://ai.gov.ru/knowledgebase/>.
12. Analiticheskiy otchet o publikatsionnoy aktivnosti zhurnala za 2022 god [Analytical report on the publication activity of the journal for 2022]. Available at: http://www.salogistics.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=253&Itemid=302.
13. Ermakov A.V. Nekotoryye problemy pri registratsii daty publikatsii v Crossref [Some problems when registering publication date in Crossref]. Nauchnyy servis v seti Internet: trudy XXIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (19-22 sentyabrya 2022 g., onlayn) [Scientific service & Internet: proceedings of the 24th All-Russian Scientific Conference (September 19-22, 2022, online)]. M, IPM im. M.V.Keldysha, DOI:10.20948/abrau-2022-21.
14. Registratsionnaya forma avtora v izdatel'stve MDPI [Registration form of the author in the publishing house MDPI]. Available at: <https://susy.mdpi.com/user/edit>.
15. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management]. Available at: <https://www.imt-journal.ru/>.
16. Polilova T.A. Reytinki zhurnalov v RINTS kak instrumenty analiza i vliyaniya [Journal ratings in the RSCI as tools for analysis and influence]. Preprinty IPM im. M.V.Keldysha [KIAM Preprint], 2021, no. 40, 35 p., DOI:10.20948/prepr-2021-40.
17. Polilova T.A. Preprinty IPM im. M.V.Keldysha v diagrammah Science Space [Keldysh Institute Preprints in the diagrams of the Science Space system]. Preprinty IPM im. M.V.Keldysha [KIAM Preprint], 2022, no. 27, 38 p., DOI:10.20948/prepr-2022-27.

Ermakov Alexey Viktorovich. Ph.D., senior researcher, Keldysh institute of applied mathematics RAS, AuthorID: 99939, SPIN: 5405-3487, ORCID: 0000-0002-6054-0813, Ermakov@Keldysh.ru, 125047, Russia, Moscow, Miusskaya Square 4,

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 11/18/2024; approved after reviewing 12/02/2024; accepted for publication 12/17/2024.

Организация подготовки практико-ориентированной выпускной квалификационной работы в ВУЗе

Никулина Наталья Олеговна¹, Старцева Елена Борисовна², Малахова Анна Ивановна²

¹МИРЭА – Российский технологический университет,

Россия, Москва, nick_nataly@rambler.ru

²Уфимский университет науки и технологий, Россия, Уфа

Аннотация. В статье обосновывается необходимость изменения существующих подходов к организации практики студентов технических вузов. Анализ результатов опроса студентов старших курсов и сотрудников технических вузов, в чьи обязанности входят организация и руководство различными видами производственных практик, а также публикаций в СМИ о проведении на местном, региональном и федеральном уровне мероприятий, посвященных проблемам наполнения рынка труда, показал необходимость решения задач целевой подготовки кадров на государственном уровне. Авторами предлагается изменение подхода к целевому обучению в вузах и переход к адресной подготовке специалистов для предприятий и организаций путем распределения студентов на производственную (в том числе, преддипломную) практику на конкурсной основе с учетом полученных ими знаний и навыков, а также текущих потребностей принимающего предприятия. Цель исследования – разработать подход к организации целевой подготовки специалистов, максимально приближенной к потребностям предприятий и отвечающей запросам выпускников, а также эффективной с точки зрения затрат на подготовку кадров. В рамках предложенного подхода разработан алгоритм распределения студентов на практику, новизна которого заключается в организации трехстороннего взаимодействия между вузами, предприятиями и студентами в процессе конкурсного отбора студентов на практику и возможностью дальнейшего трудоустройства выпускников на базах практики с использованием единой информационной платформы. Алгоритм, представленный в виде BPMN-модели, является основой формирования функциональных требований при проектировании информационной системы. Обосновывается необходимость онтологического моделирования делового процесса распределения студентов на практику с целью подготовки практико-ориентированной выпускной квалификационной работы, что позволит определить тезаурус понятий информационной системы и семантику отношений между ними.

Ключевые слова: потребность в кадрах, целевая подготовка, практика студентов, выпускная квалификационная работа, трудоустройство выпускников вуза, моделирование делового процесса, онтологическая модель, алгоритм взаимодействия, база знаний, информационная система

Цитирование: Никулина Н.О. Организация подготовки практико-ориентированной выпускной квалификационной работы в ВУЗе / Н.О. Никулина, Е.Б. Старцева, А.И. Малахова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 172-185. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.016.

Введение. С 2022 года экономика РФ испытывает потребность в кадрах практически во всех отраслях, особенно в области технических специальностей. Как показал опрос информационного сервиса *Superjob*, проведенный среди кадровых служб 1000 предприятий и организаций, 86% компаний жалуются на нехватку кадров [1]. По прогнозам аналитиков Министерства экономического развития РФ, такая ситуация через несколько лет может усугубиться, если уже сейчас не принять кардинальных решений на уровне государственного управления [2].

На расширенном заседании Президиума Государственного Совета в Великом Новгороде 21 сентября 2023 года [3] были обозначены приоритетные меры по развитию рынка труда в Российской Федерации, в том числе, по развитию дополнительного образования, а также качественному улучшению материально-технической базы образовательных учреждений среднего и высшего профессионального образования. Для того, чтобы понимать, в какую отрасль хозяйственной деятельности прежде всего необходимо направлять ресурсы, ежегодно будет формироваться пятилетний прогноз потребностей в кадрах на уровне экономики всей страны.

На его основе будут рассчитываться параметры подготовки кадров со средним и высшим профессиональным образованием. Такое планирование, в том числе, учитывающее результаты рейтингов образовательных организаций с точки зрения трудоустройства их выпускников, начнется уже с 2025/2026 учебного года, поэтому необходимо принимать не только стратегические решения по повышению качества образования в колледжах, техникумах и вузах, но и делать образование уже сейчас практико-ориентированным, чтобы ускорить адаптацию молодого специалиста на рабочем месте.

1. Необходимость пересмотра подходов к практической подготовке студентов вузов.

В настоящее время весьма остро стоит вопрос о слабой практической подготовке выпускников вузов к работе на предприятиях реального сектора экономики сразу после окончания курса обучения. Далеко не все вчерашние студенты, несмотря на полученный диплом о высшем образовании, могут в течение испытательного срока «на деле» показать необходимые навыки и умения. 85% работодателей говорят о необходимости улучшить практическую подготовку студентов [4]. Студенты проводят 4-5 лет в аудиториях, в то время как профессиональные навыки на рабочем месте формируются в течение нескольких месяцев и зачастую не требуют высшего образования. Однако практике подготовки кадров со средним профессиональным образованием в нашей стране был нанесен серьезный урон непродуманными реформами, и только недавно началась работа по ее возрождению.

Эти вопросы широко обсуждались на прошедшей в июле 2023 года Международной выставке «Иннопром-2023». Министр образования и науки РФ Валерий Фальков отметил, что цель сегодняшней работы – совместно с вузами и крупнейшими работодателями посмотреть на критерии эффективности в образовании, которые необходимы реальному сектору, выслушать мнения представителей бизнеса и прийти к пониманию дальнейших действий [5]. Им были предложены несколько критериев эффективности образования, среди которых:

- востребованность университета или образовательной программы;
- взаимодействие университета с работодателями (это интегральный показатель, который включает в себя возможность привлекать специалистов компаний-партнеров не только к участию в итоговой аттестации в качестве членов государственных экзаменационных и аттестационных комиссий, но и к составлению и реализации образовательных программ);
- востребованность выпускников на рынке труда;
- возможность и умение университетов на основе унифицированных стандартов готовить квалифицированных специалистов с учетом потребностей рынка труда, гибкость вузов в этом аспекте;
- уровень удовлетворенности обучением студентов и преподавателей, в том числе на этапе обновления системы высшего образования.

Безусловно, решение поставленных задач должно опираться на научные подходы к цифровизации деловых процессов и поддерживаться использованием современных информационных и интеллектуальных технологий, обуславливающих прозрачный и эффективный процесс подготовки кадров [6-8].

Процесс подбора молодых специалистов в настоящий момент непрозрачен для обеих сторон. Для предприятия он затрудняется отсутствием информации о конкретном студенте, а для студента – отсутствием обозримого перечня задач, в которых он может проявить себя, как специалист соответствующего профиля.

Отчасти эту проблему решают базовые кафедры, но их количество невелико и ограничено в основном техническими специальностями, но даже среди технических специальностей

контингент студентов, обучающихся на базовых кафедрах, составляет не более 10-15 % от общего количества.

2. Оценка существующего подхода к практической подготовке студентов вузов.

В современные учебные планы подготовки бакалавров и специалистов в вузах практика студентов входит в объеме 10% от общего количества зачетных единиц, необходимых для получения диплома о высшем образовании. Формы и периоды проведения практик могут различаться в зависимости от вузов и направлений подготовки, но есть и общие свойства – небольшой период прохождения и разрозненность во времени.

В некоторых вузах предпринимаются попытки совместить практическую подготовку с учебным процессом, организуя так называемую «включенную» или «распределенную» практику, когда студентам один раз в неделю включается в расписание прохождения производственной или учебной практики. Невероятно трудно найти предприятие, которое согласилось бы на таких условиях принимать на практику студентов. Практикант, приходящий раз в неделю, не может быть задействован в рабочих процессах, так как очень сложно найти задачи, которые можно полностью выполнить в течение одного дня или откладывать их выполнение на неделю. Кроме того, студент, приходящий на практику, имеет задание от кафедры вуза, не учитывающее специфику предприятия. Поэтому такая «включенная» практика сводится к выполнению задач в стенах вуза либо на гипотетическом типовом предприятии, информация о котором собирается на просторах интернета, что, конечно, никак не влияет на приобретение практических навыков. Ситуацию спасают базовые кафедры, но лишь отчасти ввиду их небольшого количества.

Конечно, на последнем курсе прохождения обучения у студентов любой образовательной программы предусмотрена преддипломная практика, но даже эта небольшая преддипломная практика, организуемая в течение 2-6 недель подряд, не дает желаемого эффекта из-за отсутствия мотивации у большей части студентов и у кураторов практики на предприятии. Проблема заключается в краткосрочности практики и в малой вероятности того, что студент вернется на это предприятие в качестве сотрудника после выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) и получения диплома. Опрос выпускников Института информатики, математики и робототехники Уфимского университета науки и технологий в 2023 году показал крайне малый процент трудоустройства студентов на базах практик (рис. 1). Преддипломная практика скорее направлена на сбор исходной информации для написания ВКР, и, к сожалению, крайне мал процент выпускников, которых действительно приглашают для дальнейшего трудоустройства по месту практической подготовки.



Рис. 1. Результаты опроса выпускников вуза

В ряде вузов в связи с изменением учебных планов бакалавриата и магистратуры все виды практик объединены и осуществляются в последнем семестре обучения непосредственно перед защитой ВКР. Это позволяет студентам выбирать базу практики один раз, учитывая полученные навыки и предпочтения при выборе места работы. В этом подходе тоже есть свои сложности, связанные с тем, что «без пяти минут специалист» зачастую впервые знакомится с деятельностью реального предприятия и ему также требуется адаптация к новым условиям.

Кроме того, проблему практической подготовки студентов вузов усугубляют бюрократические процедуры, требующие оформления достаточно большого объема документов, как со стороны вуза, так и со стороны предприятия, принимающего на практику студентов. И если в вузах к бумажному валу уже привыкли и принимают его как неизбежность, то на производственных предприятиях такая ситуация вызывает вполне понятное отторжение и раздражение тем, что отвлекает ключевых сотрудников от основной работы. Еще более осложняет положение то, что согласно приказу Министерства науки и высшего образования РФ №885/390 от 05.08.2020, руководителем практики от производственного предприятия должен быть назначен сотрудник, имеющий образовательный ценз, т.к. руководство практикой приравнивается к педагогической деятельности [9]. Предъявление совокупности вышеуказанных требований к потенциальным базам практики вызывает несколько последствий:

- предприятия не берут на практику студентов, отказываясь подписывать договор, так как понимают, что не в состоянии выполнить его условия;
- вузы, понимая невозможность реального распределения всех студентов на производственные предприятия, организуют практику в дистанционном формате, засчитывая за ее результаты различные виды деятельности, в том числе, участие в различных конкурсах, олимпиадах, волонтерских мероприятиях, прохождение обучающих курсов и стажировок, которые, безусловно, несут пользу студентам, но чаще всего к реальной практике не имеют отношения;
- студенты самостоятельно ищут место прохождения практики, где им предоставят хоть какую-то информацию для написания отчета и оформят требуемые документы, а вузы вынуждены «закрывать глаза» на то, что большая часть этих предприятий не может обеспечить прохождение практической подготовки в соответствии с программой практики, закрепленной в Основной профессиональной образовательной программе (ОПОП) соответствующей специальности.

Понятно, что в рыночных условиях, когда предприятиям часто приходится выживать, тратить силы и время на студентов, не приносящих сиюминутную выгоду, попросту нецелесообразно. Только крупные предприятия могут себе позволить планировать кадровую политику в перспективе 3-5 лет, взвешенно оценивая необходимость привлечения студентов на практику с последующим трудоустройством. При этом, по статистике вузов, 80% предприятий, берущих студентов на практику, являются малыми. В лучшем случае, на таком предприятии работают близкие родственники или знакомые студента, и он может получить полезный ему профессиональный опыт, а предприятие – помощь в решении несложных текущих задач. Во многих случаях нужные для прохождения промежуточной аттестации документы (договор, отчет по практике, дневник практики и т.д.) оформляются по договоренности, однако реальной практической подготовки для будущей профессиональной деятельности студент не получает.

3. Новые подходы к организации подготовки специалистов в вузе. Решить обозначенные проблемы можно двумя способами:

- через развитие подхода к целевому обучению студентов;

– через подготовку практико-ориентированной ВКР, когда студент распределяется на практику длительностью не менее 4 месяцев подряд на конкурсной основе или на основе собеседования.

3.1. Изменение подхода к целевому обучению. Целевое обучение, без сомнения, приносит свои плоды, но достаточно сильно растянута во времени, что в современных условиях для предприятий неэффективно. Кроме того, при использовании этого подхода есть свои сложности, связанные с серьезным изменением правил приема на обучение в вуз по целевому направлению. Сейчас для абитуриентов, поступающих по целевому направлению от предприятий, организуется отдельный конкурс, который проводится до основного набора первокурсников. В случае успешного поступления такие студенты, согласно договору, обязаны проходить практики в течение всего срока обучения на том предприятии, которое выдало целевое направление. В идеале возникает обоюдная заинтересованность сторон в качественном прохождении практики. Но таких студентов не более 10% от числа принятых на бюджетную форму обучения, а с учетом количества студентов, обучающихся на платной основе, процент «целевиков» от общего числа студентов становится еще меньше.

Кроме того, современные реалии таковы, что у абитуриентов с целевыми направлениями более низкие баллы. Не секрет, что часть таких студентов отчисляется в связи с неуспеваемостью и не получает диплом, а предприятие теряет потенциальных сотрудников, на обучение которых потрачены средства и время. Следует заметить, что в подавляющем большинстве случаев решение о поступлении по целевому направлению за абитуриента принимают родители, так как у старшеклассника нет еще жизненного опыта, да и оформление документов требует знаний и времени [10]. С другой стороны, и у предприятий нет понимания того, какие специалисты и в каком количестве им понадобятся через 4-5 лет (да и само предприятие может быть реорганизовано или закрыто). При современных темпах изменений во всех сферах деятельности 4-5 лет – неприемлемый срок для планирования штатного расписания.

Поэтому, авторы предлагают вопросы с целевыми направлениями от предприятий решать за год до окончания обучения, когда у студентов сложилось представление о будущей профессии, есть необходимая теоретическая база и сформированы определенные компетенции, которые нужно подкрепить практическими навыками и умениями. Более того, при переходе на 5-летнюю форму обучения такой подход – это самое логичное завершение образования. Еще одним преимуществом использования такого подхода является сокращение срока целевого обучения, что существенно экономит финансовые средства и гарантирует их отдачу в виде подготовленного дипломированного выпускника. Студенты по окончании вуза будут иметь гарантированное рабочее место в течение 1-3 лет (время обязательной отработки на предприятии после получения диплома указывается в договоре на целевое обучение), что позволяет получить необходимый для дальнейшей карьеры опыт работы.

3.2. Организация подготовки практико-ориентированной ВКР. Этот подход рассчитан на более широкий круг заинтересованных сторон и охватывает всех студентов, перешедших на последний курс базового обучения (4-й для бакалавриата и 5-й для специалитета) независимо от формы обучения, и предприятия, испытывающие потребность в специалистах определенного профиля на горизонте от 6 месяцев.

Предлагаемый подход предполагает организацию открытого конкурсного отбора в несколько этапов. На первом этапе предприятия с помощью информационной платформы выставляют свои требования к потенциальным практикантам, перечень производственных и/или бизнес-процессов и проектов, в которых предполагается участие студентов (аналог – платформа «Профстажировки»), студенты представляют свои портфолио (включая резюме, средний балл, выполненные курсовые проекты и др. информацию), а вузы – краткую информацию об ожидаемых компетенциях выпускников по соответствующим направлениям подготовки.

На втором этапе организуется собеседование со студентами, прошедшими первичный конкурсный отбор, с целью выявления их предпочтений и узкоспециализированных навыков для прикрепления к конкретным рабочим местам. После прохождения отбора студенты получают место практики и задание, совмещающее цели обучения с целями предприятия и наполненное конкретными задачами, выполнение которых полезно в первую очередь для предприятия.

Итоги такого взаимодействия приносят ощутимую пользу всем участникам:

- студентам: студенты выпускных курсов выполняют практикоориентированную выпускную квалификационную работу на материале предприятия с возможностью внедрения ее результатов в производственные или бизнес-процессы и, возможно, получают приглашение на работу;
- вузам: руководители ВКР (преподаватели кафедр вуза) вместе со студентами взаимодействуют с представителями реального сектора экономики при решении конкретных задач, что можно расценивать как повышение квалификации в профессиональной деятельности, а администрация вуза получает отлаженный и прозрачный механизм распределения студентов на практику в соответствии с направлениями подготовки, а также новых партнеров в лице производственных предприятий;
- предприятиям: руководство предприятий получает возможность в течение нескольких месяцев подготовить специалиста под конкретные задачи, имеет преимущественное право выбора лучших выпускников с целью приглашения их на работу.

Трехстороннее взаимодействие между участниками процесса распределения на преддипломную практику основано на Положениях о практической подготовке, разработанных в каждом вузе в соответствии с требованиями Министерства науки и высшего образования РФ. В настоящее время каждый вуз имеет свой круг предприятий-партнеров, куда традиционно направляются студенты для прохождения практики (включая предприятия, при которых функционируют базовые кафедры) [11]. Как правило, с этими предприятиями подписаны долгосрочные договоры о сотрудничестве, но, как было сказано выше, количество мест для практики на таких предприятиях обычно существенно меньше количества студентов-практикантов.

Авторы предлагают алгоритм распределения на производственную практику с целью подготовки практико-ориентированной выпускной квалификационной работы, учитывающий целевую подготовку будущих выпускников для работы на выбранном предприятии. Прежде всего, алгоритм затрагивает студентов, обучающихся на технических, экономических, естественно-научных специальностях, требующих прохождения практики на предприятиях промышленности, в ИТ-компаниях, организациях и учреждениях, испытывающих потребности в производственном персонале.

Условно в описании алгоритма принято, что практика студентов осуществляется в последнем семестре обучения, а после ее окончания следует государственная итоговая аттестация в форме защиты ВКР.

1. Образовательные организации размещают на едином информационном портале информацию о выпускаемых направлениях (специальностях), сроках прохождения практической подготовки студентами данных направлений (специальностей), а также сжатый и понятный набор минимальных профессиональных компетенций, которыми должны обладать студенты к выпускному курсу.

2. Предприятия и организации подают заявки оператору информационной системы (это может быть Минцифры РФ) для получения доступа к единому информационному сервису и включения в перечень (это делает служба персонала предприятия, у предприятий уже могут быть заключены «рамочные» договоры на организацию практики студентов).

3. Студенты предвыпускного курса (3-го курса бакалавриата, 4-го курса специалитета) за год до начала государственной итоговой аттестации заполняют резюме с целью прохождения преддипломной практики на предприятиях/организациях, которые входят в перечень, принимающих студентов на практику. Резюме должно иметь стандартизованный вид, заполняемый по шаблону.

4. В течение 3 месяцев представители предприятий просматривают резюме студентов, а также информацию о сроках и программах практик, отбирают кандидатов и проводят собеседования. Предприятия могут составлять ранжированный список на случай, если выбранный студент откажется от приглашения и тогда можно будет пригласить следующего в списке (или место останется незанятым).

5. В начале последнего для студентов учебного года, через информационный сервис, предприятия извещают студентов о своем решении принять их на практику.

6. В течение месяца после получения приглашения студент должен принять решение о том, на каком предприятии он будет проходить практику (если приглашений было несколько или если он решил проходить практику по своему выбору, например, в университете или на предприятии, не входящем в предложенный перечень). После принятия решения он через информационный сервис извещает предприятия о принятии или отклонении приглашения.

7. После получения извещения от студентов предприятия за 3 месяца до даты начала практики предоставляют в университеты списки студентов, которых они отобрали в качестве практикантов.

8. За 1 месяц до начала практики университеты заключают с предприятиями договоры на практику студентов или оформляют официальные письма-направления на практику при наличии действующих долгосрочных (в среднем на пять лет) соглашений о сотрудничестве.

9. По результатам заключенных договоров университеты и предприятия формируют приказы на практику, назначая соответствующих руководителей, согласовывают и выдают задания на практику.

10. Студент в процессе практики накапливает материал для подготовки выпускной квалификационной работы, консультируясь со специалистами на базе практики. По результатам прохождения практики и защиты ВКР руководство предприятия может предложить ему трудоустройство. Информация о трудоустроенных по результатам практики и выполнения ВКР студентах появляется на информационном портале, что существенно облегчает вузам сбор сведений о трудоустройстве своих выпускников. Этот показатель является одним из важнейших при определении рейтинга вузов [12].

Алгоритм предлагаемого трехстороннего взаимодействия в виде динамической модели в нотации BPMN 2.0 представлен на рис. 2.

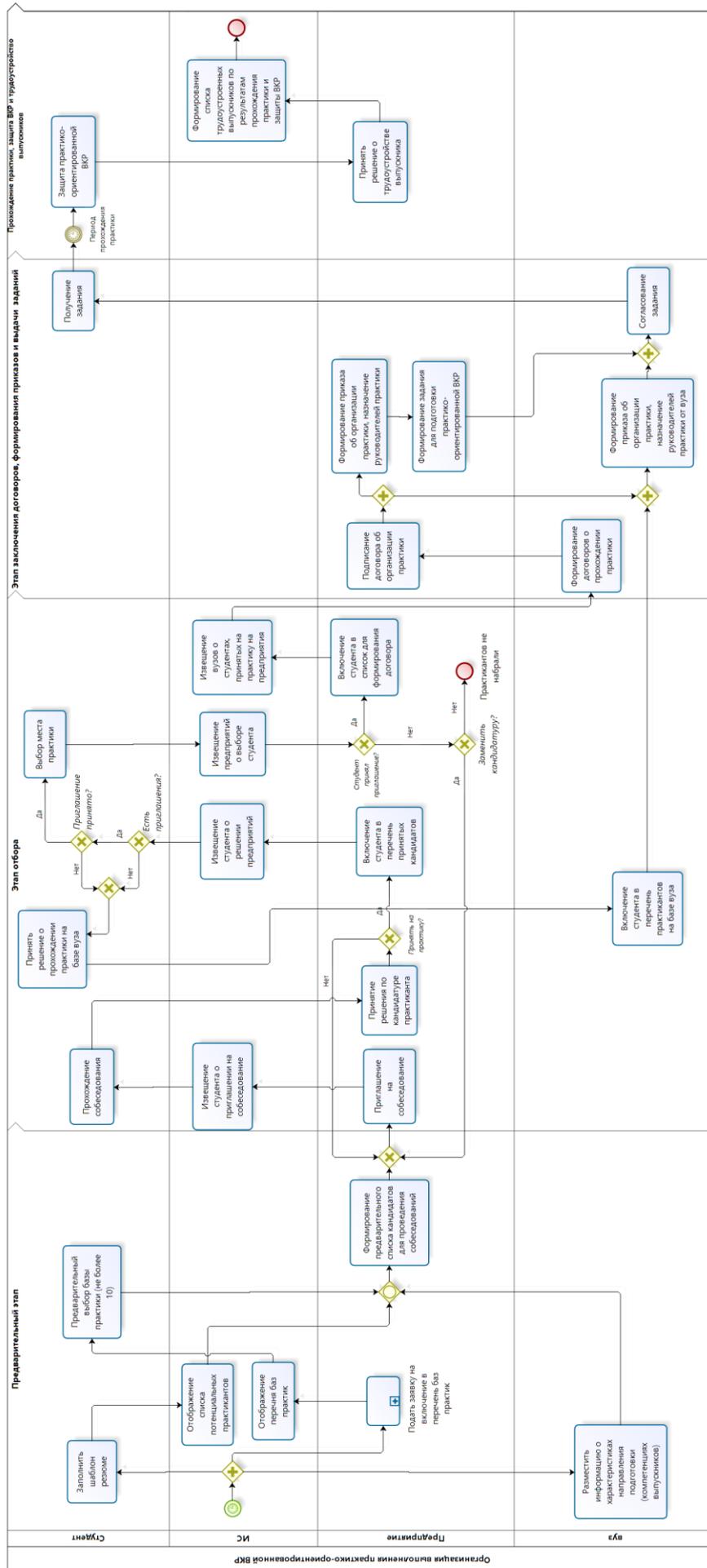


Рис. 2. Взаимодействие участников процесса организации подготовки практико-ориентированной ВКР

4. Онтологическое моделирование взаимодействия участников процесса распределения на практику. Необходимым условием для реализации предложенного алгоритма является наличие единой информационной платформы, на которой будут представлены вузы и предприятия, и к которой могут обращаться студенты, заинтересованные в трудоустройстве по окончании обучения. Разработанный алгоритм позволяет сформировать функциональные требования для информационной системы, являющейся основой такой платформы, определить ее ролевую структуру. Для разработки информационного обеспечения предлагаемой системы необходимо определить информационные элементы. Наиболее предпочтительным способом описания семантики трехстороннего взаимодействия участников процесса распределения на практику на базе ИС является онтологическое моделирование исследуемой предметной области (рис. 3).

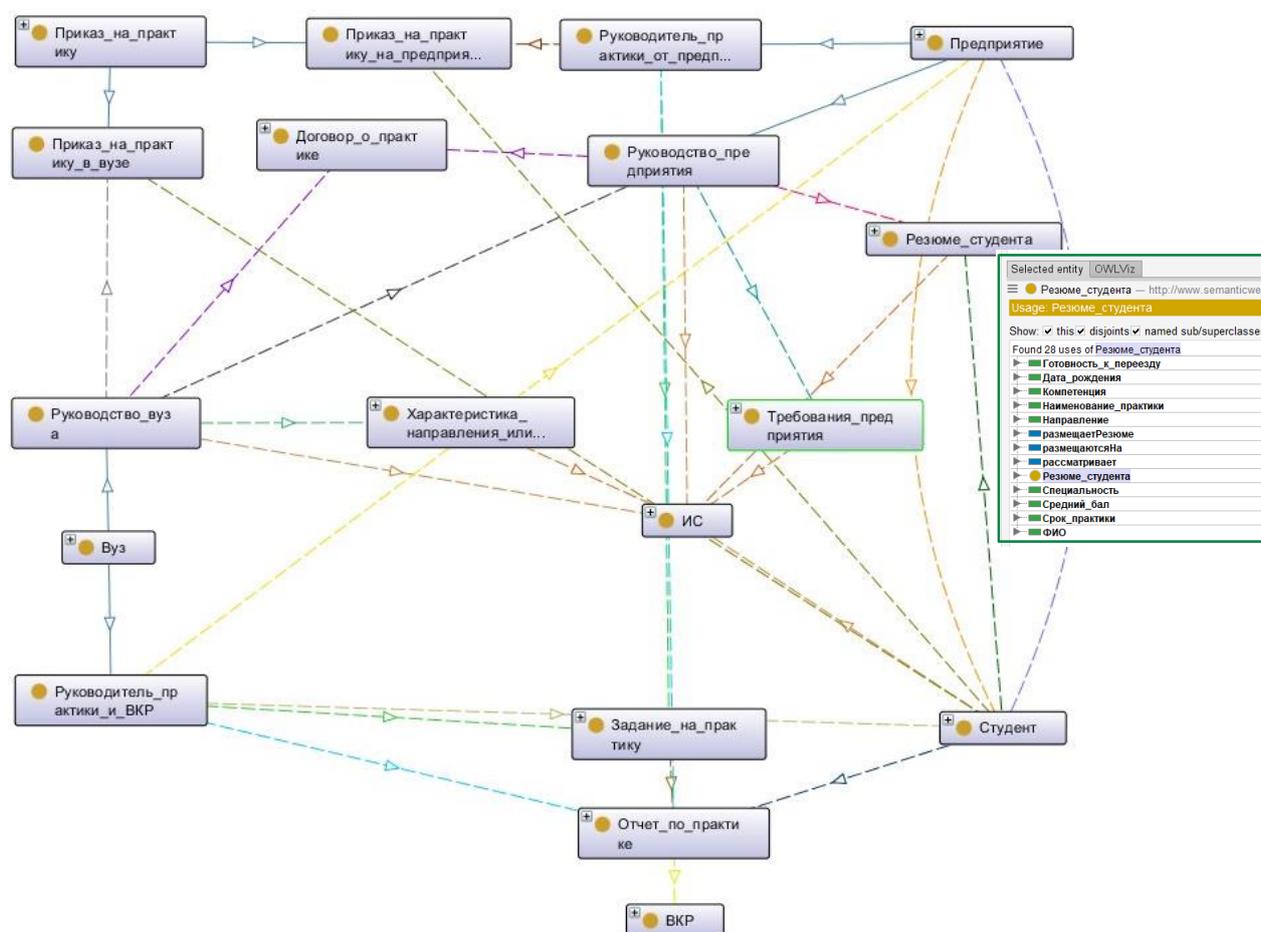


Рис. 3. Фрагмент онтологической модели взаимодействия участников процесса организации подготовки практико-ориентированной ВКР

Наполненная онтология предметной области рассматривается, как интеллектуальный компонент в системе управления деловым процессом и является динамическим компонентом управления, используемым для поиска необходимых знаний при переходе от исследования одной конкретной задачи управления к другой [13, 14].

Для разработки онтологической модели был использован язык OWL (Web Ontology Language), в соответствии с которым онтология представлена в виде набора элементов (1):

$$Onto = \langle C, R, Pr, V, I, A, D \rangle, \quad (1)$$

где C – множество классов $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ и их интерпретаций в определенной области знаний;

R – множество отношений $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$; примеры бинарных отношений: «*is an instant of*» («быть экземпляром класса»), «*subclass of*» («подкласс класса»), «*part-of*» («быть частью»), «*is consequent*» («следовать за»), «*connected to*» («связанный с»);

Pr – свойства классов;

V – значения свойств; в *OWL* существует разделение свойств на два класса: объектные свойства (экземпляры класса *owl:ObjectProperty*), и свойства типов данных (экземпляры класса *owl:DatatypeProperty*);

I – множество экземпляров класса $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, определяется при помощи аксиом и определения конкретных свойств классов (так называемых фактов);

A – множество аксиом $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$;

D – множество алгоритмов вывода на онтологии $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$.

Для синтеза результатов и построения онтологии использовался редактор онтологий *Protégé 5.5.0* (рис. 3).

Онтология, с одной стороны, позволяет определить ролевую структуру участников взаимодействия на базе ИС и выстроить четкую терминологию предметной области [13, 15].

С другой стороны, онтологическая модель позволяет рассмотреть, как участники платформы будут взаимодействовать в ходе всего процесса распределения на практику, начиная с момента размещения вузами информации о направлениях и практической подготовке, а предприятиями – требований к кандидатам, заканчивая оформлением договоров и приказов по организации практики для студентов, прошедших отбор.

С третьей стороны, онтологическая модель будет хранить подробное атрибутивное описание понятий предметной области, позволяющее определить, какую именно информацию, к примеру, будет содержать в себе резюме студента или требования предприятия к кандидатам на прохождение целевой практической подготовки. Это позволит, используя современные теоретические подходы к организации интеллектуальных информационных систем и соответствующий инструментарий [16], более тщательно анализировать требования предприятий к практикантам и корректировать формулировки компетенций выпускников в образовательных программах.

Заключение. Предприятия всегда были заинтересованы в подборе высококвалифицированных специалистов, об этом свидетельствует тот факт, что более 970 только башкирских предприятий в 2023 году выставили около 13 тысяч вакансий на Всероссийской ярмарке трудоустройства «Работа в России. Время возможностей». И это данные только одного федерального этапа, такие этапы были параллельно организованы во всех городах страны. Участие во Всероссийской ярмарке трудоустройства ежегодно принимают как малые предприятия, так и крупные холдинги. Некоторые из них представляют не только вакансии, но и показывают, как выстроена система подготовки кадров [11, 13].

В настоящий момент существуют несколько ресурсов по поиску работы, хорошо зарекомендовавшие себя и у соискателей, и у работодателей. По тому же принципу предлагается организовать взаимодействие потенциальных практикантов и представителей баз практик. Отличием подхода к организации практики является возможность трехстороннего взаимодействия – студент, вуз и база практики, т.к. вуз должен отслеживать соблюдение требований ФГОС по соответствующей специальности или направлению подготовки, а предприятие должно иметь возможность принимать участие в разработке программ практик и, при необходимости, корректировке программ обучения [17].

Результаты опроса студентов Института информатики, математики и робототехники Уфимского университета науки и технологий показали, что подавляющему большинству студентов интересна информационная система, предлагающая варианты баз практики с учетом

предпочтений студента и навыков, полученных в процессе обучения. В исследовании специалистов Высшей школы экономики делается вывод о том, что студенты в последние годы выбирают вуз, исходя из возможности трудоустройства после его окончания [18]. Аналогичные результаты показывает и аналитика социальных сетей [19]. Поэтому информационный ресурс, позволяющий расширить диапазон предлагаемых вузом мест прохождения практики, вызовет большой интерес в студенческой среде.

Мы считаем, что в этой информационной системе будут заинтересованы профильные министерства и ведомства, такие, как Министерство науки и высшего образования РФ, Министерство труда и социальной защиты РФ и Федеральная служба по труду и занятости. Ввиду быстрого изменения ситуации на рынке труда и сложности в прогнозировании количества рабочих мест для различных специальностей мы считаем, что предлагаемая система позволит вузам планировать и организовывать трудоустройство своих выпускников в требуемом объеме. В то же время для предприятий эта система позволит оценивать потенциальных сотрудников во время практики и получать в качестве работников подготовленных к конкретному рабочему процессу специалистов.

Таким образом, с использованием информационной системы целевой подготовки кадров становится возможным важную роль отвести адресной подготовке будущих специалистов, встроенной в образовательный процесс.

Список источников

1. Исследовательский центр портала Superjob.ru. – URL: <https://www.superjob.ru/research/articles/114440/kadrovuj-golod-chasche-vsego-ispytyvayut-transportnye-i-proizvodstvennye-predpriyatiya/> (дата обращения: 23.01.2024).
2. Портал РБК. – URL: <https://www.rbc.ru/economics/10/10/2023/6523c4ee9a794707a1f0a07c> (дата обращения: 13.01.2024).
3. Сайт Администрации Президента России. Стенограмма расширенного заседания Президиума Государственного Совета. – URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/72319> (дата публикации: 21.09.2023; дата обращения: 10.12.2023).
4. Электронный портал газеты «Ведомости». – URL: <https://www.vedomosti.ru/management/articles/2023/07/12/984879-85-rabotodatelei-govoryat-o-neobhodimosti> (дата обращения: 07.09.2023).
5. Сайт Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. – URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/70415/> (дата обращения: 10.09.2023).
6. Никулина Н.О. Применение информационных технологий в процессах взаимодействия организаций / Н.О. Никулина, А.В. Ибрагимов // XVIII Международная научная конференция «Управление экономикой: методы, модели, технологии»: труды. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2018. – С. 328-331.
7. Ярмухаметова Г.И. Применение информационных технологий в образовательных процессах / Н.О. Никулина, Г.И. Ярмухаметова // XIV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых. Материалы Всероссийской научной конференции в 3 т. (Вологда, 24-27 ноября 2020 г.), 2020. – Т. 1. – С. 170-174.
8. Массель Л.В. Цифровизация и современные тренды искусственного интеллекта / Л.В. Массель // Актуальные вопросы аграрной науки, 2022. – № 45. – С. 48-64.
9. Трудовой Кодекс Российской Федерации. Статья 331 «Право на занятие педагогической деятельностью» от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 14.02.2024).
10. Startseva E., Grimaylo A., Chernyahovskaya, L. et al.. Ontology based decision support in career choice. 2019 XXI International conference complex systems: control and modeling problems (CSCMP), DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976531.
11. Дорохова Т.Ю. Региональная система целевой подготовки специалистов в вузе: монография / Т.Ю. Дорохова, Н.П. Пучков. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2021. – 132 с.
12. Startseva E.B., Grimaylo A.Yu., Dracheva I.V. et al. Detecting major factors for university success. Systems engineering and information technologies, 2020, vol. 2, no. 2 (4), pp. 25-35.
13. Черняховская Л.Р. Методы и модели поддержки принятия решений при управлении инновационными проектами в производственно-экономических системах / Л.Р. Черняховская, В.И. Васильев, В.Е. Гвоздев и др. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2021. – 230 с. – DOI 10.17513/np.437.

14. Ерженин Р.В. Онтологический подход к представлению знаний о методологии моделирования сложной системы управления / Р.В. Ерженин Р.В., Л.В. Массель // Онтология проектирования, 2020. – Т. 10. – № 4 (38). – С. 463-476.
15. Шпак М.А. Онтология как посредник между пользователем и информационной системой / М.А. Шпак // Молодежный научный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – №6. – С. 13-18.
16. Николаев И.Е. Метод извлечения знаний и навыков/компетенций из текстов требований вакансий / И.Е. Николаев // Онтология проектирования, 2023. – Т.13. – №2(48). – С.282-293. – DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-282-293.
17. Асанов А.З. Прогнозирование востребованности компетенций при корректировке программ обучения с помощью когнитивных моделей / А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина, Л.Ю. Грудцына // Онтология проектирования, 2019. – Т.9. – №2(32). – С.203-213. – DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-2-203-213.
18. Сайт НИУ ВШЭ. – URL: <https://www.hse.ru/news/science/850278408.html> (дата обращения 02.12.2023).
19. Деканова Н.П. Анализ социальных сетей – поддержка абитуриентов в профессиональной ориентации / Н.П. Деканова, С.А. Махнев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – № 4 (16). – С. 131-141. – DOI:10.25729/2413-0133-2019-4-11.

Никulina Наталья Олеговна. Доцент базовой кафедры автоматизированных систем организационного управления МИРЭА – Российского технологического университета, методист Научно-учебного департамента ФГАУ НИИ «Восход». Научные интересы: исследования в области управления проектами, системного моделирования и проектирования информационных систем в организационном управлении. AuthorID (РИНЦ): 396597, SPIN: 5395-1463, ORCID 0000-0002-8594-2093, Author ID (Scopus): 57218643085, Researcher ID (WoS): AAX-8251-2020, nick_nataly@rambler.ru, 119454, г. Москва, пр. Вернадского, 78.

Старцева Елена Борисовна. Доцент кафедры автоматизированных систем управления. Научные интересы: системное моделирование и проектирование информационных систем, системный анализ, поддержка принятия решений, интеллектуальные технологии управления знаниями в различных прикладных областях. Область научных интересов: разработка интеллектуальных систем поддержки принятия решений. AuthorID (РИНЦ): 143639, SPIN:7621-1551, ORCID 0000-0003-3139-050X, star_elena@list.ru, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Малахова Анна Ивановна. К.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления. Научные интересы: системный анализ, управление и обработка информации, интеллектуальные технологии управления знаниями в различных прикладных областях. Область научных интересов: разработка интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Author ID (RSCI): 1005748, SPIN: 2382-5254, ORCID 0000-0003-0099-3594, Author ID (Scopus): 57224350806, Researcher ID (WoS): ABC-8039-2020, aimalakhova@gmail.com, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

UDC 378.147.88+004.94

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.016

Organizing a practice-oriented final qualification work preparation at the university

Natalia O. Nikulina¹, Elena B. Startseva², Anna I. Malakhova²

¹MIREA – Russian technological university,
Russia, Moscow, nick_nataly@rambler.ru

²Ufa university of science and technology, Russia, Ufa

Abstract. The article substantiates a need to change the existing approaches to organizing the students practice in technical universities. The results of survey analysis of senior students and employees, whose responsibilities include organization and management of various types of production practices, at technical universities, as well as publications in media about holding events at the local, regional and federal levels on the problems of filling the labor market, showed the need to solve the tasks of targeted training at the state level. The authors propose to change the approach to targeted education in universities and turn to targeted training of specialists for enterprises and organizations by allocating students to industrial (including pre-graduate) practice on a competitive base,

taking into account their knowledge and skills, as well as the current needs of the receiving enterprise. A purpose of the research is to develop an approach to organizing a targeted training of specialists, as close as possible to the needs of enterprises and meeting the needs of graduates, as well as effective in terms of training costs. Within the proposed approach, an algorithm for allocating the students to practice has been developed, the novelty of which lies in organization of the trilateral interaction between universities, enterprises and students within the process of students competitive selection for practice and a possibility of graduates further employment on the practice bases using a single information platform. The algorithm, presented in the form of a BPMN model, is the basis for generating the functional requirements to the information system. A necessity of ontological modeling of the students practice allocating business process for preparing a practice-oriented final qualification work, which will allow determining the thesaurus of information system concepts and semantic relations between them, is substantiated.

Keywords: personnel need, targeted training, student practice, final qualification work, employment of university graduates, business process modeling, ontological model, interaction algorithm, knowledge base, information system

References

1. Issledovatel'skij centr portala Superjob.ru [Research Center of Superjob.ru]. Available at: <https://www.superjob.ru/research/articles/114440/kadrovyy-golod-chasche-vsego-ispytyvayut-transportnye-i-proizvodstvennye-predpriyatiya/> (accessed date: 01/23/2024).
2. Portal RBC [The RBC portal]. Available at: <https://www.rbc.ru/economics/10/10/2023/6523c4ee9a794707a1f0a07c> (accessed: 01/13/2024).
3. Sait Administracii presidenta Rossii. Stenogramma rasshirennogo zasedaniya Gosudarstvennogo Soveta [Administration of the President of Russia website. Transcript of the extended meeting of the Presidium of the State Council, September 21, 2023]. Available at: <http://kremlin.ru/events/president/news/72319> (accessed: 12/10/2023).
4. Elektronnyj portal gazety Vedomosti [Vedomosti newspaper electronic portal]. Available at: <https://www.vedomosti.ru/management/articles/2023/07/12/984879-85-rabotodatelei-govoryat-o-neobhodimosti> (accessed: 09/07/2023).
5. Sait Ministerstva nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii [The Ministry of science and higher education of the Russian Federation website]. Available at: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/70415/> (accessed: 09/10/2023).
6. Nikulina N.O., Ibragimova A.V. Primenenie informacionnyh tehnologij v processah vzaimodejstviya organizacij [Application of information technologies in the processes of organizations interaction]. XVIII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Upravleniye ekonomikoy: metody, modeli, tekhnologii": trudy [Economic management: methods, models, technologies: Proceedings of the XVIII International scientific conference], Ufa, 2018, pp. 328-331.
7. Nikulina N.O., Yarmukhametova G.I. Primenenie informacionnyh tehnologij v obrazovatelnyh processah [Application of information technologies in educational processes]. XIV Yezhegodnaya nauchnaya sessiya aspirantov i molodykh uchenykh. Materialy Vserossiyskoj nauchnoj konferentsii v 3 t. (Vologda, 24-27 noyabrya 2020 g.) [XIV Annual scientific session of graduate students and young scientists. Materials of the All-Russian scientific conference. Vologda, November 24-27, 2020], vol. 1, pp. 170-174.
8. Massel L.V. Cifrovizacija i sovremennye trendy iskusstvennogo intellekta [Digitalization and modern trends of artificial intelligence]. Aktual'nyye voprosy agrarnoy nauki [Actual issues of agrarian science], 2022, no. 45, pp. 48-64.
9. Trudovoj Kodeks Rossijskoj Federacii [The Labor Code of the Russian Federation]. Article 331 "The right to engage in teaching activities" dated 12/30/2001 No. 197-FZ (as amended on 02/14/2024).
10. Startseva E., Grimaylo A., Chernyahovskaya, L. et al.. Ontology based decision support in career choice. 2019 XXI International conference complex systems: control and modeling problems (CSCMP), DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976531.
11. Dorokhova T. Y., Puchkov N. P. Regionalnaja sistema celevoj podgotovki specialistov v vuse: monografiya [Regional system of targeted training of specialists in higher education: monograph]. Tambov: Izdatel'skiy tsentr FGBOU VO "TGTU" [Tambov: Publishing center of FGBOU VO "TSTU"], 2021, 132 p.
12. Startseva E.B., Grimaylo A.Yu., Dracheva I.V. et al. Detecting major factors for university success. Systems engineering and information technologies, 2020, vol. 2, no. 2 (4), pp. 25-35.
13. Chernyakhovskaya L.R., Vassilijev V.I., Gvozdev V.E. et al. Metody i modeli podderzhki prinjatija reshenij pti upravlenii innovacionnymi proektami v proizvodstvenno-ekonomicheskikh sistemah [Methods and models of decision-making support in innovative projects management in production and economic systems]. M., Izdatel'skiy

- dom Akademii Yestestvoznaniya [M., Publishing house of the Academy of Natural Sciences], 2021, 230 p. DOI 10.17513/np.437.
14. Yerzhenin R.V., Massel L.V. Ontologicheskij podhod k predstavleniju znaniy o metodologii modelirovaniya slozhnoj systemy upravleniya [Ontological approach to knowledge presentation about the methodology of a complex control system modeling]. *Ontologiya proyektirovaniya [Design ontology]*, 2020, vol. 10, no. 4 (38), pp. 463-476.
 15. Shpak M.A. Ontologiya kak posrednik mezhdru polzovatelem i informacionnoj sistemoy [Ontology as a mediator between the user and the information system]. *Molodezhnyy nauchnyy vestnik MGTU im. N.E. Bauman [Youth scientific bulletin of the Bauman, MSTU]*, 2014, no 6, pp. 13-18.
 16. Nikolaev I.E. Metod izvlecheniya znaniy i navykov/kompetencij iz tekstov trebovaniy vakansij [A method of extracting knowledge and skills/competencies from the texts of job requirements]. *Ontologiya proyektirovaniya [Design ontology]*, 2023, vol. 13, no. 2 (48), pp. 282-293, DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-282-293.
 17. Asanov A.Z., Myshkina I.Yu., Grudtsyna L.Yu. Prognozirovaniye vostrebovannosti kompetencij pri korrektyrovke program obucheniya s pomoshju kognitivnyh modelej [Forecasting the demand for competencies when adjusting training programs using cognitive models]. *Ontologiya proyektirovaniya [Design ontology]*, 2019, vol. 9, no. 2 (32), pp. 203-213. DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-2-203-213.
 18. Novosti NIU VSHE [HSE Science News]. Available at: <https://www.hse.ru/news/science/850278408.html> (accessed: 09/01/2023).
 19. Dekanova N.P., Makhnev S.A. Analiz socialnyh setej – podderzhka abiturientov v professionalnoj orientacii [Analysis of social networks – applicants support in professional orientation]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management]*, 2019, no. 4 (16), pp. 131-141, DOI:10.25729/2413-0133-2019-4-11.

Nikulina Natalia Olegovna. An associate professor of basic department of automated organizational management systems of MIREA – Russian technological university, methodologist of scientific and educational department of the FSAU research institute "Voskhod". Research interests: research in the field of project management, system modeling and design of information systems in organizational management, AuthorID (RSCI): 396597, SPIN: 5395-1463, ORCID 0000-0002-8594-2093, Author ID (Scopus): 57218643085, Researcher ID (WoS): AAX-8251-2020, nick_nataly@rambler.ru., 119454, Russia, Moscow, Vernadsky Ave., 78.

Startseva Elena Borisovna. An associate professor of automated management systems department. Research interests: system modeling and design of information systems, system analysis, decision-making support, intelligent knowledge management technologies in various applied fields. Research interests: intelligent decision support systems development. AuthorID (RSCI): 143639, SPIN:7621-1551, ORCID 0000-0003-3139-050X, star_elena@list.ru, 450008, Russia, Ufa, K. Marks Str., 12.

Malakhova Anna Ivanovna. Graduated from Ufa state aviation technical university, candidate of technical sciences. An associate professor of automated management systems department. Research interests: system analysis, information management and processing, intelligent knowledge management technologies in various applied fields. Research interests: intelligent decision support systems development. Author ID (RSCI): 1005748, SPIN: 2382-5254, ORCID 0000-0003-0099-3594, Author ID (Scopus): 57224350806, Researcher ID (WoS): ABC-8039-2020, aimalakhova@gmail.com, 450008, Russia, Ufa, K. Marks Str., 12.

Статья поступила в редакцию 11.03.2024; одобрена после рецензирования 21.05.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 03/11/2024; approved after reviewing 05/21/2024; accepted for publication 12/17/2024.

